



**ANÁLISE EXPERIMENTAL À PUNÇÃO DE LAJES LISAS TIPO *BUBBLEDECK*  
COM PILAR INTERNO**

**MAURICIO MENÉNDEZ LEDO**

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

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**ANÁLISE EXPERIMENTAL À PUNÇÃO DE LAJES LISAS**  
**TIPO *BUBBLEDECK* COM PILAR INTERNO**

**MAURICIO MENÉNDEZ LEDO**

**ORIENTADOR: GUILHERME SALES S. A. MELO, *Ph.D.* (UnB)**

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

**PUBLICAÇÃO: E. DM – 015 A/16**  
**BRASÍLIA/DF: JULHO – 2016**

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

**ANÁLISE EXPERIMENTAL À PUNÇÃO DE LAJES LISAS TIPO**  
**BUBBLEDECK COM PILAR INTERNO**

**MAURICIO MENÉNDEZ LEDO**

**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, *Ph.D* (UnB)**  
**(Orientador)**

---

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

---

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

---

**Dr. Vladimir Villaverde Barbán, *D.Sc* (PROEST)**  
**(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 26 DE JULHO DE 2016**

## FICHA CATALOGRÁFICA

LEDO, MAURICIO MENÉNDEZ

Análise experimental à punção de lajes lisas tipo *BubbleDeck* com pilar interno. [Distrito Federal] 2016.

xxi, 119p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2016).

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1.Punção

2.*BubbleDeck*

3.Lajes lisas

4. Análise Experimental

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Mestre)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LEDO, M. M. (2016). Análise experimental à punção de lajes lisas tipo *BubbleDeck* com pilar interno. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM - 015 A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 119p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Mauricio Menéndez Ledo

TÍTULO: Análise experimental à punção de lajes lisas tipo *BubbleDeck* com pilar interno.

GRAU: Mestre

ANO: 2016

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.

---

Mauricio Menéndez Ledo

CLN 407, Bloco C, Apto. 75.

70.855-530 Brasília - DF - Brasil.

e-mail: mauroledo16genero1985@gmail.com

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais Teresita e Carlos, à minha irmã Vivian, aos meus sogros Nancy e Juan,  
à minha futura esposa Ailín, e às minhas avós Rita e Teté (*in memoriam*).

Dedico este trabalho, com todo o amor do mundo,  
por terem sido pacientes durante tantos anos,  
por terem guiado meus passos para chegar até aqui.  
Obrigado por me tornarem a pessoa que hoje sou.

“O Projeto Estrutural é a arte de usar  
materiais que realmente não conhecemos,  
para formar estruturas que realmente não podemos analisar,  
de forma a suportar as cargas que não podemos realmente avaliar.  
Tudo isso de forma tal que o público não se dê conta de nossa ignorância.”

Doutor. Roberto Melli Piralla.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço eternamente ao Professor Guilherme Sales S. A. Melo, pela orientação, dedicação, preocupação e, sobretudo, pela confiança em mim depositada durante o desenvolvimento de toda a pesquisa e por ter me dado a oportunidade de ser seu orientando.

Agradeço ao Professor Marcos Honorato de Oliveira, que foi mais que chefe de laboratório e co-orientador, ajudando em cada passo dado até a realização do último ensaio.

Um agradecimento especial para toda a minha família, que é uma das razões da minha vida. A duas pessoas em especial, que já são parte da minha família, meus maiores agradecimentos: Ailín, que me apoiou durante toda a pesquisa e durante estes três últimos anos da minha vida, e a Wanderley Gustavo Nicácio, que é mais que um companheiro de pesquisa, se tornou para mim um irmão. Sem vocês, esta pesquisa não teria sido possível.

Aos meus sogros Nancy e Juan por todo o apoio e confiança depositada em mim durante todo este tempo.

Agradeço muitíssimo a Eduardo Veloso dos Santos, obrigado pela ajuda imprescindível no laboratório. Meus agradecimentos a Henrique Nery pela sua grande ajuda no início desta pesquisa.

A Magno Ernesto Cavalcante agradeço pela ajuda no laboratório, sempre com ideias brilhantes e incentivando esta pesquisa a cada instante.

Ao técnico de laboratório Pedro Moreira, que foi o braço direito durante o processo de confecção das lajes.

Aos amigos feitos durante a etapa do laboratório: Os engenheiros, Wallison Barbosa, Agno Vieira, Nívea Gabriela, e todos que de alguma forma ajudaram a realizar este trabalho.

À *Bubbledeck* Brasil, representada por Wlício, Leonardo, Ricardo e Guilherme, obrigado pela ajuda financeira. À *BubbleDeck International*, representada por Kim

Breuning, obrigado pela paciência e compreensão nos momentos difíceis desta pesquisa.

Ao CNPq, muito obrigado pelo apoio financeiro durante estes dois anos no Brasil.

A minhas avós Rita e Teté (*in memoriam*), muito obrigado pela educação que sempre me proporcionaram, e por terem me convertido na pessoa que sou, e me guiado até aqui. Que Deus esteja sempre guiando vossos passos onde quer que estejam.



## RESUMO

Um sistema de lajes nervuradas relativamente recente é o sistema *BubbleDeck*, composto de esferas plásticas de polipropileno inseridas em lajes de concreto. Dentre as vantagens deste sistema pode-se destacar principalmente a redução do peso próprio se comparada à laje maciça, porém, como toda laje nervurada, cuidado especial deve ser dedicado à análise do cisalhamento das nervuras, além da punção na ligação laje / pilar. Nesta pesquisa foram ensaiadas experimentalmente quatro lajes lisas, sendo duas do tipo maciça e duas do tipo *BubbleDeck*, ensaiadas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília. Os modelos locais ensaiados simulam a ligação laje-pilar interno de uma edificação com carregamento simétrico. As dimensões dos modelos de laje foram de 2500 x 2500 mm e 280 mm de espessura com pilar circular centrado de 300 mm de diâmetro, utilizando mesma taxa de armadura de flexão para todos os modelos e concreto de 45 MPa.

Foi avaliada a resistência à punção em lajes tipo *BubbleDeck* considerando a técnica construtiva deste tipo de laje (armadura de cisalhamento não ancorada à armadura de flexão e distribuição da armadura de punção padrão *BubbleDeck*) e comparada com lajes maciças considerando armadura de cisalhamento ancorada e com uma das distribuições especificadas pelas normas (distribuição em cruz).

Os resultados obtidos nos ensaios foram analisados quanto a: deslocamentos verticais, deformações na superfície comprimida do concreto, deformações nas armaduras de flexão e cisalhamento, mapas de fissuração, e modo de ruptura das lajes. Foram comparadas com as cargas de ruptura as estimativas de carga última à punção pelo ACI 318 (2011), pelo EUROCODE 2 (2004) e pela NBR 6118 (2014). Para o cálculo do perímetro crítico das lajes *BubbleDeck* foi sugerida uma diminuição na área efetiva de concreto quando é interceptado pela zona dos vazios esféricos.

Os resultados obtidos em laboratório evidenciaram que as lajes *BubbleDeck* atingiram cargas de ruptura aproximadamente 20% menores que as lajes maciças, e que o uso ou não de pré-laje não influenciou na resistência última a punção das lajes. Com as modificações de cálculo sugeridas nesta pesquisa, para as lajes *BubbleDeck* as normas ACI 318 (2011) e EUROCODE 2 (2004) foram as que melhor estimativa de cargas últimas apresentaram.

## ABSTRACT

The BubbleDeck system is a relatively recent type of waffle slab being used, where polypropylene plastic balls are used embedded to the concrete slab. Among the advantages are the weight reductions, besides being a flat slab. However, special care should be devoted to the shear at the strips, besides the punching shear at the column/slab connection.

In this research are experimentally evaluated four flat slabs, two of these are solid slabs and two are *BubbleDeck* type, tested in the structures laboratory at the University of Brasilia. The tested models correspond to interior column/slab connection of a building, with dimensions of 2500 x 2500 mm long, 280 mm thick, circular column with 300 mm diameter, the same flexural reinforcement ratio and concrete strength of 45 MPa.

It was evaluated the punching shear resistance in BubbleDeck slabs type considering the construction technique of this type of slab (shear reinforcement not anchored to the reinforcement bending and standard BubbleDeck punching shear distribution) and compared to solid slabs considering anchored shear reinforcement and a distributions specified by the rules (distribution crosswise).

The test results obtained were analyzed with respect to: vertical displacements of the slabs, deformations in the compressed surface of the concrete, deformations in flexural and shear reinforcement, cracking maps, and the slabs failure mode. The estimated punching shear last load according to ACI 318 (2011), EUROCODE 2 (2004) and NBR 6118 (2014) were evaluated.

The results obtained in the laboratory showed that the BubbleDeck slabs reached last loads approximately 20% smaller than the solid slabs, and the use or not of pre-slab did not influence the last punching shear resistance. By the calculating adaptations suggested in this research, the standards ACI 318 (2011) and EUROCODE 2 (2004 ) were the best adapted, with good precision when estimating the strength of BubbleDeck slabs.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2. MOTIVAÇÃO .....	5
1.3. OBJETIVOS .....	6
1.4. METODOLOGIA .....	6
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
2.1. FENÔMENO DA PUNÇÃO .....	7
2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO .....	9
2.2.1. Resistência à compressão do concreto.....	9
2.2.2. Taxa de Armadura de Flexão Tracionada.....	10
2.2.3. Geometria e dimensões do pilar .....	10
2.2.4. Efeito de tamanho ( <i>Size Effect</i> ) .....	11
2.2.5. Armadura de cisalhamento .....	11
2.3. LAJE <i>BUBBLEDECK</i> – CONCEITO E SISTEMAS CONSTRUTIVOS .....	14
2.3.1. Módulo com pré-laje .....	14
2.3.2. Módulo reforçado .....	16
2.3.3. Módulo acabado .....	17
2.4. RECOMENDAÇÕES DE CÁLCULO DA <i>BUBBLEDECK INTERNATIONAL</i> .....	17
2.5. PESQUISAS NO MUNDO E NO BRASIL COM LAJES <i>BUBBLEDECK</i> .....	18
2.5.1. HELD (2002) COMPORTAMENTO À PUNÇÃO DE LAJES COM VAZIOS TRABALHANDO EM DUAS DIREÇÕES.....	18
2.5.2. ALDEJOHANN (2008) COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO DE LAJES COM VAZIOS EM DUAS DIREÇÕES .....	21
2.5.3. LAI (2010) COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LAJES TIPO <i>BUBBLEDECK</i> .....	22
2.5.4. LIMA (2015) ANÁLISE EXPERIMENTAL À PUNÇÃO DE LAJES LISAS TIPO <i>BUBBLEDECK</i> .....	24
2.6. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO .....	30
2.6.1. ACI 318 (2011).....	31
2.6.2. EUROCODE 2 (2004).....	34

2.6.3.	NBR 6118 (2014) .....	36
<b>3.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>38</b>
3.1.	CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIADAS .....	38
3.2.	ARMADURA DE FLEXÃO .....	41
3.3.	ARMADURA DE CISALHAMENTO .....	44
3.4.	ARMADURA DOS PILARES .....	46
3.5.	INSTRUMENTAÇÃO .....	47
3.5.1.	Deslocamentos verticais .....	47
3.5.2.	Deformações nas armaduras e no concreto .....	48
3.6.	FABRICAÇÃO DOS MODELOS LOCAIS .....	55
3.6.1.	Formas .....	55
3.6.2.	Concretagem.....	56
3.7.	MATERIAIS.....	58
3.7.1.	Concreto .....	58
3.7.2.	Aço .....	59
3.8.	SISTEMA DE ENSAIO .....	60
3.9.	RESISTÊNCIA A FLEXÃO DAS LAJES.....	63
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>65</b>
4.1.	CARGA DE RUPTURA .....	65
4.2.	DESLOCAMENTOS VERTICAIS DAS LAJES .....	65
4.3.	DEFORMAÇÕES NA SUPERFÍCIE COMPRIMIDA DO CONCRETO .....	70
4.4.	DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO .....	73
4.5.	DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE CISALHAMENTO .....	76
4.6.	MAPA DE FISSURAÇÃO.....	78
<b>5.</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>80</b>
5.1.	CARGA DE RUPTURA .....	80
5.2.	MODO DE RUPTURA DAS LAJES.....	81
5.3.	DESLOCAMENTOS VERTICAIS DAS LAJES .....	82
5.4.	DEFORMAÇÕES NA SUPERFÍCIE COMPRIMIDA DO CONCRETO .....	82
5.5.	DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO .....	83
5.6.	DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE CISALHAMENTO .....	83
5.7.	MAPAS DE FISSURAÇÃO .....	84

5.8. ANÁLISE DAS PRESCRIÇÕES NORMATIVAS DO ACI 318 (2011), EUROCODE 2 (2004) E NBR 6118 (2014) .....	85
5.8.1. Cargas de ruptura previstas pelo ACI 318 (2011) .....	85
5.8.2. Cargas de ruptura previstas pelo EUROCODE 2 (2004) .....	87
5.8.3. Cargas de ruptura previstas pela NBR 6118 (2014) .....	88
5.9. CARGAS DE RUPTURA SEGUNDO PRESCRIÇÕES DA <i>BUBBLEDECK</i> <i>INTERNATIONAL</i> .....	88
5.10. PROPOSTA DE ADAPTAÇÃO AO ACI 318 (2011), EUROCODE 2 (2004) E NBR 6118 (2014) .....	89
5.10.1. Cargas de ruptura previstas pelo ACI 318 (2011) considerando os vazios para lajes tipo <i>BubbleDeck</i> .....	91
5.10.2. Cargas de ruptura previstas pelo EUROCODE 2 (2004) considerando os vazios para lajes tipo <i>BubbleDeck</i> .....	92
5.10.3. Cargas de ruptura previstas pela NBR 6118 (2014) considerando os vazios para lajes tipo <i>BubbleDeck</i> .....	93
5.11. COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE CÁLCULO ANALISADOS .....	93
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>96</b>
6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	98
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>99</b>
<b>APÊNDICE A – LEITURAS REGISTRADAS DURANTE OS ENSAIOS</b> .....	<b>102</b>
<b>APÊNDICE B – PERÍMETROS CRÍTICOS</b> .....	<b>118</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Cargas últimas de punção, HELD (2002).....	19
Tabela 2.2 – Comparação da resposta estática da laje de escritório, LAI (2010). .....	23
Tabela 2.3 – Comparação da resposta modal da laje de escritório LAI (2010) .....	24
Tabela 2.4 – Descrição das lajes ensaiadas à punção, LIMA (2015) .....	25
Tabela 2.5 – Cargas de ruptura, LIMA (2015) .....	27
Tabela 3.1 – Principais variáveis das lajes ensaiadas à punção.....	39
Tabela 3.2 – Propriedades do concreto empregado .....	59
Tabela 3.3 – Propriedades do aço empregado .....	60
Tabela 4.1 – Carga de ruptura experimental das lajes.....	65
Tabela 5.1 – Carga de ruptura experimental, resistência à flexão e características principais das lajes.....	80
Tabela 5.2 – Características das lajes a comparar .....	86
Tabela 5.3 – Cargas de ruptura pelo modelo teórico ACI 318 (2011) .....	86
Tabela 5.4 – Cargas de ruptura pelo modelo teórico EUROCODE 2 (2004) .....	87
Tabela 5.5 – Cargas de ruptura pelo modelo teórico NBR 6118 (2014).....	88
Tabela 5.6 – Cargas de ruptura segundo recomendações da <i>BubbleDeck International</i>	89
Tabela 5.7 – Cargas de ruptura considerando os vazios pelo ACI 318 (2011) .....	91
Tabela 5.8 – Cargas de ruptura considerando os vazios pelo EUROCODE 2 (2004) ...	92
Tabela 5.9 – Cargas de ruptura considerando os vazios pela NBR 6118 (2014) .....	93
Tabela 5.10 – Comparação dos resultados dos modelos de cálculo analisados .....	94

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Sistemas estruturais para edificações. [CANEIRO (2015)] .....	1
Figura 1.2 – Sistemas estruturais para edificações. [CANEIRO (2015)] .....	2
Figura 1.3 – Laje tipo <i>BubbleDeck</i> . [ <a href="http://www.imgrum.net/user/yaffasef/">http://www.imgrum.net/user/yaffasef/</a> ] .....	2
Figura 1.4 – Colapso por punção da laje do quarto pavimento do edifício <i>Piper Row Car Park, Wolverhamptom, UK</i> . [WOOD (1997)] .....	4
Figura 2.1 – Seção transversal. Ruptura por punção. [CEB-FIP, <i>Model Code</i> (1990)] ..	7
Figura 2.2 – Lajes lisas. [ <a href="http://www.estruturas.ufpr.br/">http://www.estruturas.ufpr.br/</a> ] .....	8
Figura 2.3 – Lajes lisas com capitel. [ <a href="http://www.estruturas.ufpr.br/">http://www.estruturas.ufpr.br/</a> ] .....	8
Figura 2.4 – Lajes lisas com ábaco. [ <a href="http://www.estruturas.ufpr.br/">http://www.estruturas.ufpr.br/</a> ] .....	8
Figura 2.5 – Lajes lisas com ábaco e capitel. [ <a href="http://www.estruturas.ufpr.br/">http://www.estruturas.ufpr.br/</a> ] .....	8
Figura 2.6 – Tipos de ruptura à punção em lajes com armadura de cisalhamento. [FERREIRA (2010)] .....	12
Figura 2.7 – Armaduras de cisalhamento para o combate à punção. [FERREIRA 2010)], continuação .....	13
Figura 2.8 – Distribuição radial. [ <a href="http://www.barbourproductsearch.info/">http://www.barbourproductsearch.info/</a> ] .....	13
Figura 2.9 – Distribuição em cruz. [ <a href="http://www.ancon.com.au/">http://www.ancon.com.au/</a> ] .....	13
Figura 2.10 – Sistema de lajes tipo <i>BubbleDeck</i> . [ <a href="http://www.bubbledeck.com.br/">http://www.bubbledeck.com.br/</a> ] .....	14
Figura 2.11 – Módulo com pré-laje. [ <a href="http://www.bubbledeck.com.br/">http://www.bubbledeck.com.br/</a> ] .....	15
Figura 2.12 – Módulo com pré-laje, dispensando o uso de formas inferiores. [ <a href="http://www.bubbledeck.com.br/">http://www.bubbledeck.com.br/</a> ] .....	15
Figura 2.13 – Colocação das armaduras. [ <a href="http://www.bubbledeck.com.br/">http://www.bubbledeck.com.br/</a> ] .....	15
Figura 2.14 – Concretagem final da laje. [ <a href="http://www.bubbledeck.com.br/">http://www.bubbledeck.com.br/</a> ] .....	16
Figura 2.15 – Variante modulo reforçado. [ <a href="http://www.bubbledeck.com.br/">http://www.bubbledeck.com.br/</a> ] .....	16
Figura 2.16 – Variante modulo acabado. [ <a href="http://www.bubbledeck.com.br/">http://www.bubbledeck.com.br/</a> ] .....	17
Figura 2.17 – Lajes analisadas com 45 cm de espessura, vista em planta, [HELD (2002)] .....	18
Figura 2.18 – Lajes analisadas com 23 cm de espessura, vista em planta, [HELD (2002)] .....	19
Figura 2.19 – Malha de elementos finitos. [HELD (2002)] .....	20
Figura 2.20 – Diagrama carga - deslocamento da análise computacional e do teste [HELD (2002)] .....	20
Figura 2.21 – Comparação do padrão de fissuração. [HELD (2002)] .....	20
Figura 2.22 – Características da seção proposta. [ALDEJOHANN (2008)] .....	22
Figura 2.23 – Esquema da laje de escritório analisada. [LAI (2010)] .....	23
Figura 2.24 – Dimensões das lajes ensaiadas. [LIMA (2015)] .....	25

Figura 2.25 – Detalhe da armadura de cisalhamento (medidas em mm). [LIMA (2015)] .....	26
Figura 2.26 – Posicionamento da armadura de cisalhamento, em corte, na laje. [LIMA (2015)].....	28
Figura 2.27 – Comparação entre a carga última experimental e a estimada pelas normas, [LIMA (2015)].....	29
Figura 2.28 – Perímetro crítico ( $b_o$ ) segundo ACI 318 (2011).....	32
Figura 2.29 – Perímetro crítico ( $b_{out}$ ) segundo ACI 318 (2011).....	33
Figura 2.30 – Perímetro crítico ( $u_1$ ) segundo o EUROCODE 2 (2004).....	34
Figura 2.31 – Perímetro crítico ( $u_{out}$ ) segundo o EUROCODE 2 (2004).....	36
Figura 2.32 – Perímetro crítico ( $C'$ ) segundo a NBR 6118 (2014).....	36
Figura 2.33 – Perímetro crítico ( $C''$ ) segundo a NBR 6118 (2014).....	37
Figura 3.1 – Modelo de pavimento 3D.....	39
Figura 3.2 – Pórtico do Pavimento.....	39
Figura 3.3 – Geometria dos modelos locais (cotas em mm).....	40
Figura 3.4 – Distribuição em planta da armadura de flexão principal negativa.....	42
Figura 3.5 – Detalhe das armaduras de flexão (cotas em mm).....	43
Figura 3.6 – Armadura das lajes SS1 e BD1.....	43
Figura 3.7 – Detalhe em planta das armaduras de cisalhamento das lajes SS1 e SS2 (cotas em mm).....	44
Figura 3.8 – Detalhe da armadura de cisalhamento na laje SS1.....	44
Figura 3.9 – Detalhe da armadura de cisalhamento na laje SS2.....	45
Figura 3.10 – Detalhe em planta das armaduras de cisalhamento das lajes BD1 e BD2 (cotas em mm).....	45
Figura 3.11 – Detalhe da armadura de cisalhamento na laje BD1 (cotas em mm).....	46
Figura 3.12 – Detalhe da armadura de cisalhamento da laje BD2 (cotas em mm).....	46
Figura 3.13 – Detalhe da armadura dos pilares (cotas em mm).....	46
Figura 3.14 – Foto da armadura do pilar posicionada na laje.....	47
Figura 3.15 – Detalhe de posicionamento dos LVDT's na superfície superior das lajes (cotas em mm).....	48
Figura 3.16 – Posicionamento dos LVDTs na superfície superior das lajes.....	48
Figura 3.17 – Instrumentação nas armaduras de flexão principal (cotas em mm).....	49
Figura 3.18 – Foto da laje BD1 com as barras de flexão principal instrumentadas.....	50
Figura 3.19 – Instrumentação das armaduras de cisalhamento das lajes maciças SS1 e SS2 (cotas em mm).....	51
Figura 3.20 – Instrumentação das armaduras de cisalhamento das lajes <i>BubbleDeck</i> BD1 e BD2 (cotas em mm).....	52
Figura 3.21 – Armaduras de cisalhamento instrumentadas.....	53



Figura 3.22 – Preparação da superfície e colagem dos extensômetros .....	54
Figura 3.23 – Instrumentação do concreto das lajes (cotas em mm).....	55
Figura 3.24 – Formas metálicas empregadas .....	55
Figura 3.25 – Concretagem das pré-lajes .....	56
Figura 3.26 – Processo de concretagem e cura das lajes .....	57
Figura 3.27 – Ensaio de compressão .....	58
Figura 3.28 – Ensaio de compressão diametral .....	59
Figura 3.29 – Ensaio de tração do aço.....	60
Figura 3.30 – Sistema de ensaio 3D. [FERREIRA (2010)] .....	61
Figura 3.31 – Sistema de aquisição de dados. ....	61
Figura 3.32 – Sistema de ensaio, Pórtico de Reação (Laje posicionada) .....	62
Figura 3.33 – Sistema de travamento dos Pilares.....	62
Figura 3.34 – Mecanismo de Ruptura para os modelos ensaiados.....	63
Figura 4.1 – Deslocamentos verticais da laje SS1 (direção S-N).....	66
Figura 4.2 – Deslocamentos verticais da laje SS1 (direção O-L).....	66
Figura 4.3 – Deslocamentos verticais da laje SS2 (direção S-N).....	67
Figura 4.4 – Deslocamentos verticais da laje SS2 (direção O-L).....	67
Figura 4.5 – Deslocamentos verticais da laje BD1 (direção S-N).....	68
Figura 4.6 – Deslocamentos verticais da laje BD1 (direção O-L).....	68
Figura 4.7 – Deslocamentos verticais da laje BD2 (direção S-N).....	69
Figura 4.8 – Deslocamentos verticais da laje BD2 (direção O-L).....	69
Figura 4.9 – Deslocamentos verticais médios dos extremos (LVDT's 1, 6, 7 e 12).....	70
Figura 4.10 – Deformações na superfície do concreto (laje SS1) .....	71
Figura 4.11 – Deformações na superfície do concreto (laje SS2) .....	71
Figura 4.12 – Deformações na superfície do concreto (laje BD1) .....	72
Figura 4.13 – Deformações na superfície do concreto (laje BD2) .....	72
Figura 4.14 – Deformações nas armaduras de flexão (laje SS1).....	74
Figura 4.15 – Deformações nas armaduras de flexão (laje SS2).....	74
Figura 4.16 – Deformações nas armaduras de flexão (laje BD1).....	75
Figura 4.17 – Deformações nas armaduras de flexão (laje BD2).....	75
Figura 4.18 – Deformações nas armaduras de cisalhamento (laje SS1).....	76
Figura 4.19 – Deformações nas armaduras de cisalhamento (laje SS2).....	76
Figura 4.20 – Deformações nas armaduras de cisalhamento (laje BD1).....	77
Figura 4.21 – Deformações nas armaduras de cisalhamento (laje BD2).....	77
Figura 4.22 – Mapa de fissuração (laje SS1).....	78

Figura 4.23 – Mapa de fissuração (laje SS2).....	78
Figura 4.24 – Mapa de fissuração (laje BD1).....	79
Figura 4.25 – Mapa de fissuração (laje BD2).....	79
Figura 5.1 – Detalhe da área de vazio gerado pelo comprimento de arco da esfera cortada pelo perímetro crítico.....	90
Figura 5.2 – Razão entre a carga de ruptura experimental e a estimada pelas normas. (Variante considerando as lajes como maciças).....	95
Figura 5.3 – Razão entre a carga de ruptura experimental e a estimada pelas normas. (Variante aplicando recomendação da <i>BubbleDeck International</i> ).....	95
Figura 5.4 – Razão entre a carga de ruptura experimental e a estimada pelas normas. (Variante considerando os vazios nas lajes).....	95

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$A_{c,ef}$	Área efetiva de concreto na seção do perímetro crítico considerando os vazios
$A_s$	Área de aço da armadura de flexão;
$A_{st}$	Área de aço de uma camada de armadura de cisalhamento, ACI 318 (2011);
$A_{sw}$	Área de aço de uma camada de armadura de cisalhamento, EUROCODE 2 (2004);
$b_w$	Largura unitária de faixa de laje;
$b_o$	Comprimento do perímetro crítico afastado $d/2$ da face do pilar, ACI 318 (2011);
$b_{o,out}$	Comprimento do perímetro crítico externo afastado a uma distancia $d/2$ da última camada de armadura de cisalhamento disposta, ACI 318 (2011);
$B$	Comprimento do modelo de laje para o cálculo de $V_{flex}$ ;
$c$	Diâmetro do pilar;
$C_c$	Comprimento da corda correspondente ao arco gerado pela intercepção do perímetro crítico e a zona de vazio interceptada;
$d$	Altura útil da laje na região de análise;
$d_x$	Altura útil da laje na direção x;
$d_y$	Altura útil da laje na direção y;
$E_c$	Módulo de elasticidade secante do concreto;
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço;
$EC$	Extensômetro colado na superfície do concreto;
$EE$	Extensômetro dos estribos;
$EF$	Extensômetro das armaduras de flexão;
$f'_c$	Resistência à compressão especificada do concreto, ACI 318 (2011);
$f_{ck}$	Resistência característica à compressão do concreto, EUROCODE 2 (2004);
$f_{ct}$	Resistência à tração do concreto;

$f_y$	Tensão de escoamento do aço;
$f_{y,t}$	Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento, com ( $f_{y,t} \leq 420$ Mpa), ACI 318 (2011);
$f_{yw}$	Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento;
$f_{yw,ef}$	Tensão efetiva da armadura de cisalhamento, EUROCODE 2 (2004);
$h$	Altura total da laje;
$m_r$	Momento resistente da seção transversal de laje com largura unitária;
$M_{RUP,ACI}$	Modo de ruptura da laje determinado pelo ACI 318 (2011);
$M_{RUP,EC}$	Modo de ruptura da laje determinado pelo EUROCODE 2 (2004);
$M_{RUP,NBR}$	Modo de ruptura da laje determinado pela NBR 6118 (2014);
$M_{RUP,U}$	Modo de ruptura da laje obtido da análise experimental;
$r_q$	Distância do centro do pilar ao ponto de aplicação da carga;
$S_r$	Distância entre as camadas de armaduras de cisalhamento;
$u$	Perímetro crítico na seção de análise;
$u_{out}$	Comprimento do perímetro crítico afastado $1.5d$ da camada mais externa da armadura de cisalhamento, EUROCODE 2 (2004);
$u_0$	Comprimento do perímetro crítico na face do pilar, EUROCODE 2 (2004);
$u_1$	Comprimento do perímetro crítico afastado $2d$ da face do pilar, EUROCODE 2 (2004);
$V_{ACI}$	Carga de resistência teórica à punção pelo ACI 318 (2011);
$V_{ACI,60\%}$	Carga de resistência teórica à punção pela recomendação da <i>BubbleDeck International</i> baseado no ACI 318 (2011);
$V_C$	Parcela de resistência correspondente ao concreto;
$V_{EC}$	Carga de resistência teórica à punção pelo EUROCODE 2 (2004);
$V_{EC,60\%}$	Carga de resistência teórica à punção pela recomendação da <i>BubbleDeck International</i> baseado no EUROCODE 2 (2004);
$V_{flex}$	Carga estimada de ruptura por flexão da laje;
$V_{int}$	Força resistente do concreto na diagonal comprimida;

$V_{NBR}$	Carga de resistência teórica à punção pela NBR 6118 (2014);
$V_{NBR,60\%}$	Carga de resistência teórica à punção pela recomendação da <i>BubbleDeck International</i> baseado na NBR 6118 (2014);
$V_{out}$	Força resistente do concreto na diagonal tracionada fora da região reforçada a punção;
$V_S$	Parcela de resistência correspondente ao aço de reforço transversal;
$V_T$	Força resistente da ligação laje-pilar com armadura de cisalhamento;
$V_{Tcs}$	Força resistente do concreto na diagonal tracionada dentro da região reforçada a punção;
$V_u$	Carga de ruptura experimental da laje;
$x$	Profundidade da linha neutra;
$\alpha_s$	Valor que leva em consideração se o pilar é interior, de borda ou de canto. Com valores de 40, 30 e 20 respectivamente, ACI 318 (2011);
$\beta$	Razão entre a maior e a menor dimensão do pilar, ACI 318 (2011);
$\phi_t$	Diâmetro da armadura de cisalhamento;
$\xi$	<i>Size effect (Efeito de tamanho)</i> ;
$\mathcal{E}_y$	Deformação de escoamento do aço;
$\lambda$	É uma função da densidade do concreto (com valor “1” para concretos de peso normal), ACI 318 (2011);
$\rho$	Taxa de armadura de flexão tracionada média da laje;
$\rho_x$	Taxa de armadura de flexão tracionada da laje na direção x;
$\rho_y$	Taxa de armadura de flexão tracionada da laje na direção y.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As lajes apoiadas sobre vigas em suas bordas, Figura 1.1 (a), tem sido uma solução bastante utilizada, pois conduz a um pavimento de grande rigidez com uma espessura de laje relativamente pequena, cobrindo grandes vãos. Porém a necessidade de reduzir o pé-direito dos pavimentos, fundamentalmente nos edifícios de grande altura, com a finalidade de diminuir os custos, representou para os arquitetos e engenheiros um desafio da engenharia, o qual resultou na eliminação das vigas, apoiando as lajes diretamente sobre os pilares, Figura 1.1 (b).

A principal limitação desse tipo de sistema construtivo é a ligação laje-pilar, onde surgem grandes esforços provocados pelos momentos fletores e forças cortantes. Essa limitação pode ser resolvida na maioria dos casos engrossando a laje nessa região, Figura 1.2 (a), o que proporciona um aumento considerável da capacidade resistente da ligação sem incrementar a espessura de toda a laje nem a altura do pavimento.

Outra solução que tem sido bastante utilizada no Brasil, além da laje maciça, é a laje nervurada, na qual os maiores esforços se concentram nas nervuras implicando em uma economia considerável de concreto, Figura 1.2 (b), destacando que a zona da ligação laje-pilar encontra-se maciça com a finalidade de garantir maior resistência nessa região crítica.

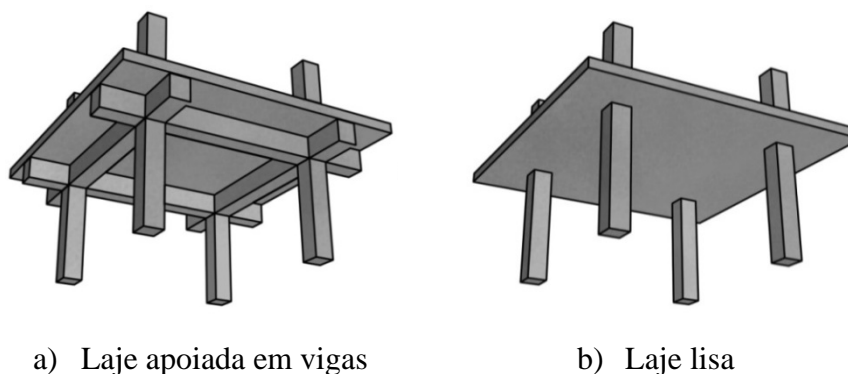


Figura 1.1 – Sistemas estruturais para edificações. [CANEIRO (2015)]

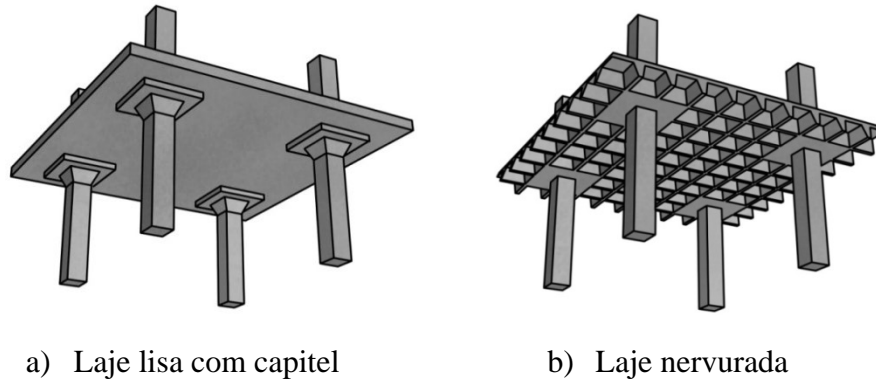


Figura 1.2 – Sistemas estruturais para edificações. [CANEIRO (2015)]

A laje da Figura 1.2 (b) mostra uma técnica avançada de sistema estrutural para edificações com a finalidade de vencer grandes vãos e ao mesmo tempo reduzir de forma considerável a quantidade de concreto.

Outra técnica bem avançada de construir lajes fazendo uso de um menor volume de concreto se comparada com uma laje maciça de mesma espessura, foi desenvolvida por pesquisadores e engenheiros dinamarqueses que desenvolveram um sistema no qual são adicionadas esferas plásticas de polipropileno de alta densidade, as mesmas encontram-se espaçadas uniformemente no interior da laje entre duas malhas de aço, com cobrimento de concreto suficiente em ambas às faces da laje, ver Figura 1.3.



Figura 1.3 – Laje tipo *BubbleDeck*. [<http://www.imgrum.net/user/yaffasef/>]

Um dos detalhes mais importantes a destacar nesse tipo de laje é o fato da redução considerável da quantidade de concreto, que representa cerca de 30% a 35% do peso total se comparada com uma laje maciça de mesma espessura.

A perda de resistência na zona comprimida da laje, devido à região ocupada por parte das esferas, é compensada pela armadura superior colocada na mesma, o qual garante o

equilíbrio interno da seção, principalmente em lajes de maiores espessuras para este tipo de sistema construtivo.

Segundo estudos realizados pela *BubbleDeck International*, o sistema construtivo fazendo o uso deste tipo de lajes contribui de forma substancial para a redução de emissão de carbono decorrente do processo de construção. A cada 5000 m<sup>2</sup> de pavimentos feitos em *BubbleDeck* garante-se uma diminuição de aproximadamente 600 m<sup>3</sup> de concreto lançados no local, 100 viagens de veículos pesados, 1800 toneladas de cargas em fundações, 1745 GJ de energia usada na produção e transporte de concreto e 278 toneladas de CO<sub>2</sub> emitida na atmosfera.

Estes dados são baseados em prédios de escritório típicos com 4500 m<sup>2</sup> e múltiplos vãos de 7,5 por 7,5 metros, e com as premissas de sobrecarga de 4,0 kN/m<sup>2</sup>, acabamentos e serviços usuais; energia para o transporte do cimento por 80 km e agregados por 15 km da usina de concreto, e esta a 8 km da obra.

Como todo sistema estrutural, o sistema *BubbleDeck* apresenta vantagens e desvantagens que devem ser levadas em consideração pelo projetista na hora de definir o sistema estrutural mais adequado.

Como vantagens do sistema, destaca-se:

- Layouts flexíveis que facilmente se adaptam a arquiteturas curvas, irregulares, balanços e rebaixos.
- Menor peso próprio em até 35% se comparada com uma laje maciça de mesma espessura, reduzindo as cargas nas fundações e por consequência suas dimensões.
- A técnica de fabricação permite industrializar totalmente o processo construtivo, com o uso dos módulos acabados.
- No sistema com pré-moldados e módulos acabados dispensam o uso de formas inferiores.

Como desvantagens do sistema, destaca-se:

- Pequena redução da rigidez da laje, devido aos vazios deixados pelas esferas de polipropileno.



- Redução na resistência ao cisalhamento de até 40% devido aos vazios deixados pelas esferas plásticas.
- Não é normatizado em muitos países devido ao fato de ser um sistema relativamente novo.
- Necessidade de mão de obra com maior capacitação.
- Possibilidade de ruptura por punção devido à elevada concentração de tensões na ligação laje-pilar.

Como exposto, uma das maiores desvantagens desse sistema estrutural é a possibilidade de ruptura à punção da ligação laje-pilar, a qual pode levar a estrutura à ruína parcial ou total. Como destacado por MELO (1990), o edifício *Prest-o-Lite*, em Indianápolis (1911), foi o primeiro caso detectado de ruptura por punção, onde ocorreu o fenômeno denominado colapso progressivo, que levou a ruína total da estrutura.

Depois de 1911 outras estruturas tem sofrido o fenômeno de ruptura por punção, como no caso do edifício *Piper Row Car Park*, mostrado Figura 1.4, onde teve lugar uma ruptura por punção na laje do quarto pavimento, na cidade de *Wolverhamptom, UK* em 20 de março de 1997.



Figura 1.4 – Colapso por punção da laje do quarto pavimento do edifício *Piper Row Car Park, Wolverhamptom, UK*. [WOOD (1997)]

No mundo têm sido realizadas poucas pesquisas que avaliam a resistência à punção da ligação laje-pilar para este tipo de sistema,

No Brasil a única pesquisa que se tem conhecimento é a que está sendo desenvolvida na Universidade de Brasília, que pretende avaliar o comportamento da ligação laje-pilar para este tipo de sistema construtivo.

## **1.2. MOTIVAÇÃO**

A insistente pesquisa pelo homem de uma variante sempre mais econômica, rápida e ecológica de se construir, tem sido, durante anos, a principal fonte de desenvolvimento das diferentes variações estruturais que procuram juntar tais requisitos.

O sistema estrutural de lajes tipo *BubbleDeck*, na procura desses três requisitos anteriormente mencionados, desenvolveu uma técnica que une economia, rapidez na execução e menor consumo de materiais, se comparada com uma laje maciça de mesma espessura.

Seu uso no Brasil é bem incipiente ainda, e por tal motivo, os projetistas não tem um domínio adequado de seu comportamento estrutural; os países que desbravam esta tecnologia são fundamentalmente os do Reino Unido, Holanda, Dinamarca e Alemanha, sendo os dois últimos os que têm algumas publicações a respeito.

Esta pesquisa tem como principal motivação o estudo da capacidade resistente à punção na ligação laje-pilar interno com carregamento simétrico desse tipo de sistema construtivo, com a finalidade de compreender melhor o comportamento do mesmo, fundamentalmente na sua principal debilidade, que é, sem dúvida, a resistência ao cisalhamento, devido aos vazios deixados pelas esferas.

### 1.3. OBJETIVOS

A presente pesquisa tem como objetivo geral avaliar experimentalmente o comportamento à punção da ligação laje-pilar para o sistema estrutural de laje tipo *BubbleDeck*, com pilar interno à edificação e carregamento simétrico.

A posição e a distribuição da armadura de cisalhamento e a utilização de pré-laje no sistema construtivo serão parâmetros avaliados na investigação, assim como propostas de melhorias para os métodos de cálculo da resistência à punção nesse tipo de laje.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a influência da distribuição e ancoragem da armadura de cisalhamento padrão da *BubbleDeck* e a utilização ou não de pré-laje no comportamento à punção em lajes deste tipo em comparação com lajes maciças com ancoragem e distribuição especificada pelas normas.
- Comparar os resultados experimentais obtidos com as modificações sugeridas para o cálculo do perímetro crítico do ACI 318 (2011), EUROCODE 2 (2004) e a NBR 6118 (2014).

### 1.4. METODOLOGIA

No Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília (UnB) foram executadas e instrumentadas quatro lajes, sendo duas maciças e duas tipo *BubbleDeck*. Nas lajes maciças, a distribuição da armadura de punção foi do tipo em cruz, variando a utilização de pré-lajes e a ancoragem da armadura de cisalhamento. Nas lajes *BubbleDeck*, foi variada apenas a utilização de pré-laje, com a armadura de cisalhamento tendo a mesma distribuição e ancoragem para as duas lajes.

As quatro lajes possuem a mesma taxa de armadura de flexão, as cargas serão aplicadas simetricamente em oito pontos da laje até a ruptura da mesma e os resultados obtidos serão analisados quanto à deformação no aço da armadura de flexão, no aço da armadura de cisalhamento, e na superfície do concreto, deslocamentos verticais das lajes e carga última de ruptura; sendo esta última comparada com as estimadas calculadas pelas normas ACI 318 (2011), EUROCODE 2 (2004) e a NBR 6118 (2014).

Estes ensaios também fazem parte da pesquisa de doutorado de Wanderley Gustavo Nicácio que está sendo realizada na Universidade de Brasília.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os resultados experimentais e numéricos, obtidos de várias pesquisas realizadas referentes ao tema de punção em lajes lisas de concreto armado, tem sido utilizados para determinar os principais fatores que influenciam na resistência à punção em lajes lisas de concreto armado, os quais são brevemente descritos neste capítulo.

São apresentados os diferentes tipos de lajes *BubbleDeck* além de suas principais características. Pesquisas anteriores sobre o tema são apresentadas neste trabalho e as recomendações de cálculo propostas pela *BubbleDeck International* e recomendações das normas ACI 318 (2011), EUROCODE 2 (2004) e NBR 6118 (2014).

### 2.1. FENÔMENO DA PUNÇÃO

Pode-se descrever o fenômeno da punção como uma falha ou ruptura por cisalhamento, descrita por alguns autores como falhas por tração diagonal no concreto que ocorre em elementos de pequena espessura submetidos a esforços transversais concentrados de grande magnitude. A ruptura por punção está associada à formação de um tronco de cone que tende a se desligar da laje, ver Figura 2.1.

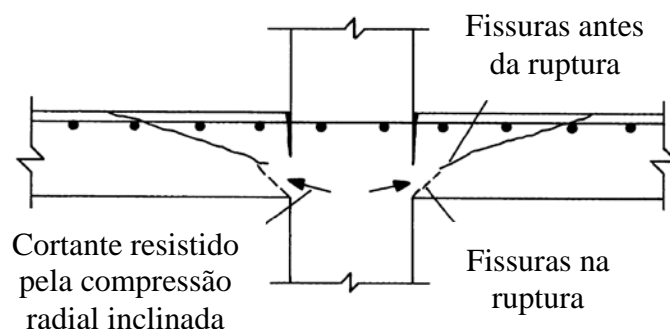


Figura 2.1 – Seção transversal. Ruptura por punção. [CEB-FIP, *Model Code* (1990)].

Este fenômeno se apresenta com frequência na ligação laje-pilar de sistemas estruturais compostos por lajes lisas, apoiadas diretamente sobre pilares, ver Figura 2.2. Na maioria dos casos onde a ruptura por punção pode ocorrer, esta resulta em uma ruptura do tipo frágil. Para minimizar este efeito na zona de reações onde as cargas concentradas são elevadas, se propõe utilizar capitéis (*capital*), ábacos (*droppanel*), ou ambos, tal como mostra a Figura 2.3, Figura 2.4 e Figura 2.5 respectivamente.

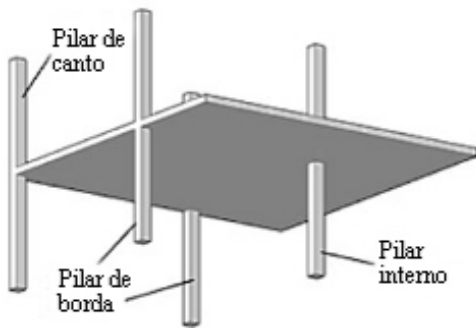


Figura 2.2 – Lajes lisas. [<http://www.estruturas.ufpr.br>]

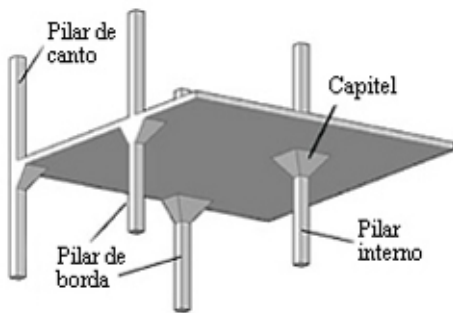


Figura 2.3 – Lajes lisas com capitel. [<http://www.estruturas.ufpr.br>]

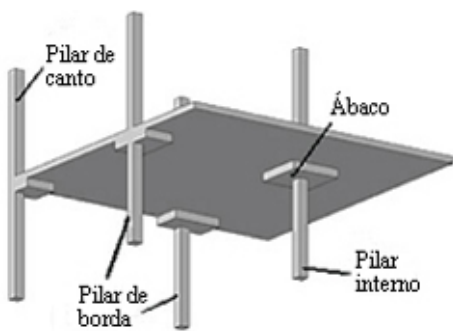


Figura 2.4 – Lajes lisas com ábaco. [<http://www.estruturas.ufpr.br>]

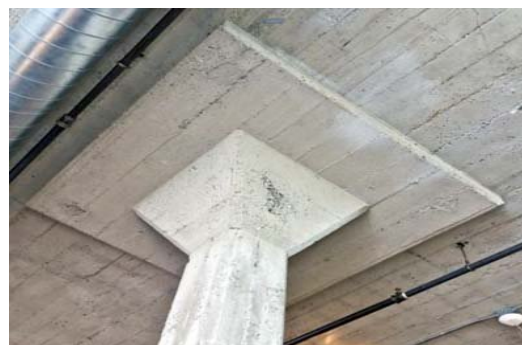
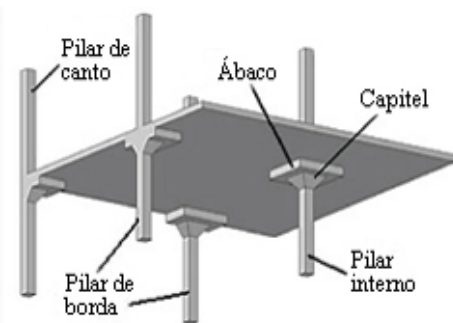


Figura 2.5 – Lajes lisas com ábaco e capitel. [<http://www.estruturas.ufpr.br>]

## 2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO

A resistência à punção em lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento é influenciada de forma geral por numerosos fatores que vem sendo estudados por diversos autores, entre os fatores encontram-se: a resistência à compressão do concreto, taxa de armadura de flexão (razão entre a área de armadura tracionada e a área de concreto), tamanho e geometria do pilar e efeito de tamanho (*size effect*), este último leva em consideração a altura útil da laje.

### 2.2.1. Resistência à compressão do concreto

É comum em todo projeto de estruturas de concreto armado, partir da resistência à compressão do concreto de cada um dos seus elementos para dimensioná-los, não é diferente para o caso de lajes submetidas a elevados esforços cisalhantes concentrados. Para se combater a ruptura por punção em lajes lisas a resistência à tração do concreto é fundamental, a qual é estimada como uma função da resistência à compressão do mesmo. Assim, a maioria dos pesquisadores correlaciona a resistência ao cisalhamento em peças de concreto com a resistência a compressão do concreto utilizado.

Segundo FERREIRA (2010), GRAF (1933) foi um dos primeiros a tentar avaliar a influência da resistência do concreto na capacidade resistente à punção, concluindo que a relação entre a resistência à punção de uma ligação laje-pilar e a resistência do concreto não é linear. O ACI apresenta nas suas expressões que a resistência à punção é uma função proporcional à raiz quadrada da resistência do concreto, expressões estas propostas por MOE (1961).

Pesquisas mais recentes como a de HALLGREN (1966), concluíram que para concretos com elevadas resistências, considerar que a relação entre a resistência à punção e a resistência à compressão do concreto sendo uma função proporcional á raiz quadrada da resistência à compressão tende a superestimar a influencia do mesmo; por este motivo o ACI limita o uso da sua expressão para concretos com resistências de até 69 MPa.

Outros pesquisadores mais recentes tais como MARZOUK e HUSSEN (1991), HAWKINS *et al.* (1974), REGAN (1986) e SHERIF e DILGER (1996) concluíram nas suas pesquisas que a raiz cúbica da resistência do concreto representa uma correlação melhor com a resistência à punção.

### 2.2.2. Taxa de Armadura de Flexão Tractionada

Define-se a taxa de armadura de flexão tracionada ( $\rho$ ) como a relação que existe entre a área de aço tracionada ( $A_s$ ) dividida pela área de concreto ( $A_c$ ), considerando esta última como o produto da altura útil da laje ( $d$ ) por uma largura determinada; como só uma determinada quantidade de barras de aço contribui efetivamente na resistência a punção, esta largura é considerada tomando a distância de  $3d$  de afastamento à cada lado da face do pilar, segundo resultados de ensaios experimentais realizados por REGAN (1986).

Estudos realizados por BROMS (2005) concluíram que a resistência à punção relaciona-se diretamente com o comportamento à flexão da laje, variando em função do escoamento ou não da armadura de flexão tracionada.

Estudos realizados por REGAN (1981) concluíram que um aumento da quantidade de armadura de flexão implica em um aumento da região comprimida de concreto, resultando em menos concreto fissurado e, por consequência, maior quantidade de concreto comprimido para resistir os esforços cisalhantes.

Depois de estudar os resultados de KINNUNEN e NYLANDER (1960), LONG (1975) concluiu que a resistência à punção em lajes é influenciada pela taxa de armadura de flexão elevada a um quarto. Entretanto, outros autores tais como REGAN e BRAESTRUP (1985) e SHERIF e DILGER (2000) expõem que a resistência à punção é influenciada pela taxa de armadura de flexão elevada a um terço.

### 2.2.3. Geometria e dimensões do pilar

A geometria e as dimensões do pilar influenciam na resistência à punção das ligações laje-pilar: quanto menor a seção transversal do pilar maior será o efeito de punção. Em seus ensaios, VANDERBILT (1972) concluiu que a concentração de tensões que aparece nas lajes nos cantos dos pilares quadrados afeta a resistência à punção das mesmas, sendo de que a distribuição de tensões uniformes que aparece em ligações com pilares circulares leva a um melhor comportamento da ligação laje-pilar, sendo maior a resistência à punção desta última que em pilares quadrados.

Para o caso de pilares retangulares pesquisas realizadas por HAWKINS *et al.* (1971) concluem que quanto maior é a razão entre os lados de um pilar, a tensão nominal de cisalhamento diminui, fundamentalmente para relações acima de dois. Esta pesquisa é a base para o cálculo do índice de retangularidade de pilares ( $\alpha_s$ ) que recomenda o ACI.

#### **2.2.4. Efeito de tamanho (*Size Effect*)**

Estimativas propostas por REGAN e BRAESTRUP (1985) e BROMS (1990) propõem uma redução da resistência nominal ao cisalhamento com o aumento da espessura da peça que poderia ser estimada como  $(1/d)^{1/3}$ .

Algumas normas como o EUROCODE 2 (2004) limitam o resultado do *size effect* ( $\xi$ ) ao máximo de 2, com a finalidade de limitar o incremento das estimativas da resistência à punção de lajes lisas com altura útil inferior a 200mm, normas tais como a NBR 6118 (2014) não limitam este valor de  $\xi$ .

#### **2.2.5. Armadura de cisalhamento**

Às vezes é indesejável o uso de ábacos ou capiteis por razões construtivas ou arquitetônicas. Nesses casos o uso de armaduras de cisalhamento é indispensável para aumentar a capacidade resistente da ligação laje-pilar e desta forma evitar a ruptura por punção; por isso, o uso de armaduras de cisalhamento tem um notável crescimento nos últimos anos.

Além das vantagens que a armadura de cisalhamento proporciona do ponto de vista arquitetônico, proporciona ductilidade à laje, o que, do ponto de vista do tipo de falha é uma grande vantagem. Segundo GOMES (1991) a capacidade resistente ao puncionamento das lajes com armadura de cisalhamento pode dobrar em comparação à mesma sem esta armadura.

Estudos realizados tem demonstrado que mesmo nas lajes com armadura de cisalhamento, a capacidade resistente encontra-se limitada pela tensão de esmagamento da biela de concreto próxima da face do pilar, o que evidencia que a capacidade resistente da ligação laje-pilar tem uma parcela associada à armadura de cisalhamento disposta na laje e outra associada ao concreto, esta última refere-se não só a biela comprimida se não também à tração diagonal.

De tal forma, nas lajes com armadura de cisalhamento, a ruptura pode ocorrer de três modos diferentes: esmagamento da biela próxima à face do pilar, esgotamento da resistência do aço das armaduras dispostas e tração diagonal do concreto na região das armaduras de cisalhamento, ou por tração diagonal do concreto fora das armaduras dispostas. A Figura 2.6 mostra os três tipos de ruptura.



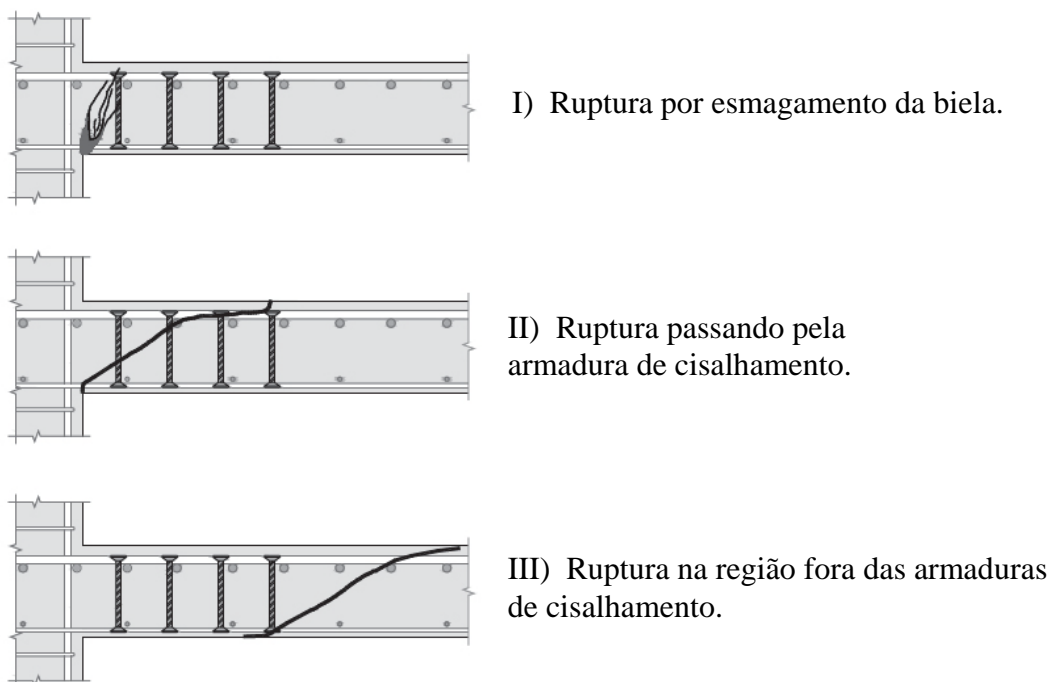


Figura 2.6 – Tipos de ruptura à punção em lajes com armadura de cisalhamento.  
[FERREIRA (2010)]

Na Figura 2.7 são mostrados alguns tipos de armaduras de cisalhamento utilizadas no combate da punção em lajes lisas de concreto armado e na Figura 2.8 e Figura 2.9 são ilustrados os dois tipos de arranjos mais utilizados para dispor a armadura de cisalhamento na laje ao redor das ligações laje-pilar.

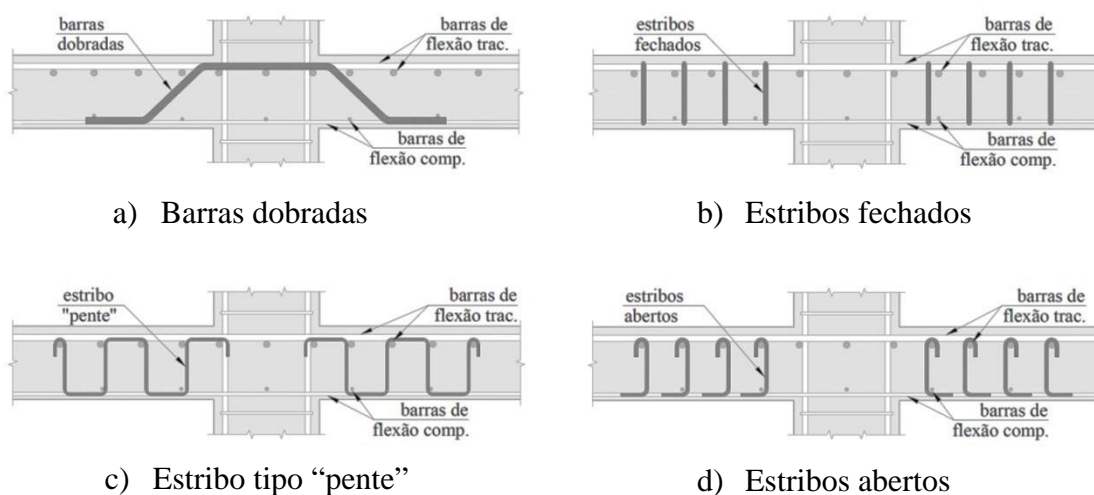
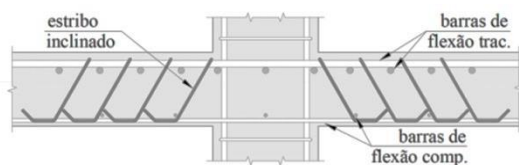
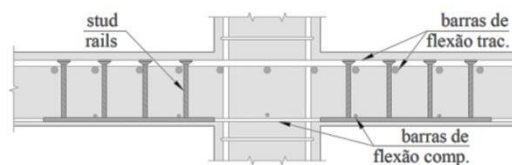


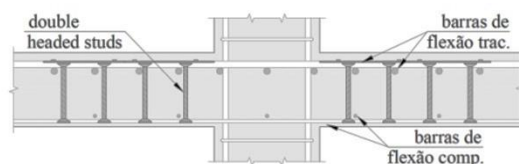
Figura 2.7 – Armaduras de cisalhamento para o combate à punção. [FERREIRA (2010)]



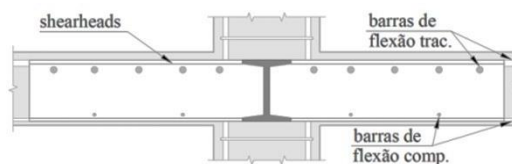
e) Estribo inclinado



f) *Single-headed studs on rails*



g) *Double-headed studs*



h) *Shearheads*

Figura 2.7 – Armaduras de cisalhamento para o combate à punção.

[FERREIRA 2010)], continuação

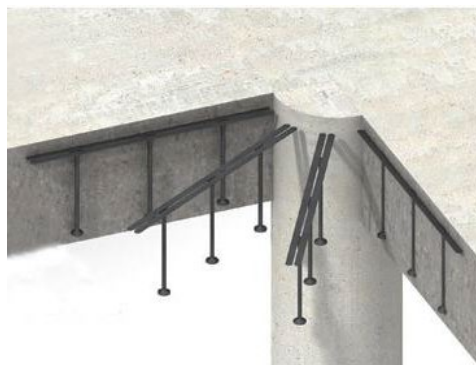
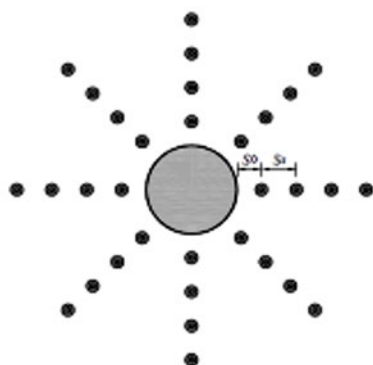


Figura 2.8 – Distribuição radial. [<http://www.barbourproductsearch.info>]

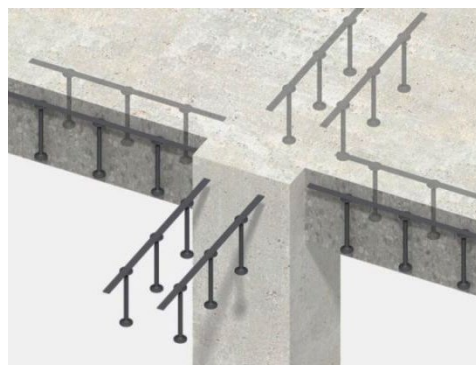
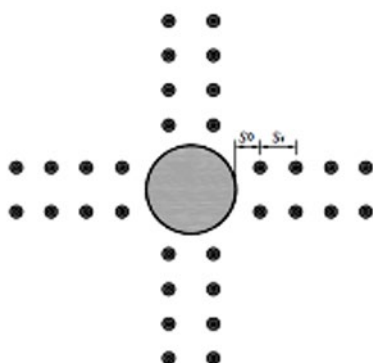


Figura 2.9 – Distribuição em cruz. [<http://www.ancon.com.au>]

## 2.3. LAJE *BUBBLEDECK* – CONCEITO E SISTEMAS CONSTRUTIVOS

As lajes *BubbleDeck* constituem uma solução de engenharia inovadora, que melhora em grande medida o design e velocidade de execução no processo de construção de uma edificação, ao mesmo tempo em que reduz o custo total da obra.

O conceito é eliminar quase totalmente o concreto existente no meio da laje, o qual é desprezado no dimensionamento, implicando uma redução no consumo de concreto de até 35%, gerando uma redução nos custos deste material, além de utilizar como novo material, esferas de polipropileno de alta densidade no seu interior, o qual pode reduzir de forma considerável o impacto ambiental no processo de construção, ver Figura 2.10.

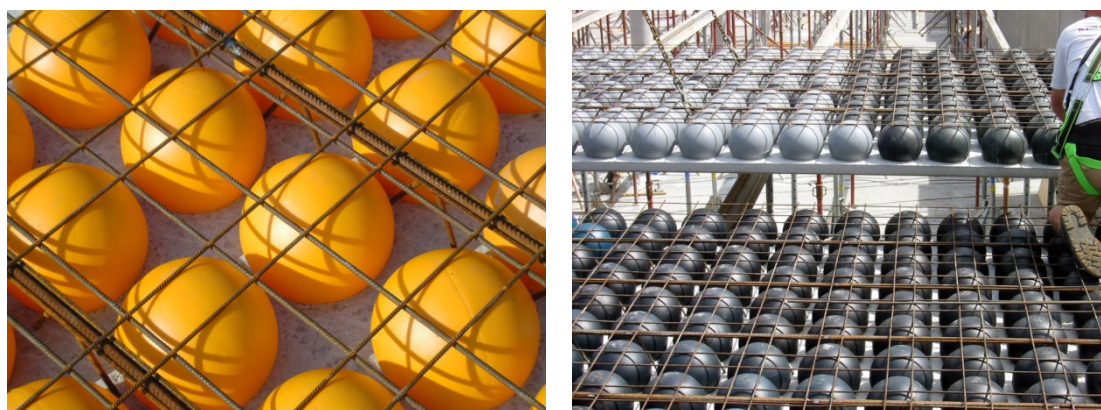


Figura 2.10 – Sistema de lajes tipo *BubbleDeck*. [<http://www.bubbledeck.com.br>]

O mesmo apresenta-se em três variantes, a primeira é o módulo com pré-laje, a segunda é o módulo reforçado e a terceira é o sistema com painéis acabados.

### 2.3.1. Módulo com pré-laje

Consiste em painéis, compostos de esferas com uma tela superior e inferior espaçadas uniformemente, cuja zona inferior contém uma laje pré-moldada de 60 mm de espessura, tal como mostra a Figura 2.11.

A presença das pré-lajes dispensam a utilização de formas, colocando-se as lajes sobre vigas metálicas e escoras temporárias, o qual reduz os custos da obra, ver Figura 2.12.



Figura 2.11 – Módulo com pré-laje. [<http://www.bubbledeck.com.br>]



Figura 2.12 – Módulo com pré-laje, dispensando o uso de formas inferiores.  
[<http://www.bubbledeck.com.br>]

Uma vez colocados no painel às armaduras de reforço negativo, de cisalhamento e de ligação entre painéis, em função dos requisitos de projeto, é concluída a concretagem da laje, conforme na Figura 2.13 e Figura 2.14.



Figura 2.13 – Colocação das armaduras. [<http://www.bubbledeck.com.br>]



Figura 2.14 – Concretagem final da laje. [<http://www.bubbledeck.com.br>]

### 2.3.2. Módulo reforçado

O módulo consiste em duas telas de aço com as esferas no seu interior, o qual é posicionado em formas tradicionais onde são colocados posteriormente os reforços requeridos de projeto (flexão, cisalhamento ou armaduras de ligação entre painéis), ver Figura 2.15.

A concretagem é realizada em duas etapas, sendo a primeira de uma camada com 60 mm, e logo em seguida é concluída a concretagem, assim como nas pré-lajes.

A vantagem desta variante de laje *BubbleDeck* é o baixo peso que apresenta, os módulos podem ser carregados manualmente, permitindo ser colocados em locais de difícil acesso, oferecendo maiores possibilidades para reformas em edifícios.



Figura 2.15 – Variante modulo reforçado. [<http://www.bubbledeck.com.br>]

### 2.3.3. Módulo acabado

Nessa variante a laje sai pronta da fábrica para ser colocada na obra, os processos construtivos de colocação de armadura e concretagem são feitos todos nas plantas de pré-fabricado.

Este tipo de lajes trabalha em apenas uma direção e, portanto precisa ser apoiada em vigas ou paredes da estrutura. Um exemplo deste tipo de painéis pode ser visualizado na Figura 2.16.

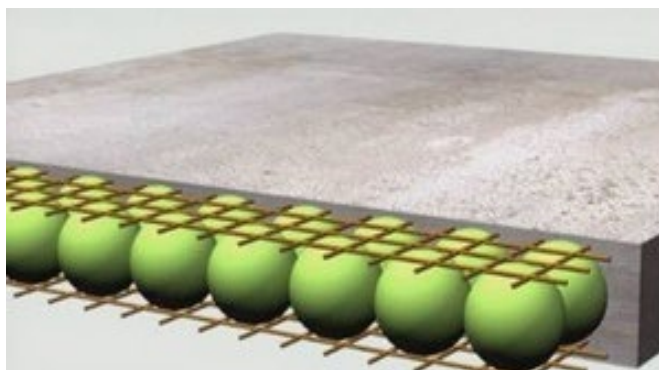


Figura 2.16 – Variante modulo acabado. [<http://www.bubbledeck.com.br>]

## 2.4. RECOMENDAÇÕES DE CÁLCULO DA *BUBBLEDECK INTERNATIONAL*

De acordo com a *BubbleDeck International* a laje *BubbleDeck*, para fins de cálculo, pode ser considerada como uma laje maciça; a forma esférica nos vazios de concreto permite que as forças se transfiram livremente dentro da laje de forma homogênea. Por tal motivo, a laje *BubbleDeck* pode ser calculada tal qual uma laje maciça, utilizando os mesmos métodos de cálculo.

Para o pré-dimensionamento de elementos estruturais que contém lajes desse tipo, o peso próprio das mesmas deve ser reduzido em aproximadamente um terço se comparado com uma laje maciça de mesma espessura. O peso é aproximadamente 65% da laje maciça de mesma espessura.

No estado limite de serviço, a rigidez à flexão  $EI$  deve ser diminuída em 10%, em relação a uma laje maciça da mesma altura e a resistência ao cisalhamento deve ser reduzida em 40%.

Nos casos práticos, se existirem áreas com forças cisalhantes ou forças pontuais muito altas, as esferas seriam removidas dessas zonas, mantendo-as sólidas, e conforme a necessidade reforçar com armadura de cisalhamento, como por exemplo, na zona próxima dos pilares.

## 2.5. PESQUISAS NO MUNDO E NO BRASIL COM LAJES *BUBBLEDECK*

### 2.5.1. HELD (2002) COMPORTAMENTO À PUNÇÃO DE LAJES COM VAZIOS TRABALHANDO EM DUAS DIREÇÕES

Para investigar a influencia a punção dos vazios no concreto, foram realizados testes no Instituto para estruturas de concreto em Darmstadt na Alemanha, além de uma posterior análise não linear utilizando o método dos elementos finitos, permitindo estudos paramétricos com o fim de obter uma melhor compreensão do comportamento estrutural.

Além da importância de conhecer o valor absoluto da resistência à punção, um dos questionamentos principais antes do início dos testes era se o comportamento a punção e o modo de ruptura da laje tipo *BubbleDeck* seria ou não similar a de uma laje maciça.

Para a análise experimental das lajes tipo *BubbleDeck* foram feitas três lajes de 23 cm e três lajes de 45 cm de espessura para analisar a resistência à punção. Foram escolhidos esses dois valores de espessura para analisar uma possível influencia do efeito de tamanho (Size Effect), ver Figura 2.17 e Figura 2.18.

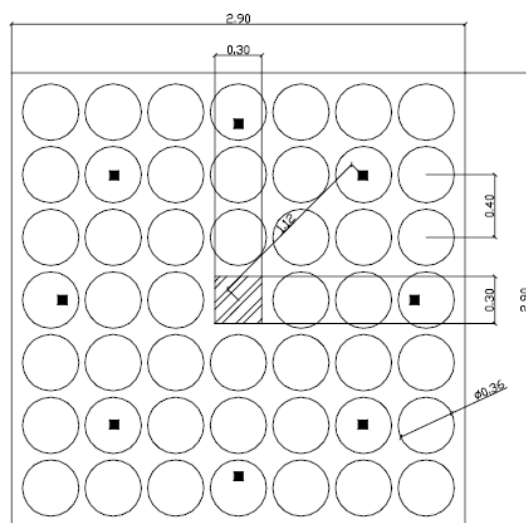


Figura 2.17 – Lajes analisadas com 45 cm de espessura, vista em planta, [HELD (2002)]

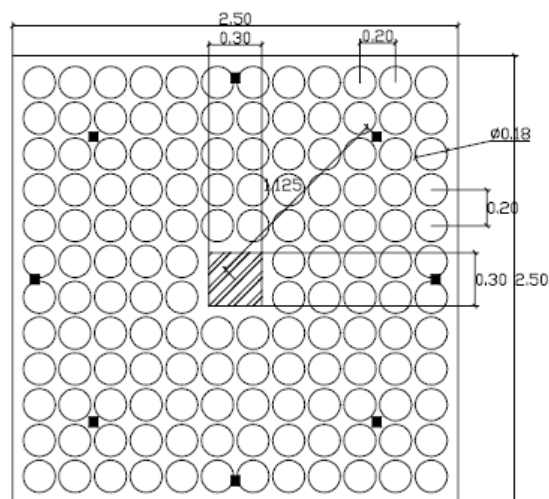


Figura 2.18 – Lajes analisadas com 23 cm de espessura, vista em planta, [HELD (2002)]

A tabela 2.1 apresenta um resumo das lajes ensaiadas.

Tabela 2.1 – Cargas últimas de punção, HELD (2002).

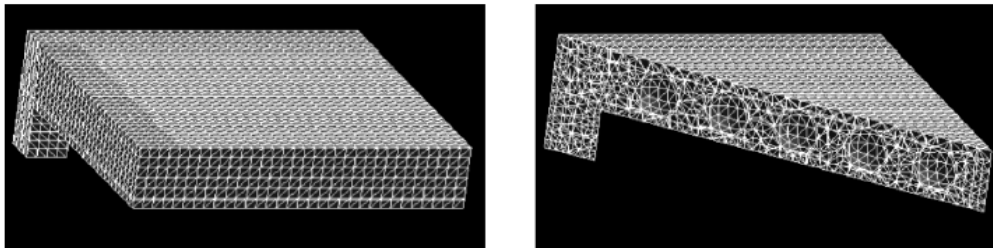
Modelos	$A_{S_{sup}}$ ( $cm^2/m$ )	$A_{S_{inf}}$ ( $cm^2/m$ )	$f'_{c,150}$ (MPa)	$f'_{c,t}$ (MPa)	<i>BubbleDeck</i> Carga última (kN) (teste)	Laje maciça Carga última (kN) (calculada)*	Razão entre <i>BubbleDeck</i> e Laje Maciça (%)
D1-23	34,25	11,31	44,4	2,8	520	840	61,9
D2-23	34,25	11,31	50,8	2,5	580	945	61,4
D3-23	34,25	11,31	46,7	2,9	525	893	58,8
D4-45	40,29	15,71	29,6	2,9	935	1503	62,2
D5-45	40,29	15,71	37,9	2,1	990	1701	58,2
D6-45	40,29	15,71	40,5	3,0	1180	1795	65,7

\* De acordo com a norma DIN 1045.

Após as lajes serem ensaiadas, foi feito um corte das mesmas pelo eixo médio, verificando-se que os vazios deixados pelas esferas plásticas não influenciou no modo de ruptura em comparação com uma laje maciça. Como esperado a resistência à punção dessas lajes foi menor que a estimada para a laje maciça da mesma espessura, tal como mostra a Tabela 2.1.

Com a finalidade de comparar os resultados obtidos da análise experimental, a autora realizou um extenso trabalho numérico, utilizando o software DIANA (Elementos Finitos) para modelar as lajes ensaiadas.





Vista frontal

Seção transversal

Figura 2.19 – Malha de elementos finitos. [HELD (2002)]

A autora comparou os resultados obtidos da análise experimental com os resultados obtidos da análise numérica, comparando entre outros resultados, as curvas de comportamento carga-deslocamento e o padrão de fissuras, tal como se mostra na Figura 2.20 e Figura 2.21 respetivamente.

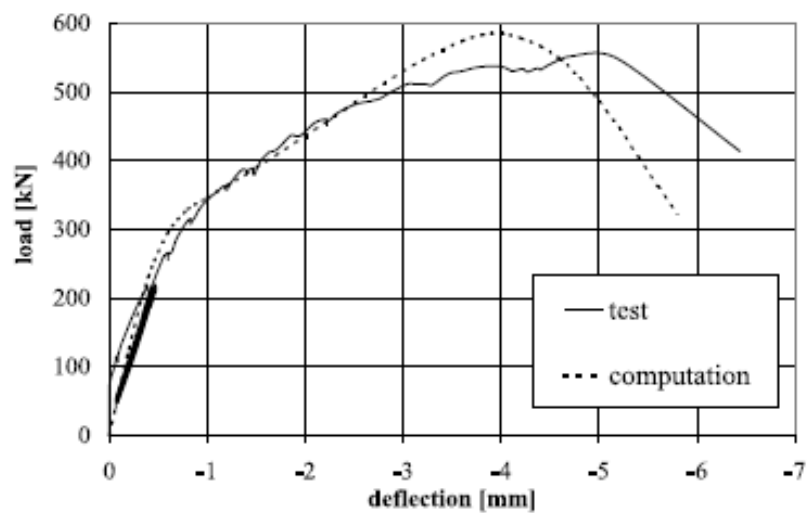
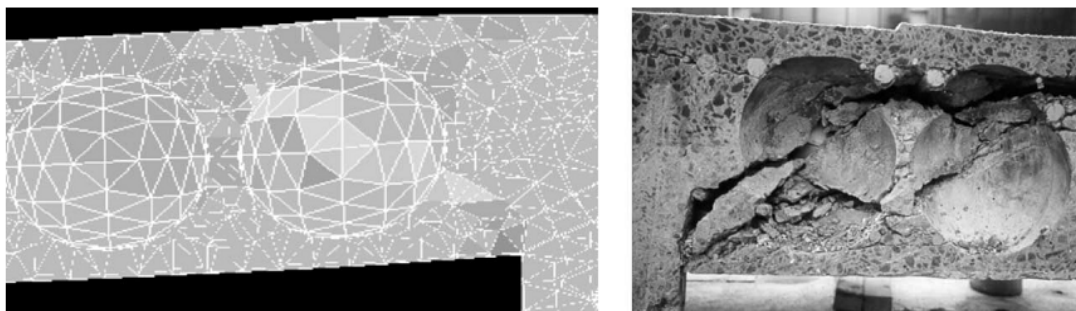


Figura 2.20 – Diagrama carga - deslocamento da análise computacional e do teste [HELD (2002)]



Análise computacional.

Análise experimental.

Figura 2.21 – Comparação do padrão de fissuração. [HELD (2002)]

Depois de ter realizado as comparações dos resultados experimentais e numéricos, a autora conclui que o modo de ruptura das lajes tipo *BubbleDeck* é similar ao das lajes maciças, definindo que para o cálculo da resistência à punção da primeira, caso existam vazios entre a face do pilar e o perímetro crítico, deve-se descontar a área correspondente ao vazio deixado pela esfera passando pelo plano cisalhado considerado nos cálculos; caso não sejam colocadas esferas nesta zona o cálculo é feito da mesma maneira que para uma laje maciça.

### **2.5.2. ALDEJOHANN (2008) COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO DE LAJES COM VAZIOS EM DUAS DIREÇÕES**

O critério proposto pela *BubbleDeck International* para calcular a resistência à punção em lajes desse sistema, é diminuir em 40% sua resistência se comparada com uma laje maciça de mesma altura.

Segundo a investigação realizada por Aldejohann (2008), o mesmo propôs modificações nas formulações propostas pela normativa alemã DIN 1045-1, com a finalidade de validar esse fator de redução de 40% proposto pela *BubbleDeck International*.

Sendo a resistência ao cisalhamento da laje tipo *BubbleDeck*, uma função, entre outros fatores, da área maciça de uma laje de mesma espessura; e o fator  $k$  proposto pelo autor, uma função da relação que existe entre o cobrimento dos vazios e a posição do eixo neutro. A resistência ao cisalhamento será determinada pela Equação 2.1.

$$V_{Rd,com\ vazios} = k \cdot \left( \frac{A_{DG}}{A_{SOL}} \right) \cdot V_{Rd,maciça} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

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

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

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

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

Sendo:

$$k = 1,16 - \frac{C_o}{x} \cdot 0,03, \quad \text{para } 0,90 < \frac{C_o}{x} \leq 1,2 \quad \text{Equação 2.2}$$

ou

$$k = 0,80 + \frac{C_o}{x} \cdot 0,40, \quad \text{para } \frac{C_o}{x} \leq 0,90 \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde:

$C_o$ : Cobrimento da região com vazios;

$x$ : Posição da linha neutra de flexão.

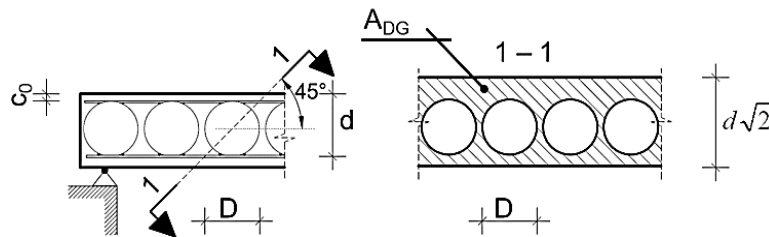


Figura 2.22 – Características da seção proposta. [ALDEJOHANN (2008)]

Culminados os estudos pelo autor na área experimental, concluiu que as suas formulações matemáticas propostas eram corretas para a determinação da resistência a cisalhamento em lajes com vazios esféricos internos.

### 2.5.3. LAI (2010) COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LAJES TIPO *BUBBLEDECK*.

Com o fim de compreender pesquisas anteriores relacionadas com lajes do tipo *BubbleDeck*, a autora focou a sua pesquisa na comparação de comportamento de lajes tipo *BubbleDeck* e maciças, realizando um análise estática e dinâmica em ambas as lajes, sendo o caso de estudo uma laje de escritório.

A autora utilizou para a análise o programa SAP 2000, onde modelou para o caso da laje plana de escritório, uma laje sólida e outra de tipo *BubbleDeck* em 3D, com as mesmas dimensões e trabalhando nas duas direções, tal como se mostra na Figura 2.23.

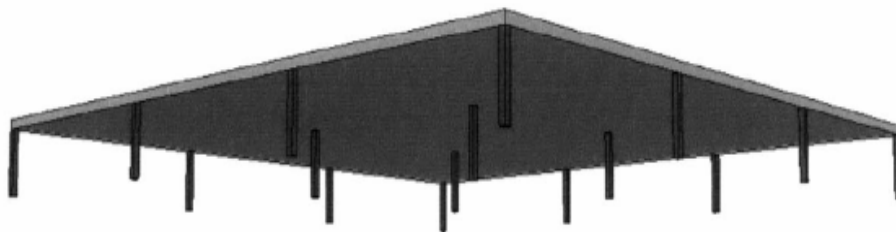


Figura 2.23 – Esquema da laje de escritório analisada. [LAI (2010)]

Ambos modelos foram submetidos a um carregamento de  $4,8 \text{ kN/m}^2$  de sobrecarga além de seu peso próprio para análise estática e dinâmica.

Os resultados das análises mostram-se na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Comparação da resposta estática da laje de escritório, LAI (2010).

RESPOSTA ESTÁTICA. LAJE DE ESCRITÓRIO									
	M11	M22	M12	V13	V23	S11(SUP)	S22(SUP)	S12(SUP)	U3
	(lb-in/in)	(lb-in/in)	(lb-in/in)	(lb/in)	(lb/in)	lb/(in <sup>2</sup> )	lb/(in <sup>2</sup> )	lb/(in <sup>2</sup> )	(in)
<b>Laje Maciça</b>	203850	203879	37446	12327	12321	3882	3883	713	0.746
<b>Laje BubbleDeck</b>	134554	134567	22365	7479	7479	2562	2563	508	0.821
<b>% de diferença</b>	34%	34%	40%	39%	39%	34%	34%	29%	10%

Os resultados obtidos no programa SAP 2000 mostram que os momentos máximos, forças cisalhantes e tensões no plano na laje *BubbleDeck* são menores entre 30% e 40% comparados com a laje maciça sob as mesmas condições; o qual é consequência do menor peso próprio da laje *BubbleDeck* devido a presença das esferas.

Porém, os deslocamentos da laje *BubbleDeck* são aproximadamente da ordem de 10% maiores que da laje maciça devido à rigidez reduzida desta laje. Os resultados obtidos eram os esperados pela autora, investigações anteriores teriam sugerido aplicar um fator de redução de 0.9 para calcular as flechas para compensar esse efeito.

No caso da análise dinâmica as respostas das lajes foram praticamente iguais, tal como se mostra na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Comparação da resposta modal da laje de escritório LAI (2010)

<b>RESPOSTA MODAL - LAJE DE ESCRITÓRIO</b>				
<b>MODO</b>	<b>LAJE MACIÇA</b>		<b>LAJE BUBBLEDECK</b>	
	<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Período (s)</b>	<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Período (s)</b>
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

Esta investigação ratifica que a tecnologia *BubbleDeck* é mais eficiente que a laje de concreto maciça no caso de sistema de pisos para escritório, pois os resultados de ambas análises são semelhantes para ambos tipos de lajes, destacando a economia considerável de 30% de concreto ao se utilizar a laje *BubbleDeck*.

#### **2.5.4. LIMA (2015) ANÁLISE EXPERIMENTAL À PUNÇÃO DE LAJES LISAS TIPO BUBBLEDECK**

Para o estudo o *Autor* propõe a confecção de quatro modelos de lajes, três de tipo *BubbleDeck* e uma maciça de referência. As mesmas possuem dimensões de 2500x2500 mm de comprimento, altura de 280 mm, mesma taxa de armadura e todas apoiadas em pilares circulares de 300 mm de diâmetro, tal como se mostra na Figura 2.24.

Os parâmetros variados na análise foram a utilização ou não de armadura de cisalhamento e a utilização ou não de pré-laje. A Tabela 2.4 mostra a descrição das lajes ensaiadas à punção.

Tabela 2.4 – Descrição das lajes ensaiadas à punção, LIMA (2015)

Laje	Altura total (mm)	Tipo	Pré-laje	Armadura de cisalhamento	Distribuição das armaduras de cisalhamento	Estribo ancorado
RSP	280	Maciça	Não	Não	-	-
BD28-P1	280	<i>BubbleDeck</i>	Não	Não	-	-
BD28-P2	280	<i>BubbleDeck</i>	Sim	Não	-	-
BD28-P3	280	<i>BubbleDeck</i>	Sim	Estribo	Padrão <i>BubbleDeck</i>	Não

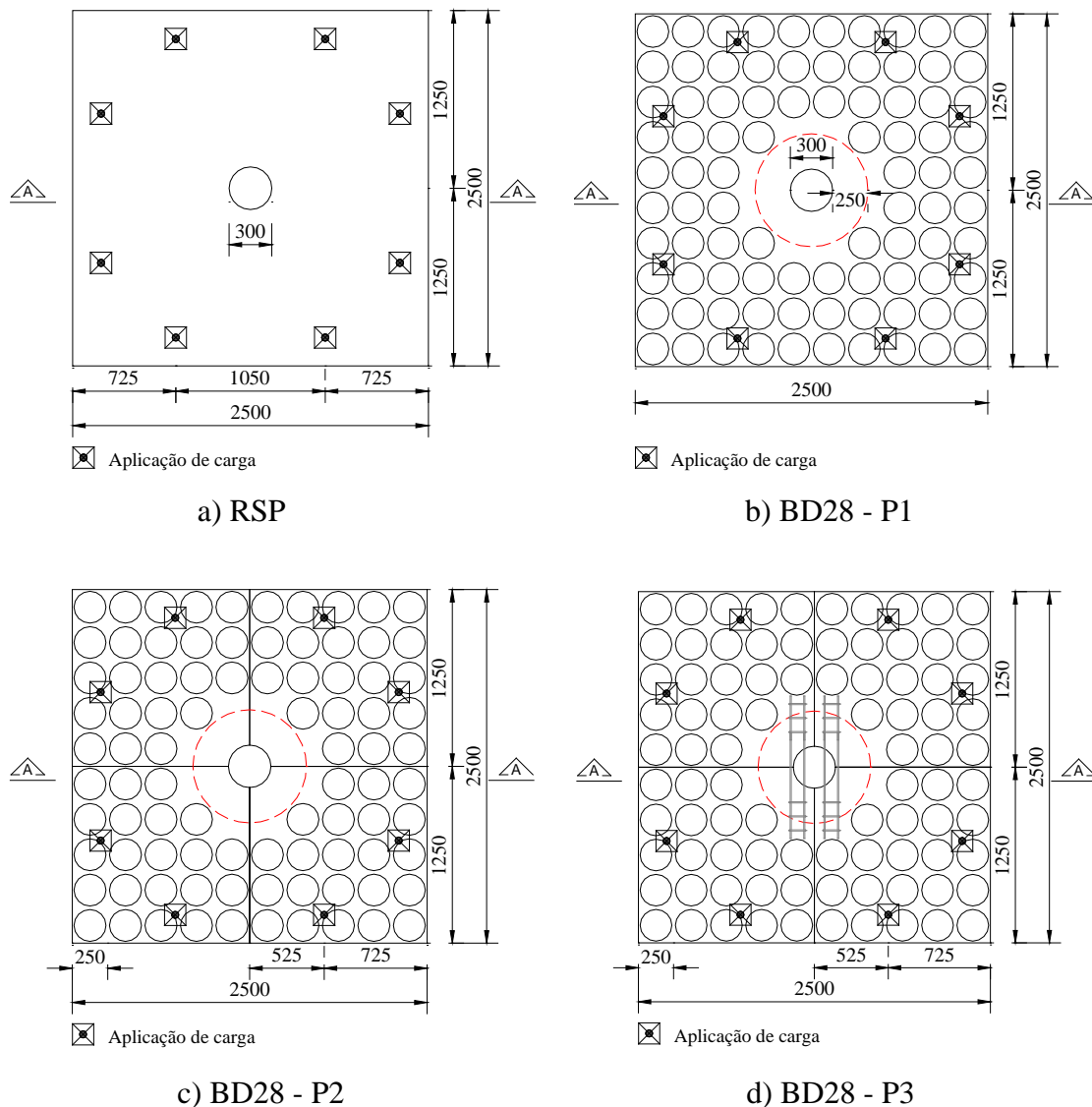


Figura 2.24 – Dimensões das lajes ensaiadas. [LIMA (2015)]

A armação das lajes foi composta por duas malhas de aço, a malha superior confeccionada com barras de 6,0 mm de diâmetro e a malha inferior com barras de 8,0 mm de diâmetro, ambas com aço CA60 e igual espaçamento variando entre 100 mm e 150 mm.

A armadura de flexão principal considerada nos cálculos foi feita com barras de 12,5 mm e aço CA50 com espaçamento variando entre 100 mm e 150 mm de igual forma que as telas de aço de 6 mm e 8 mm. Nas bordas das lajes foram colocados ganchos de 12,5 mm de diâmetro para ancorar a armadura de flexão.

Para unir os painéis de lajes pré-moldados no caso das lajes BD28-P2 e BD-28-P3 foram utilizadas barras de 10 mm de diâmetro.

Para a armadura de cisalhamento foram utilizados estribos fechados de 6,3 mm de diâmetro e aço CA50 para sua confecção, as armaduras de cisalhamento que seriam colocadas nas lajes adotaram o padrão sugerido pela *BubbleDeck International*.

Os estribos foram separados a cada 100 mm da face do pilar e entre eles, a armadura de cisalhamento a cada lado do pilar disposta numa só direção consta de seis estribos com uma área total de 249,4 mm<sup>2</sup>, detalhes da mesma mostra-se na Figura 2.25.

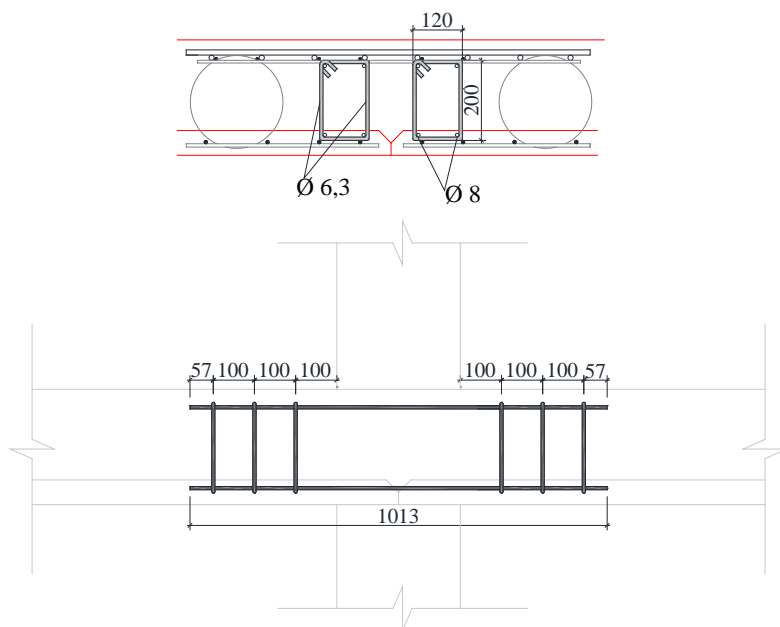


Figura 2.25 – Detalhe da armadura de cisalhamento (medidas em mm). [LIMA (2015)]

Para medir os deslocamentos verticais experimentados pelas lajes durante os ensaios foram utilizados LVDT's (transdutores de variação de deslocamento linear), colocados em 12 pontos diferentes nas lajes durante os ensaios.

Com a finalidade de interpretar corretamente os resultados obtidos no comportamento das lajes durante o ensaio foram colocados extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*), em diferentes pontos das armaduras tanto de flexão como de cisalhamento, esta última só presente na laje BD28 - P3.

Também foram colocados extensômetros na superfície do concreto na zona próxima do pilar, donde se esperaram encontrar as maiores deformações do concreto; foi locado um total de quatro extensômetros, dois para medir as deformações radiais e dois para as tangenciais.

Feitos os ensaios, LIMA (2015) concluiu que todas as lajes ensaiadas romperam por punção, baseado nos critérios da formação do cone de ruptura e de acordo com a avaliação das cargas de ruptura experimentais e as cargas estimadas de ruptura por punção e flexão.

Na Tabela 2.5 mostram-se os valores de cargas últimas e a resistência à flexão das lajes ensaiadas, a porcentagem de redução das cargas de ruptura das lajes *BubbleDeck* comparadas com a laje maciça de referencia, que variou de 19% a 25% para as lajes BD28- P3 e BD28- P1, respectivamente.

Tabela 2.5 – Cargas de ruptura, LIMA (2015)

Lajes	$\rho$	$V_{flex}$	$V_u$	$V_u/V_{flex}$	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:

$\rho$ : Taxa de armadura de flexão,

$V_{flex}$ : Carga estimada de ruptura por flexão,

$V_u$  : Carga de ruptura experimental da laje.



Nota-se nos resultados que para o caso das lajes sem armadura de cisalhamento BD28-P1 e BD28-P2, os resultados de resistência ao cisalhamento obtidos experimentalmente são praticamente os mesmos, o qual evidencia que o uso ou não de pré-laje não influencia na resistência a punção das lajes.

Pode-se observar também que a carga atingida pela laje BD28-P3 foi de 7% a 9% superior que das outras lajes *BubbleDeck*. A diferença na resistência para a laje BD28-P3 com armadura de cisalhamento não teve um acréscimo representativo de resistência em relação às lajes *BubbleDeck* sem essa armadura, o qual, segundo o autor, pode-se atribuir à disposição destas armaduras, que foram distribuídas em apenas uma direção da laje.

A outra causa a qual o autor atribui essa possível pequena diferença na resistência a cisalhamento pode-se atribuir ao fato dos estribos não serem ancorados nas barras da armadura de flexão principal, ver Figura 2.26.

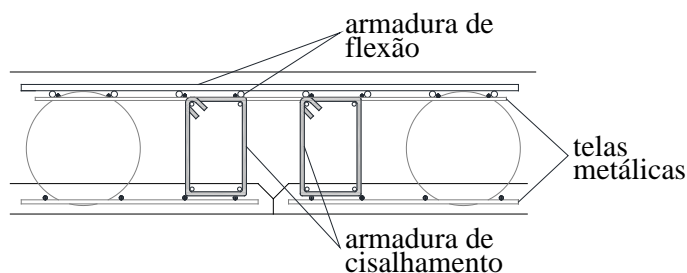


Figura 2.26 – Posicionamento da armadura de cisalhamento, em corte, na laje.

[LIMA (2015)]

Vale a pena ressaltar para o caso de comparação da laje maciça com a laje *BubbleDeck*, a maior diferença na resistência foi de 25% referente à laje BD28-P1, o qual se enquadra dentro das recomendações propostas pela *BubbleDeck International*.

Em relação aos deslocamentos verticais, ao comparar-se as lajes BD28-P1 e BD28-P2, o autor conclui que o deslocamento médio das duas lajes é bem semelhante, o qual prova que o método construtivo não influenciou na rigidez dos modelos.

No caso da laje *BubbleDeck* com armadura de cisalhamento, os deslocamentos medidos foram um pouco maiores comparados com as restantes lajes, destacando o fato de como a quantidade de armadura de cisalhamento influencia na ductilidade da laje; porém para a área de armadura de cisalhamento utilizada de  $249 \text{ mm}^2$  o aumento da capacidade resistente não foi considerável.

Como esperado, a laje maciça (RSP) teve um comportamento mais rígido, devido a não presença dos vazios esféricos no interior da mesma na zona perto da ligação laje-pilar.

Foi feita pelo autor uma comparação entre a carga última experimental e a estimada pelas normas, obtendo como resumo o diagrama mostrado na Figura 2.27. Devido ao fato da normativa ACI 318 (2011) onde o perímetro crítico encontrar-se afastado a  $0.5d$  da face o pilar, ao ser analisados os resultados obtidos, verifica-se que os valores de resistência ao cisalhamento calculados, tendem a superestimar a capacidade resistente da ligação laje-pilar, devido ao fato de que o perímetro crítico se encontra limitado à zona do maciço de concreto, o qual não passa pelas esferas, e, portanto, desconsiderando os vazios deixados pelas mesmas. Para o caso das normativas NBR 6118 (2014) e EUROCODE 2 (2004) os resultados obtidos mostram-se satisfatórios para a determinação das cargas de ruptura das lajes, sendo estas a favor da segurança.

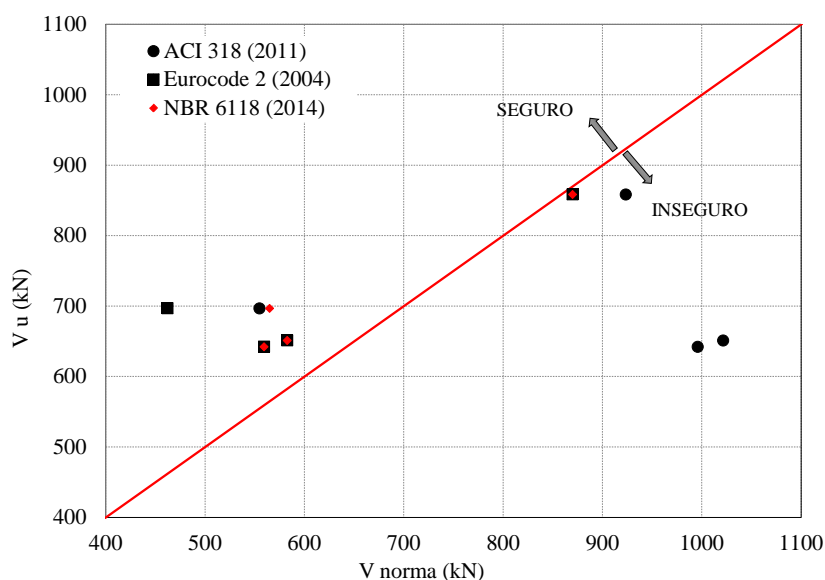


Figura 2.27 – Comparação entre a carga última experimental e a estimada pelas normas, [LIMA (2015)]

## 2.6. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO

Nesta seção são apresentadas as diferentes formas que as normas ACI 318 (2011), EUROCODE 2 (2004) e NBR 6118 (2014) abordam o tema da punção em ligações laje-pilar interiores à edificação. Cada uma delas tem expressões diferentes para estimar a resistência à punção em lajes com e sem armadura de cisalhamento.

De forma geral, a resistência à punção determinada por cada uma das normas se reduz ao cálculo de uma força resistente pelo concreto, à qual envolve a multiplicação da tensão resistente do concreto em questão pelo perímetro crítico o qual varia de uma norma para a outra, e pela altura útil da laje, tal como mostrado na Equação 2.4.

$$V_c = \sigma \cdot u \cdot d \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde:

$V_c$ : Força resistente ao cisalhamento na ligação laje-pilar provida pelo concreto;

$\sigma$ : Tensão resistente ao cisalhamento do concreto (é função de cada norma);

$u$ : Perímetro crítico para lajes sem armadura de cisalhamento. (é função de cada norma),

$d$ : Altura útil da laje na região do perímetro crítico.

A força resistente mencionada anteriormente é válida para o caso de ligações laje-pilar sem armadura de cisalhamento. Já para o caso de lajes com armadura de cisalhamento a resistência da ligação é favorecida pela parcela resistente do aço transversal, cujo valor varia de uma norma para outra, assim como a parcela de resistência do concreto, como já mencionado anteriormente.

Neste segundo caso onde o aço transversal é disposto para o combate da punção, deve ser verificada a ruptura passando pela região das armaduras transversais, e ruptura fora desta região. No caso desta última, a verificação é feita utilizando as mesmas expressões que para a verificação sem armadura de cisalhamento, variando apenas o perímetro crítico o qual se encontrará fora da região com armadura de cisalhamento.

Desta forma a força resistente total da ligação laje-pilar é composta pela soma das parcelas de armadura de cisalhamento e do concreto, tal como mostrado na Equação 2.5.

$$V_T = V_C + V_S$$

Equação 2.5

Onde:

$V_T$ : Força resistente ao cisalhamento na ligação laje-pilar com armadura de punção,

$V_C$ : Parcela de resistência correspondente ao concreto,

$V_S$ : Parcela de resistência correspondente à armadura de cisalhamento.

### 2.6.1. ACI 318 (2011)

A norma ACI 318 (2011) sugere que seja adotado o menor de três valores de resistências para o caso de lajes sem armadura de cisalhamento, ver Equações 2.6, 2.7 e 2.8. Para esta norma, o perímetro crítico encontra-se localizado a uma distância  $d/2$  da face do pilar, ver Figura 2.28, onde  $d$  é a altura útil da laje.

$$V_C = 0,17 \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \quad \text{Equação 2.6}$$

$$V_C = 0,083 \cdot \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{b_0} + 2\right) \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \quad \text{Equação 2.7}$$

$$V_C = 0,33 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \quad \text{Equação 2.8}$$

Onde:

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

$\lambda$ : É uma função da densidade do concreto (com valor 1 para concretos de peso normal);

$f'_c$ : Resistência à compressão especificada do concreto, com ( $f'_c \leq 69 \text{ MPa}$ ),

$b_0$ : Comprimento do perímetro crítico afastado  $d/2$  da face do pilar,

$\alpha_s$ : Valor que leva em consideração se o pilar é interior, de borda ou de canto. (Com valores de 40, 30 e 20 respectivamente),

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

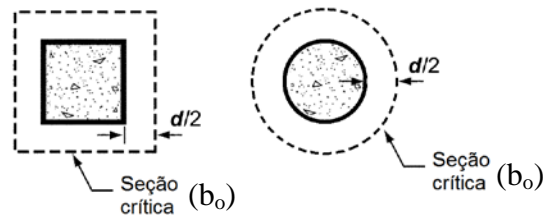


Figura 2.28 – Perímetro crítico ( $b_o$ ) segundo ACI 318 (2011)  
para lajes sem armadura de cisalhamento

Para o caso de lajes com armadura de cisalhamento a força resistente total da ligação laje-pilar ( $V_T$ ) é calculada assumindo o caráter aditivo das parcelas de concreto ( $V_C$ ) e armadura de cisalhamento ( $V_S$ ), conforme a Equação 2.9. A capacidade resistente ( $V_{int}$ ) na zona entre a face do pilar e a armadura de cisalhamento, produto de esmagamento da biela, é determinada segundo a Equação 2.10. Para o cálculo da força resistente dentro da região reforçada ( $V_{TCS}$ ), esta normativa propõe utilizar a Equação 2.11. Como terceiro possível caso de ruptura, para o cálculo da capacidade resistente fora da região das armaduras de cisalhamento ( $V_{out}$ ) utiliza-se a Equação 2.12, ressaltando que o perímetro crítico ( $b_{o_{out}}$ ) é determinado conforme mostra a Figura 2.29.

$$V_T = V_C + V_S \quad \text{Equação 2.9}$$

$$V_{int} = 0,50 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_o \cdot d \quad \text{Equação 2.10}$$

$$V_{TCS} = (0,17 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_o \cdot d) + \left( \frac{d}{S_r} \cdot A_{st} \cdot f_{yt} \right) \quad \text{Equação 2.11}$$

$$V_{out} = 0,17 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_{o_{out}} \cdot d \quad \text{Equação 2.12}$$

Onde:

$S_r$ : Distância entre as camadas de armadura de cisalhamento. Destacando que o número de camadas totais deve ser maior ou pelo menos igual a  $d/S_r$ ,

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

$f_{y,t}$ : Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento, com ( $f_{y,t} \leq 420$  Mpa),

$b_{o_{out}}$ : Comprimento do perímetro crítico externo afastado a uma distância  $d/2$  da última camada de armadura de cisalhamento disposta, ver Figura 2.29.

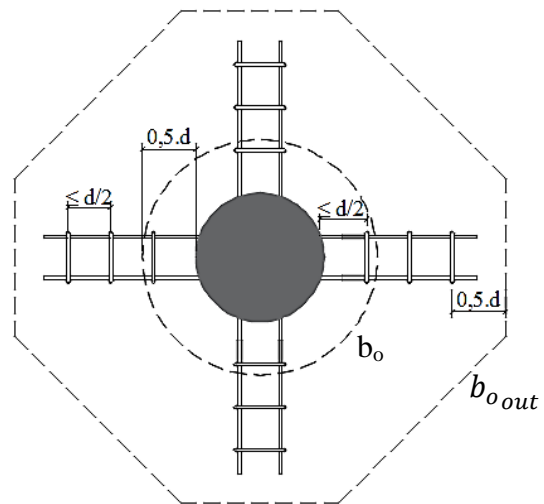


Figura 2.29 – Perímetro crítico ( $b_{o\ out}$ ) segundo ACI 318 (2011)  
para lajes com armadura de cisalhamento

## 2.6.2. EUROCODE 2 (2004)

A diferença entre a norma americana ACI 318 (2011), e a norma europeia para estruturas de concreto, é que esta última leva em consideração a taxa de armadura de flexão tracionada e o efeito de tamanho (*size effect*) para o cálculo da resistência à punção, além de um comportamento um tanto diferente para avaliar a tensão do concreto. Para o cálculo da resistência à punção em lajes lisas do concreto armado sem armadura de cisalhamento a verificação deve ser feita para um perímetro crítico afastado  $2d$  da face do pilar ou área carregada pontualmente, tal qual se mostra na Figura 2.30 e a expressão proposta pelo código para estimar a resistência à punção tal qual indica a Equação 2.13.

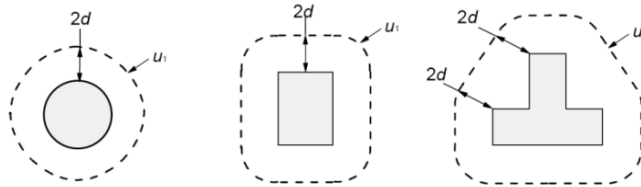


Figura 2.30 – Perímetro crítico ( $u_1$ ) segundo o EUROCODE 2 (2004) para lajes sem armadura de cisalhamento

$$V_C = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{Equação 2.13}$$

Onde:

$V_C$ : Força resistente ao cisalhamento da ligação laje-pilar sem armadura de punção;

$\xi$ : *Size effect* (Efeito de tamanho),  $\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$ , (d em milímetros);

$\rho$ : Taxa de armadura de flexão tracionada média da laje, calculada como:

$\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} \leq 0,02$ , onde  $\rho_x$  e  $\rho_y$  são as taxas de armadura de flexão nas direções x e y, respectivamente (as barras de aço em consideração são aquelas que se encontram em uma largura igual à dimensão do pilar mais  $3d$  a cada lado do mesmo);

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

$u_l$ : Comprimento do perímetro crítico afastado  $2d$  da face do pilar (ver Figura 2.13);

$d$ : Altura útil da laje,  $(d = \frac{d_x + d_y}{2})$ .

Da mesma forma que o código americano, esta norma propõe para os casos de lajes lisas com armadura de cisalhamento três possíveis situações de ruptura. A primeira situação é o caso de esmagamento da biela onde a força resistente ( $V_{int}$ ) é determinada mediante a Equação 2.14. A segunda situação refere-se ao caso de ruptura passando pela armadura de cisalhamento, onde as parcelas referentes ao concreto e aço trabalham em conjunto para resistir os esforços externos, neste caso a força resistente é obtida a partir da Equação 2.15. E por último, o caso onde a ruptura ocorre fora da região reforçada a cisalhamento, sendo a capacidade resistente calculada pela Equação 2.16.

$$V_{int} = 0,3 \cdot f_{ck} \cdot (1 - \frac{f_{ck}}{250}) \cdot u_0 \cdot d \quad \text{Equação 2.14}$$

$$V_{TCS} = 0,75 \cdot V_C + (1,5 \cdot \frac{d}{S_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{ysw,ef}) \quad \text{Equação 2.15}$$

$$V_{out} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{\frac{1}{3}} \cdot u_{out} \cdot d \quad \text{Equação 2.16}$$

Onde:

$u_0$ : Comprimento do perímetro crítico na face do pilar;

$u_{out}$ : Comprimento do perímetro crítico afastado  $1.5d$  da camada mais externa da armadura de cisalhamento, respeitando-se um limite de  $2d$  para a distância máxima entre duas linhas concêntricas de armadura, Figura 2.31;

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

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

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

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



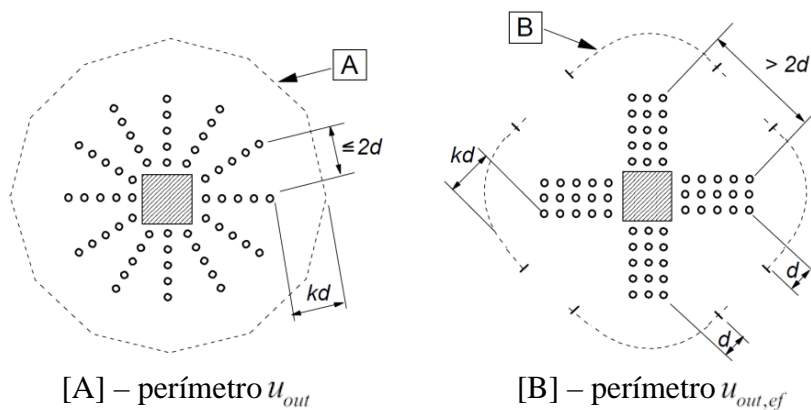


Figura 2.31 – Perímetro crítico ( $u_{out}$ ) segundo o EUROCODE 2 (2004)  
Para lajes com armadura de cisalhamento

O valor de  $k$  recomendado pela norma é de 1,5.

### 2.6.3. NBR 6118 (2014)

As recomendações da norma brasileira para o projeto de estruturas de concreto baseiam-se nos princípios do CEB-FIP MC90 (1993), assim como o EUROCODE 2 (2004).

Embora a resistência à punção em lajes lisas de concreto armado sem armadura de cisalhamento seja obtida da mesma forma que no EUROCODE 2 (2004), tal como se mostra na Equação 2.17, existem termos como o size effect ( $\xi$ ), o qual a norma brasileira não limita, e portanto, pode tomar valores acima de dois, o qual é limitado pelo EUROCODE 2 (2004); a taxa de armadura tracionada também não é limitada ao valor de 2% , podendo adotar valores superiores. O perímetro crítico  $C'$  encontra-se afastado a uma distancia  $2d$  a cada lado das faces do pilar, ver Figura 2.32.

$$V_C = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{Equação 2.17}$$

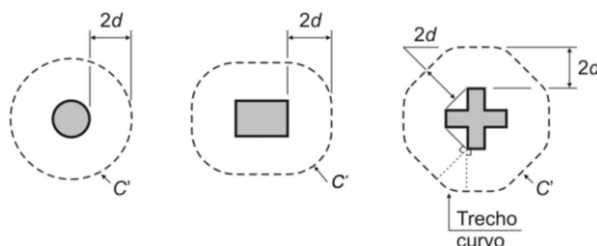


Figura 2.32 – Perímetro crítico ( $C'$ ) segundo a NBR 6118 (2014)  
para lajes sem armadura de cisalhamento

Para o caso da verificação da resistência a punção em lajes lisas com armadura de cisalhamento a NBR 6118 (2014) propõe as mesmas equações para os três casos possíveis de ruptura que o EUROCODE 2 (2004); caso de esmagamento da biela, caso de ruptura passando pela armadura de cisalhamento e caso onde a ruptura ocorre fora da região reforçada.

Embora as expressões não variem, há duas pequenas diferenças em relação ao EUROCODE 2 (2004), o primeiro é para o caso de ruptura passando pela armadura de cisalhamento, onde o valor da tensão efetiva da armadura de cisalhamento ( $f_{yw,ef}$ ) é obtido a partir da Equação 2.18.

$$f_{yw,ef} = f_{yw} \quad \text{Equação 2.18}$$

Onde:

$f_{yw}$ : Tensão de escoamento da armadura transversal, a mesma pode ser considerada com os seguintes valores máximos, sendo permitida interpolação linear,

$f_{yw} \leq 287,5$  MPa, para lajes com espessura até 15 cm (para estribos);

$f_{yw} \leq 500,25$  MPa, para lajes com espessura maior que 35 cm (para estribos).

A outra modificação que a NBR 6118 (2014) apresenta em relação com o EUROCODE 2 (2004) é o fato do perímetro crítico ( $C''$ ) encontrar-se a  $2d$  afastado da última camada de armaduras de cisalhamento, outro detalhe diz respeito a geometria circular do mesmo para o caso de arranjos radiais, tal como mostra a Figura 2.33, a qual é poligonal no EUROCODE 2 (2004).

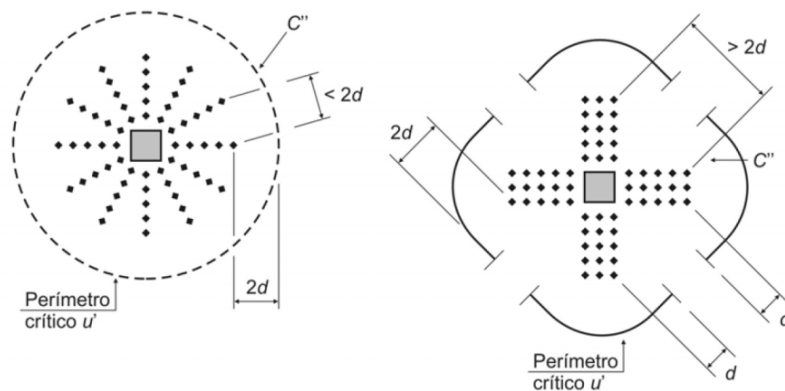


Figura 2.33 – Perímetro crítico ( $C''$ ) segundo a NBR 6118 (2014) para lajes com armadura de cisalhamento

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1. CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIADAS

É uma realidade que o ensaio de um pavimento de lajes a escala real em um laboratório é bem complexo, em primeiro lugar pelos custos dos materiais para a confecção do mesmo, em segundo lugar pelo equipamento disponível no laboratório, que em poucas ocasiões permite ensaiar modelos maiores que um determinado padrão.

Por este motivo, muitos pesquisadores adotam modelos os quais denominam de locais, tendo como vantagem fundamental a possibilidade de avaliar, numa determinada região da estrutura (zona de ligação laje-pilar interno neste caso), as diferentes variáveis que influenciam na capacidade da resistência a punção; porém, estes modelos apresentam como desvantagem fundamental o fato de não ter a possibilidade de redistribuição de esforços a outras zonas mais rígida da estrutura quando é atingida a máxima capacidade resistente do concreto e/ou aço numa determinada região da mesma.

Este trabalho avalia experimentalmente a capacidade de resistência à punção de quatro modelos locais de ligação laje-pilar submetidos a carregamento simétrico. O modelo local de laje ensaiada representa uma zona de momento negativo ao redor do pilar, considerando simétricos os carregamentos e geometria do pavimento. Os pontos de momentos nulos a cada lado do pilar interno limitam a região de análise, a qual corresponde um valor próximo a 0,22 do vão entre pilares, ver Figura 3.2.

Dois dos modelos foram construídos com a tecnologia *BubbleDeck* variando a técnica de construção (com e sem pré-laje pré-moldada) e colocando a mesma armadura de cisalhamento com distribuição padrão *BubbleDeck* (ver Figuras 3.3 c e d), os outros dois modelos fabricados consistem em duas lajes maciças variando a técnica de construção (com e sem pré-laje pré-moldada) e colocando armadura de cisalhamento em cruz (mesma distribuição, ver Figuras 3.3 a e b), sendo que para um modelo o estribo encontra-se completamente ancorado e para o outro é semi-ancorado.

Desta forma os ensaios foram definidos com pavimentos de lajes com vãos de 5,68 m com carregamento simétrico e pilar interno, as lajes ensaiadas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília apresentam dimensões de 2500 mm x 2500 mm, altura total de 280 mm, pilares internos circulares de 300 mm de diâmetro e esferas no seu interior para o caso das lajes de tipo *BubbleDeck* de 225 mm de diâmetro.

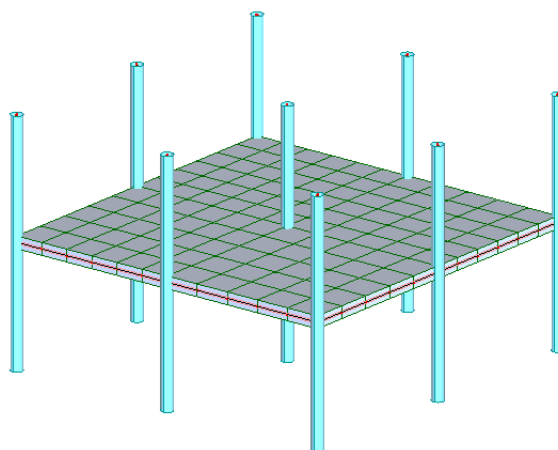


Figura 3.1 – Modelo de pavimento 3D

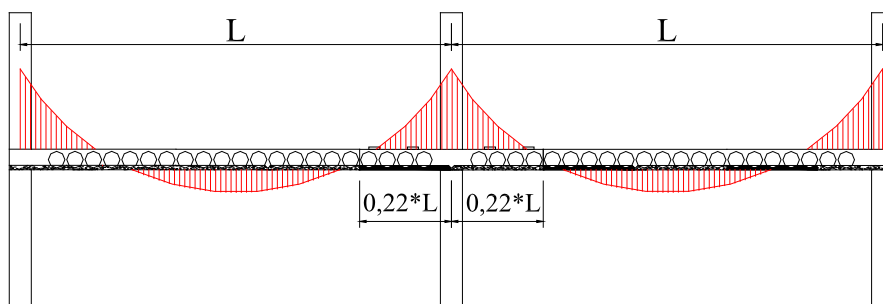


Figura 3.2 – Pórtico do Pavimento

A Tabela 3.1 mostra um resumo das lajes ensaiadas.

Tabela 3.1 – Principais variáveis das lajes ensaiadas à punção

Laje	Altura total (mm)	Tipo	Pré-laje	Armadura de cisalhamento	Distribuição das armaduras de cisalhamento	Estribo ancorado
SS1	280	Maciça	Não	Estribo	Cruz	Sim
SS2	280	Maciça	Sim	Estribo	Cruz	Semi-Ancorado
BD1	280	<i>BubbleDeck</i>	Não	Estribo	Padrão <i>BubbleDeck</i>	Não
BD2	280	<i>BubbleDeck</i>	Sim	Estribo	Padrão <i>BubbleDeck</i>	Não

\*Distribuição das armaduras de cisalhamento padrão *BubbleDeck* (ver Figuras 3.3 c e d)

A Figura 3.3 apresenta um esquema com as dimensões em planta e seção transversal das quatro lajes ensaiadas, a distribuição e tipo do reforço à punção utilizado e a posição dos pontos de aplicação das cargas.

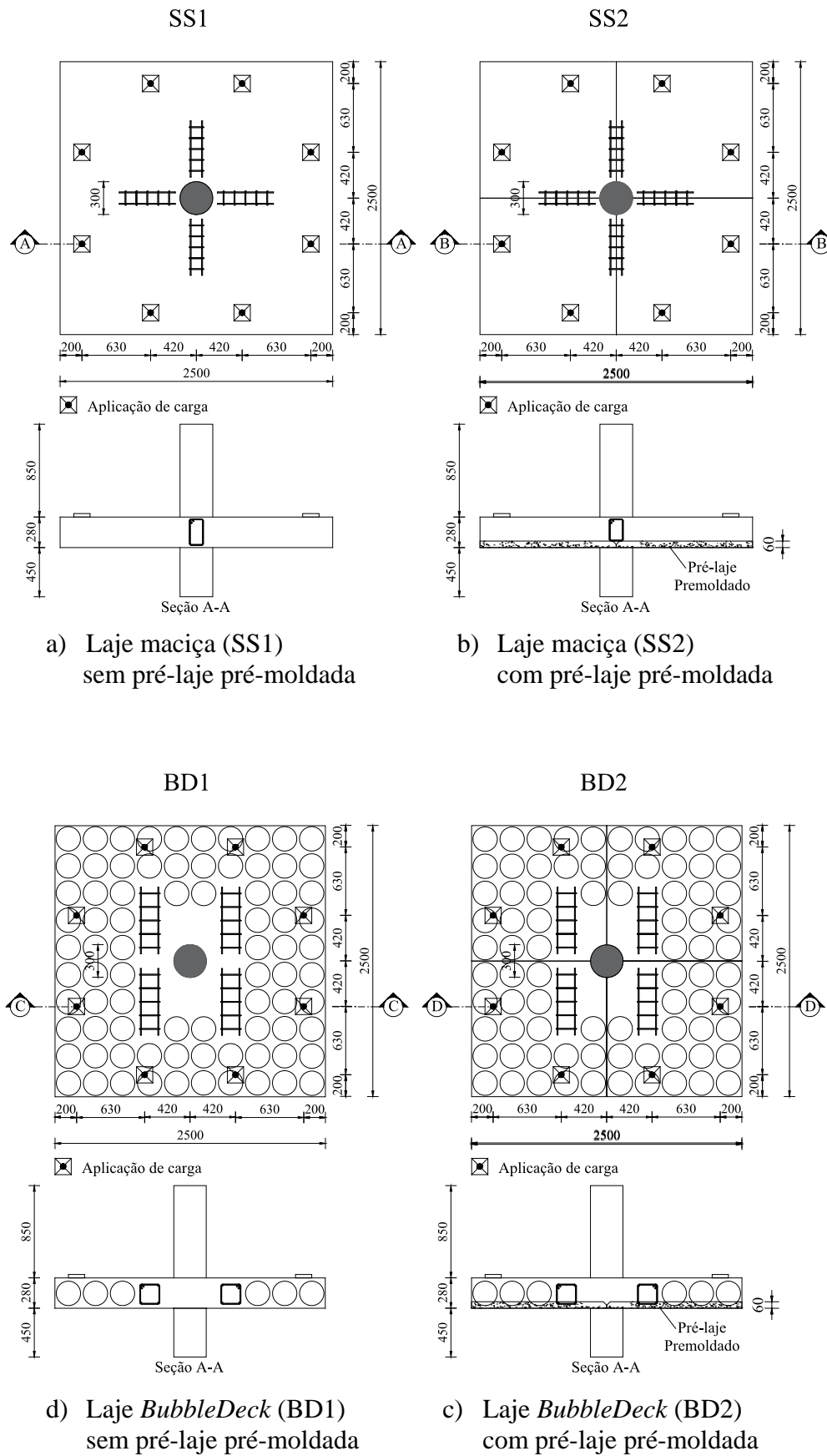


Figura 3.3 – Geometria dos modelos locais (cotas em mm)

### 3.2. ARMADURA DE FLEXÃO

A armação das lajes foi confeccionada com duas telas de aço, uma malha superior feita com barras de 6,0 mm de diâmetro e uma malha inferior com barras de 8,0 mm de diâmetro, ambas com aço CA60 e igual espaçamento variando entre 100 mm e 150 mm.

A armadura de flexão principal negativa foi elaborada com barras de 12,5 mm e aço CA50 com espaçamento variando entre 100 mm e 150 mm, da mesma forma que as telas de aço de 6,0 mm e 8,0 mm superior e inferior respectivamente. Foram utilizados ganchos em forma de “u” feitos com barras de 12,5 mm de diâmetro nas extremidades das lajes para garantir a ancoragem das armaduras de flexão negativa.

Foram adotados cobrimentos de 25 mm e 20 mm para as barras na face superior e inferior respectivamente,

Para garantir a ligação dos painéis de lajes pré-moldadas no caso das lajes SS2 e BD2 foram utilizadas barras de 10 mm de diâmetro e aço CA50.

Antes da concretagem das lajes, medições em vários pontos das mesmas foram realizadas com a finalidade de obter os valores reais da altura útil dos modelos ensaiados.

Os valores da taxa de armadura de flexão considerados nos cálculos foram obtidos segundo a Equação 3.1.

$$\rho = \frac{A_s}{b_w \cdot d} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

$A_s$ : Área de aço da armadura de flexão;

$b_w$ : Largura da faixa de laje, neste caso considerada como ( $b_w = 6d + c$ );

$c$ : Diâmetro do pilar,

$d$ : Altura útil da laje.

As Figuras 3.4 e 3.5 apresentam a distribuição das armaduras de flexão principal negativa e as barras de ligação entre painéis.

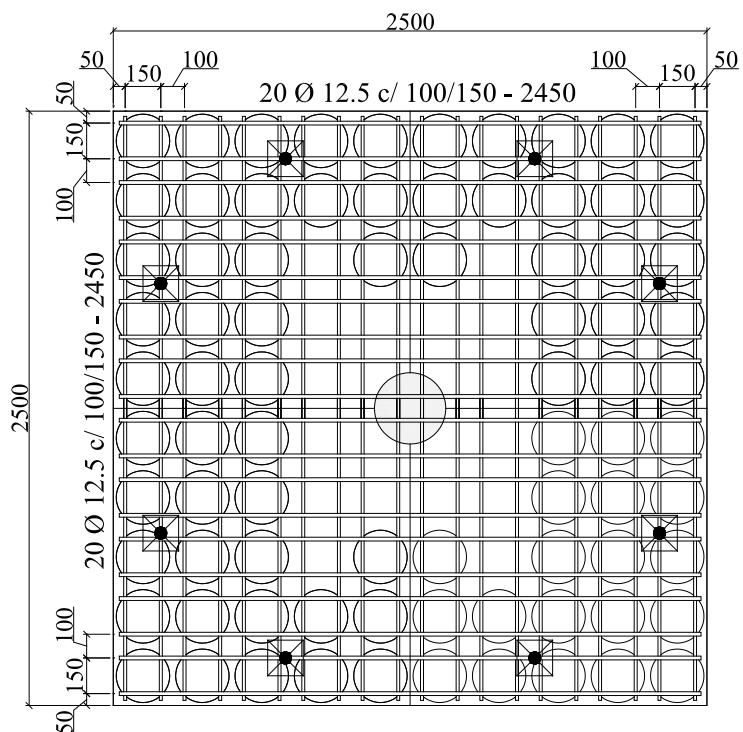
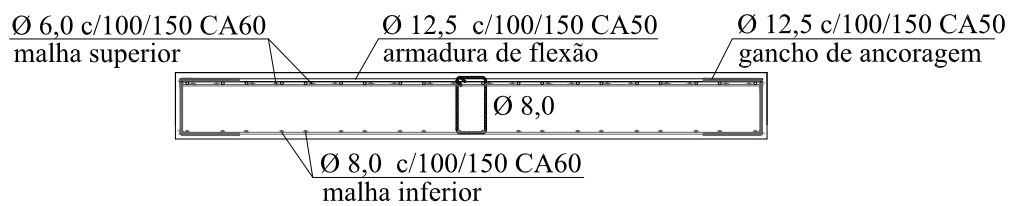
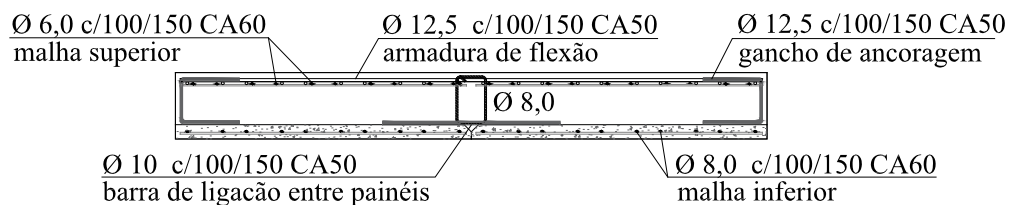


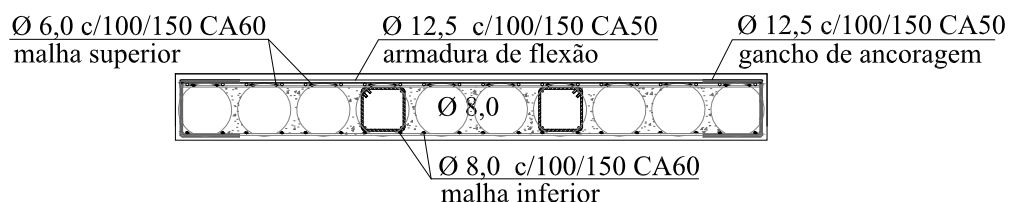
Figura 3.4 – Distribuição em planta da armadura de flexão principal negativa  
(cotas em mm)



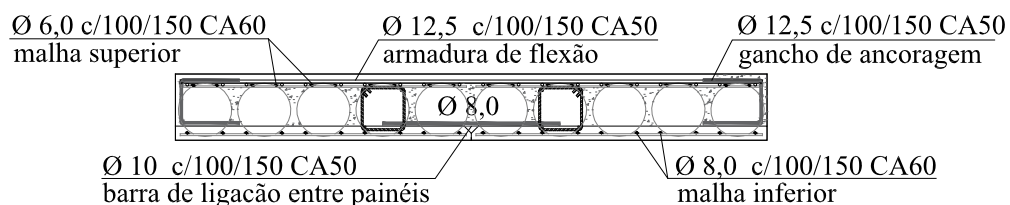
a) SS1



b) SS2



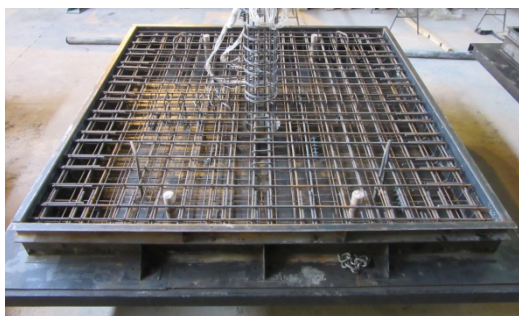
c) BD1



d) BD2

Figura 3.5 – Detalhe das armaduras de flexão (cotas em mm)

A Figura 3.6 mostra as fotos das lajes SS1 e BD1 armadas prontas para ser concretadas.



a) Armação da laje SS1



b) Armação da laje BD1

Figura 3.6 – Armação das lajes SS1 e BD1



### 3.3. ARMADURA DE CISALHAMENTO

Para o caso das lajes maciças SS1 e SS2 adotou-se uma distribuição em cruz com estribos fechados de 8.0 mm de diâmetro e aço CA50. Os estribos ficaram separados a cada 125 mm entre eles e 100 mm da face do pilar, cada armadura disposta consta de cinco camadas de estribos, ver Figura 3.7.

A área de armadura de cisalhamento por camada é de 402 mm<sup>2</sup>. As seções transversais destas lajes se mostram na Figura 3.8 e 3.9 respectivamente.

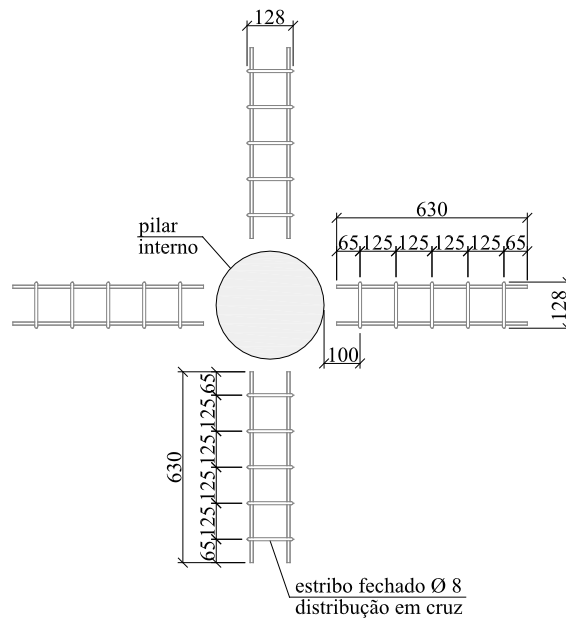


Figura 3.7 – Detalhe em planta das armaduras de cisalhamento das lajes SS1 e SS2 (cotas em mm)

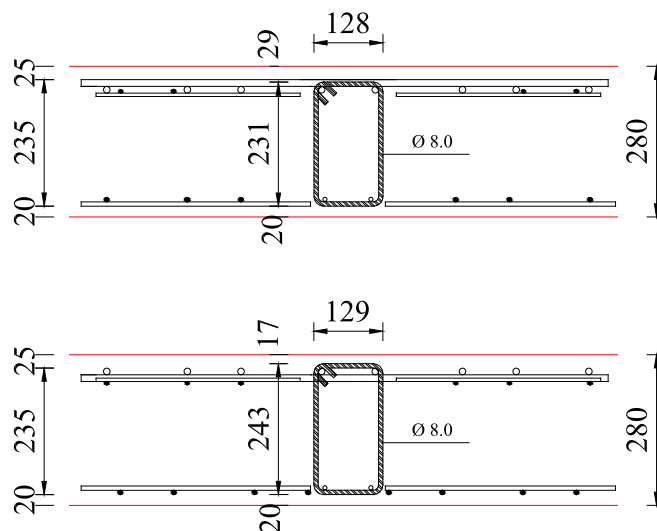


Figura 3.8 – Detalhe da armadura de cisalhamento na laje SS1 (duas direções ortogonais, cotas em mm)

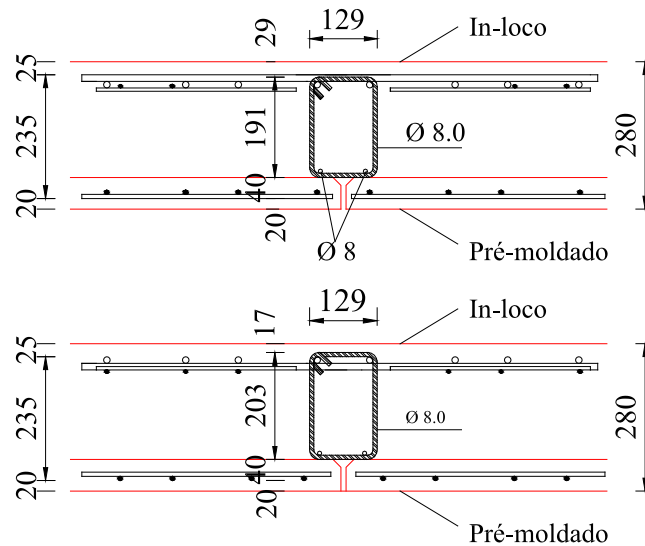


Figura 3.9 – Detalhe da armadura de cisalhamento na laje SS2  
(duas direções ortogonais, cotas em mm)

Para o caso das armaduras de cisalhamento das lajes *BubbleDeck* (BD1 e BD2) a distribuição adotada é a de padrão sugerido pela *BubbleDeck*, com cinco estribos de 8.0 mm de diâmetro de aço CA50, espaçados a cada 125 mm entre eles, ver Figura 3.10. A área de armadura de cisalhamento por camada é de 402 mm<sup>2</sup>. As seções transversais destas lajes se mostram na Figura 3.11 e Figura 3.12 respectivamente.

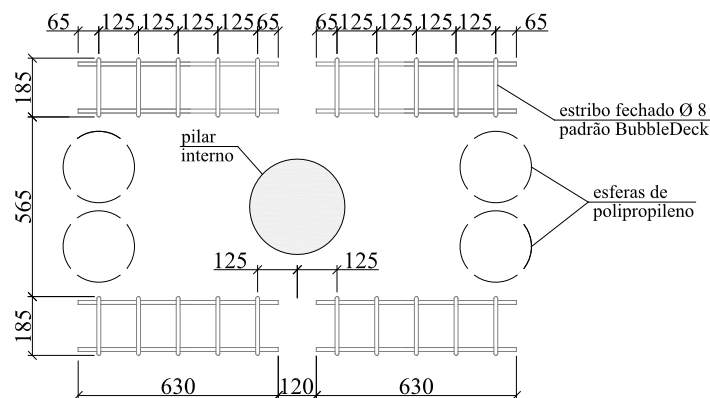


Figura 3.10 – Detalhe em planta das armaduras de cisalhamento das lajes BD1 e BD2  
(cotas em mm)

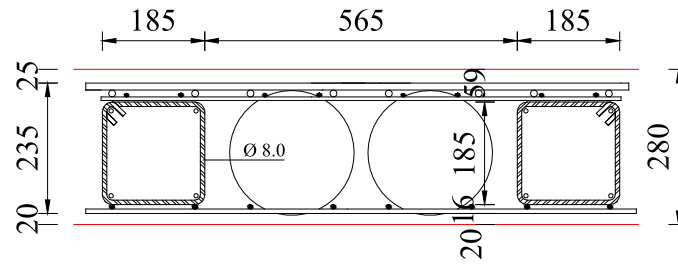


Figura 3.11 – Detalhe da armadura de cisalhamento na laje BD1 (cotas em mm)

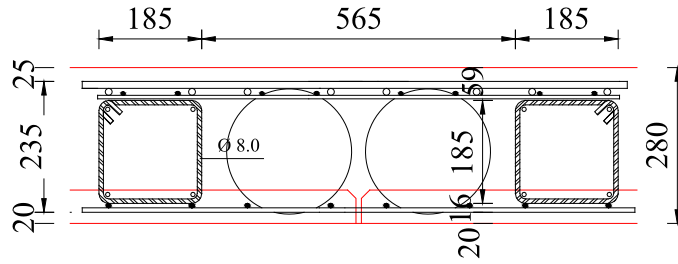


Figura 3.12 – Detalhe da armadura de cisalhamento da laje BD2 (cotas em mm)

### 3.4. ARMADURA DOS PILARES

A armadura dos pilares foi à mesma para as quatro lajes ensaiadas, composta por oito barras longitudinais de 1530 mm de comprimento e 12,5 mm de diâmetro, e 16 estribos circulares de 8,0 mm de diâmetro com separação de 100 mm e aço tipo CA50. A Figura 3.13 mostra o detalhe da armação dos pilares.

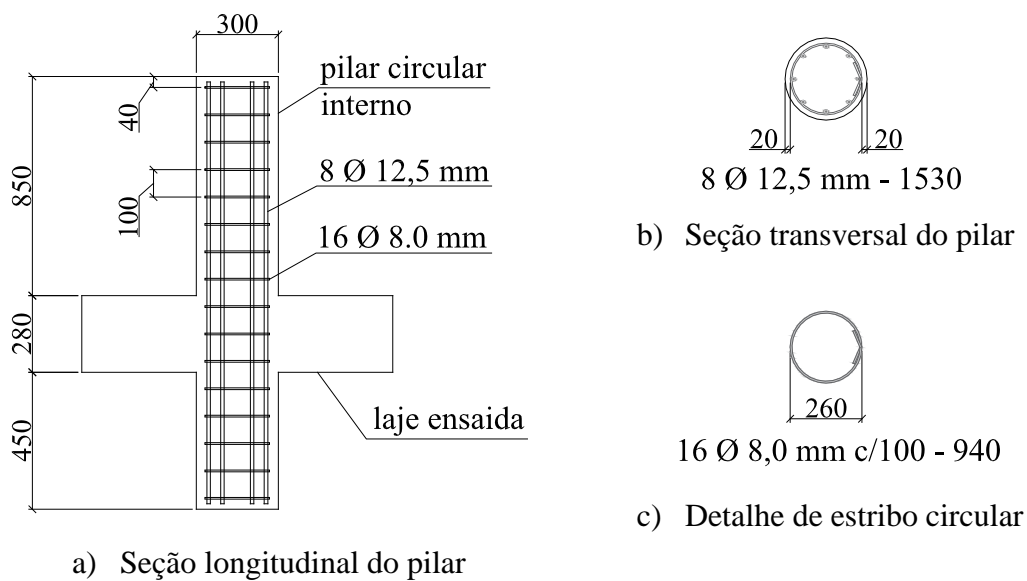


Figura 3.13 – Detalhe da armadura dos pilares (cotas em mm).

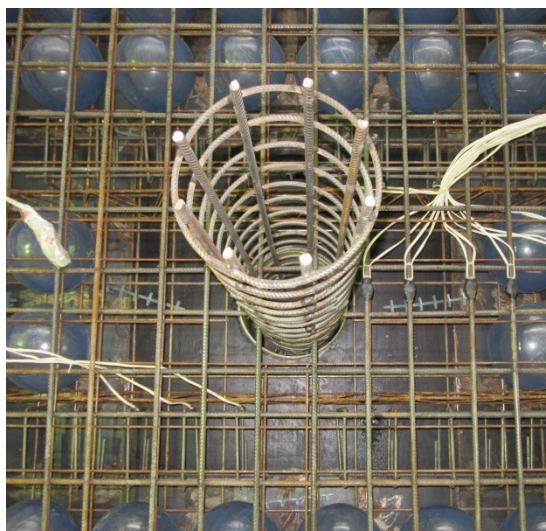


Figura 3.14 – Foto da armadura do pilar posicionada na laje

### **3.5. INSTRUMENTAÇÃO**

#### **3.5.1. Deslocamentos verticais**

Para medir os deslocamentos verticais durante o ensaio das lajes foram utilizados LVDT's (transdutores de variação de deslocamento linear), os quais foram colocados em 12 pontos diferentes em cada laje.

Em dois dos quadrantes da laje os deslocamentos foram medidos em quatro pontos diferentes e em linha, entretanto, nos outros dois quadrantes os deslocamentos foram medidos em dois pontos distintos e também em linha.

Todos os LVDT's foram posicionados na face superior da laje e com a finalidade de obter resultados mais precisos foram coladas chapas de aço na posição onde posicionados, para garantir uma superfície mais plana que o acabamento do concreto.

A Figura 3.15 mostra um detalhe do posicionamento dos LVDT's das lajes ensaiadas.

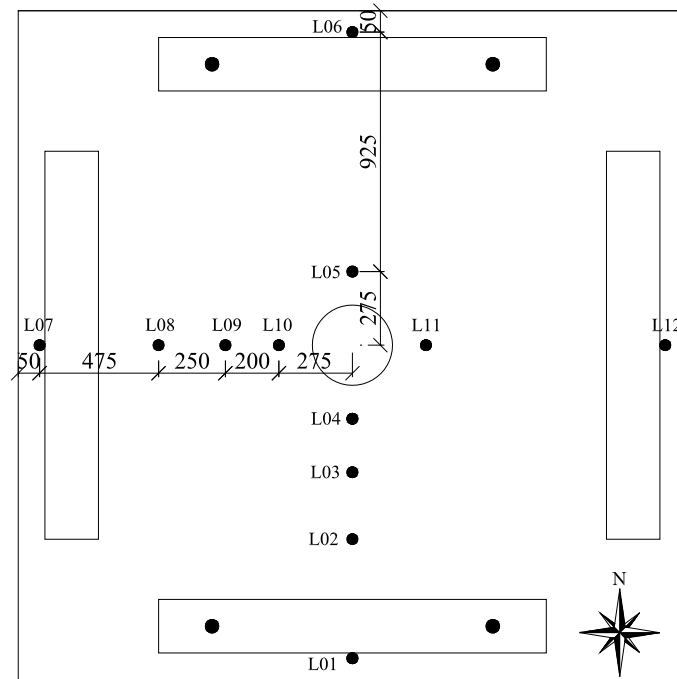


Figura 3.15 – Detalhe de posicionamento dos LVDT's na superfície superior das lajes (cotas em mm)

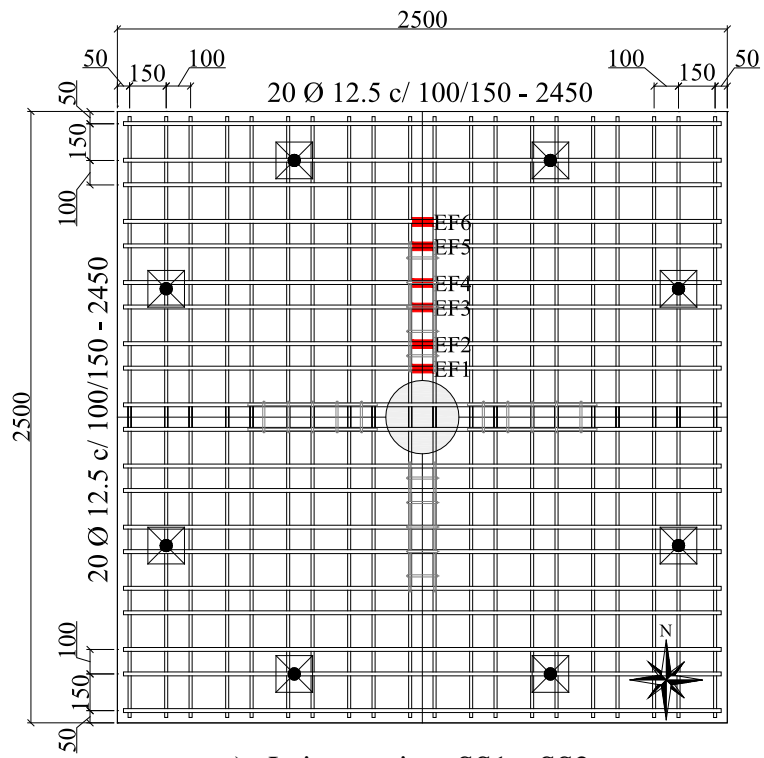


Figura 3.16 – Posicionamento dos LVDTs na superfície superior das lajes

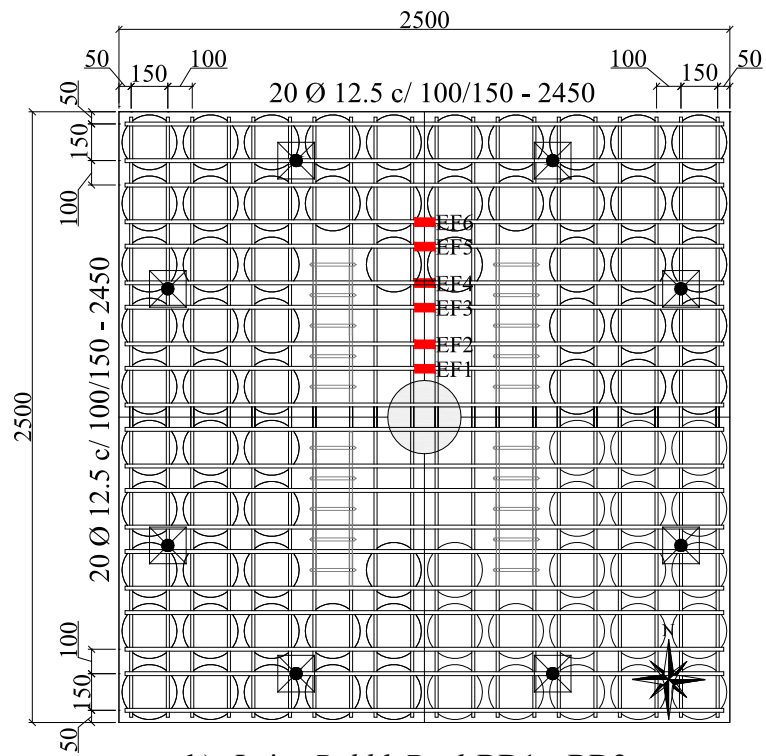
### 3.5.2. Deformações nas armaduras e no concreto

#### 3.5.2.1 Armadura de Flexão.

Com a finalidade de monitorar a deformação nas armaduras de flexão das lajes durante as várias etapas do carregamento no ensaio, foram colocados extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*) em seis pontos das lajes. Pelo fato das lajes ter carregamento simétrico a instrumentação foi colocada nas barras de flexão mais próximas ao pilar em apenas uma linha de um dos quadrantes, ver Figura 3.17.



a) Lajes maciças SS1 e SS2



b) Lajes *BubbleDeck* BD1 e BD2

Figura 3.17 – Instrumentação nas armaduras de flexão principal (cotas em mm)

Os extensômetros utilizados foram da marca *Kyowa Eletronic Instruments*, modelo KDFG-2-120-C1-11 utilizando dois em cada barra na mesma seção diametralmente opostos com o objetivo de eliminar efeitos de flexão localizada nos pontos analisados das barras, ver Figura 3.18. Para-se obter a deformação de cada armadura, foi feita uma média aritmética das leituras dos dois extensômetros.

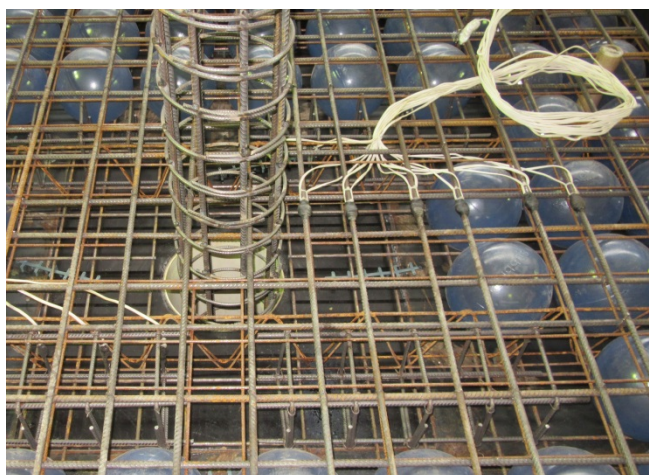
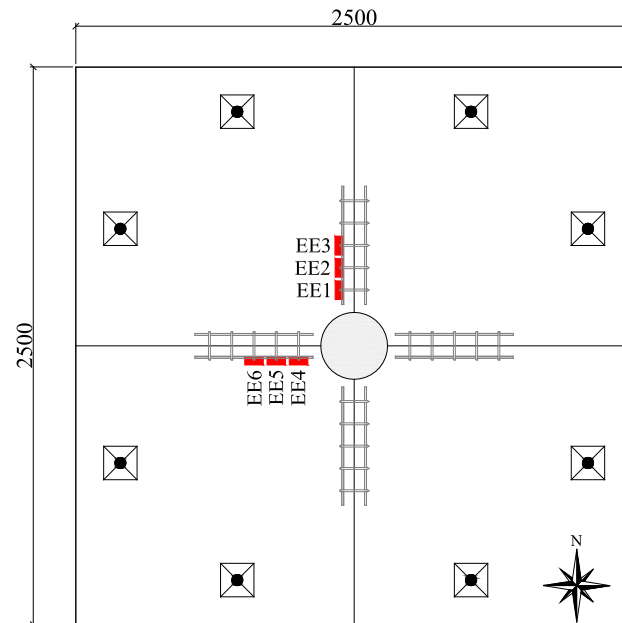


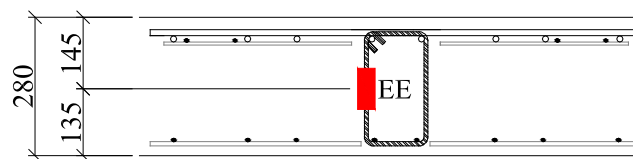
Figura 3.18 – Foto da laje BD1 com as barras de flexão principal instrumentadas

### 3.5.2.2 Armadura de Cisalhamento

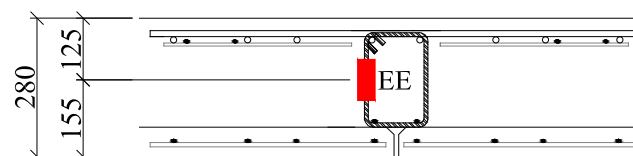
Para medir as deformações nas armaduras de cisalhamento, foi seguido o mesmo procedimento que para as armaduras de flexão e utilizado o mesmo modelo de extensômetros de resistência eléctrica (*strain gages*), os quais foram posicionados tal como se mostra na Figura 3.19 e Figura 3.20.



a) Posicionamento em planta da instrumentação da armadura de punção nas lajes maciças SS1 e SS2



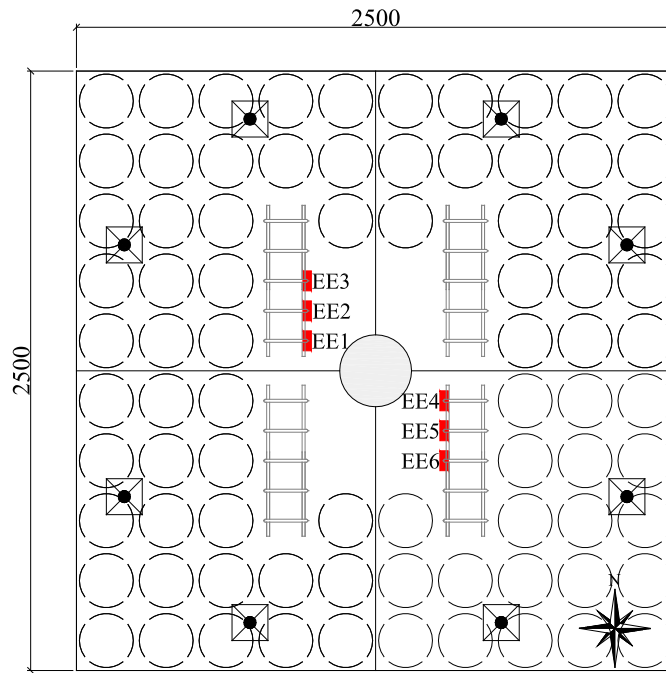
b) Seção transversal, laje maciça SS1



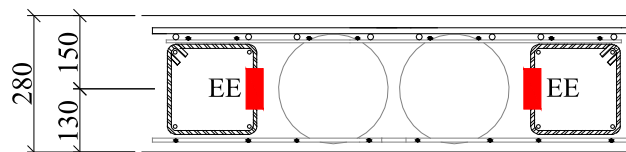
c) Seção transversal, laje maciça SS2

Figura 3.19 – Instrumentação das armaduras de cisalhamento das lajes maciças SS1 e SS2 (cotas em mm)

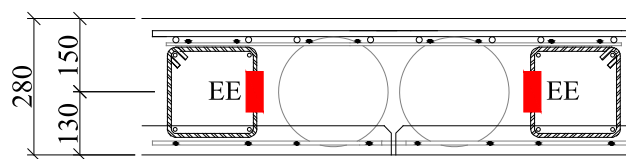




a) Posicionamento em planta da instrumentação da armadura de punção nas lajes *BubbleDeck* BD1 e BD2



b) Seção transversal, laje *BubbleDeck* BD1



c) Seção transversal, laje *BubbleDeck* BD2

Figura 3.20 – Instrumentação das armaduras de cisalhamento das lajes *BubbleDeck* BD1 e BD2 (cotas em mm)

A Figura 3.21 mostra a foto com o posicionamento dos extensômetros nas armaduras de cisalhamento instrumentadas.



a) Armadura de cisalhamento instrumentada (Laje SS1)



b) Armadura de cisalhamento instrumentada (Laje BD1)

Figura 3.21 – Armaduras de cisalhamento instrumentadas

Para fixar os extensômetros nas barras primeiramente foi limada e lixada a zona da barra instrumentada, com a finalidade de eliminar as nervuras e com a precaução de não diminuir a seção transversal da barra, logo essa zona foi limpa com álcool para eliminar resíduos e impurezas, e por último colados os extensômetros com adesivo instantâneo à base de cianoacrilato.

Uma vez fixos os extensômetros os terminais foram soldados a um cabo flexível de dois fios, o qual foi fixado à barra com braçadeiras plásticas. Após a soldagem dos terminais foi colocado acima da mesma uma capa de adesivo epóxi para garantir a proteção e isolamento elétrico da região soldada.

Finalmente a zona instrumentada foi envolta toda numa camada de silicone e logo acima colocada fita isolante de autofusão para proteger a mesma na hora da concretagem.

A Figura 3.22 mostra uma série de fotos do processo de preparação da superfície e colagem dos extensômetros.



a) Superfície limada, lixada e limpa



b) Extensômetro colado



c) Soldagem e fixação dos fios



d) Proteção e isolamento com adesivo epóxi



e) Proteção mecânica com silicone em gel



f) Proteção mecânica com fita isolante de auto fusão

Figura 3.22 – Preparação da superfície e colagem dos extensômetros

### 3.5.2.3 Concreto

Foi colocado um total de quatro extensômetros na superfície inferior do concreto em cada laje na zona próxima do pilar, onde se esperaram encontrar as maiores deformações de compressão no concreto; dois para medir as deformações radiais e dois para as tangenciais, ver Figura 3.23.

Os mesmos foram de igual marca que os das armaduras, no entanto de modelo KC-70-120-A1-11, a colagem dos extensômetros na superfície inferior do concreto foi feita com adesivo instantâneo a base de cianoacrilato e foram tomadas as mesmas precauções de limpeza com álcool antes da sua colagem.

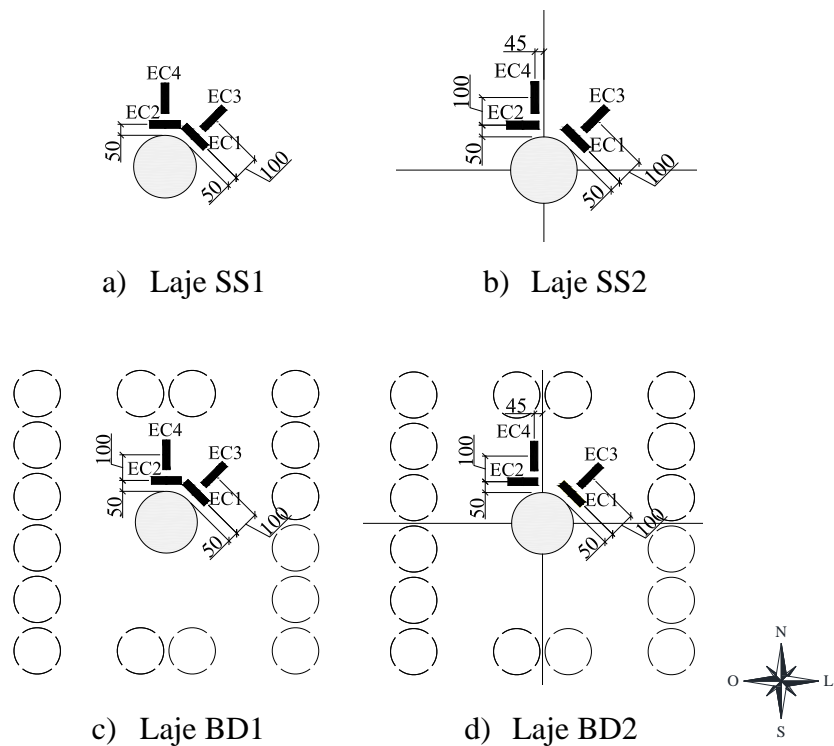


Figura 3.23 – Instrumentação do concreto das lajes (cotas em mm)

### 3.6. FABRICAÇÃO DOS MODELOS LOCAIS

#### 3.6.1. Formas

Para a concretagem simultânea das quatro lajes foram utilizadas quatro formas metálicas fabricadas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília, e oito formas para a concretagem das oito pré-lajes de 1240 mm x 1240 mm as quais formam parte das lajes SS2 e BD2, ver Figura 3.24; para as formas dos pilares foram utilizados tubos de PVC de 300 mm de diâmetro interno.



a) Formas metálicas das lajes



b) Formas metálicas das pré-lajes

Figura 3.24 – Formas metálicas empregadas

### 3.6.2. Concretagem

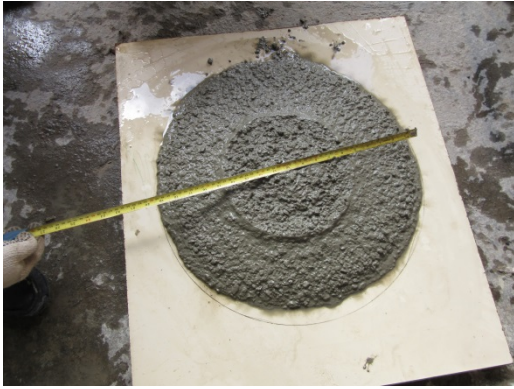
A concretagem das lajes foi feita em duas etapas, primeiramente foram concretadas as pré-lajes de 60 mm de altura correspondentes às lajes SS2 e BD2 no dia 21 de dezembro de 2015, ver Figura 3.25.



Figura 3.25 – Concretagem das pré-lajes

Na segunda etapa, em 19 de janeiro de 2016, foram concretadas as lajes SS1 e BD1 e finalizada a concretagem das lajes SS2 e BD2.

O processo de concretagem das lajes correspondente à segunda etapa é mostrado na Figura 3.26, desde o recebimento do concreto até a cura das lajes.



a) Ensaio de espalhamento



b) Moldagem corpos de prova



c) Concretagem das lajes



d) Acabamento das lajes



e) Cura das lajes



Figura 3.26 – Processo de concretagem e cura das lajes

### 3.7. MATERIAIS

#### 3.7.1. Concreto

O concreto para confeccionar as lajes foi do tipo usinado, fornecido pela empresa especializada, CONCRECON. A resistência característica especificada para 28 dias foi de 30 MPa.

Para determinar as propriedades mecânicas do concreto das lajes foram respeitadas as prescrições das Normas NBR 5739 (2007), NBR 7222 (2011) e NBR 8522 (2008). Onde foram testados três corpos de prova para determinar a resistência à compressão, três para resistência à tração por compressão diametral e mais três para o módulo de elasticidade, os mesmos foram fabricados com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento. Foi utilizada a média dos resultados de três corpos de prova para determinar cada propriedade mecânica.

A Figura 3.27 e Figura 3.28 ilustram os ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília.



Figura 3.27 – Ensaio de compressão



Figura 3.28 – Ensaio de compressão diametral

A Tabela 3.2 mostra o resumo das propriedades mecânicas do concreto empregado.

Tabela 3.2 – Propriedades do concreto empregado

Propriedades	Pré-lajes	Lajes
$f_c$ (MPa)	34,9	44,6
$f_{ct}$ (MPa)	3,6	3,8
$E_c$ (GPa)	28,3	28,6

### 3.7.2. Aço

Respeitando as recomendações da NBR 6892 (2013), para o cálculo das propriedades mecânicas dos aços utilizados, foram extraídos três corpos de prova de 500 mm de comprimento para cada diâmetro de barras utilizadas nas armaduras de flexão, de cisalhamento e da tela soldada das lajes.

A Figura 3.29 mostra os ensaios realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília.



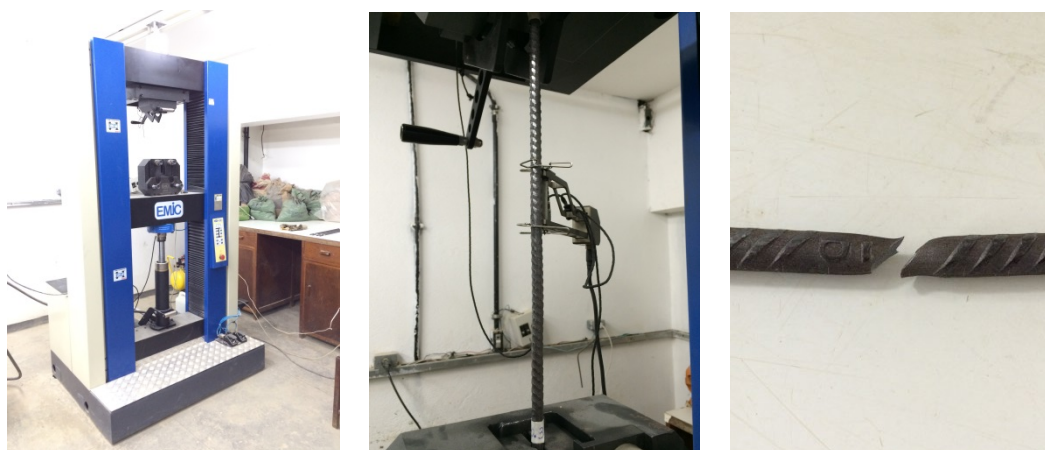


Figura 3.29 – Ensaio de tração do aço.

A Tabela 3.3 mostra o resumo das propriedades mecânicas do aço empregado.

Tabela 3.3 – Propriedades do aço empregado

Tipo de Aço	Diâmetro Nominal (mm)	$f_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (‰)	$E_s$ (GPa)
CA-50 (Estribos)	8,0	673	3,6	187
CA-50 (Barras de ligação)	10,0	619	3,2	193
CA-50 (Barras de Flexão)	12,5	577	3,2	183
CA-60 (Tela Superior)	6,0	697	3,6	195
CA-60 (Tela Inferior)	8,0	644	3,3	195

### 3.8. SISTEMA DE ENSAIO

As lajes foram ensaiadas num pórtico metálico de reação ancorado sobre a laje de reação do Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília.

Os carregamentos aplicados às lajes foram simétricos, utilizando quatro cilindros hidráulicos acionados sobre vigas metálicas com elevada rigidez, estas vigas distribuíram a carga em oito pontos da laje, dois por viga, com passos de carga de 5 kN em cada cilindro hidráulico, totalizando 20 kN aplicado a laje a cada passo de carga. A partir da carga total de 80 kN as cargas aplicadas em cada macaco dobrou de maneira que o passo de carga era de 40 kN.

Foi posicionado um total de quatro células de cargas nos pontos onde atuaram os cilindros hidráulicos e leituras efetuadas por indicadores digitais. As células de carga possuíam capacidade de 500 kN e as mesmas foram fabricadas pela empresa HBM, os cilindros hidráulicos utilizados foram da marca ENERPAC e possuíam capacidade de 500 kN.

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o *Spider 8* (Modelos SR30 e SR55), fabricados pela empresa HBM, o qual, em conjunto com o software CATMAN, obtém de forma computadorizada os dados fornecidos pelos LVDT's, extensômetros colados nas armaduras de flexão, cisalhamento e na superfície do concreto.

A Figura 3.30 e Figura 3.31 mostram um esquema do pórtico de reação e o sistema de aquisição de dados utilizados durante o ensaio.

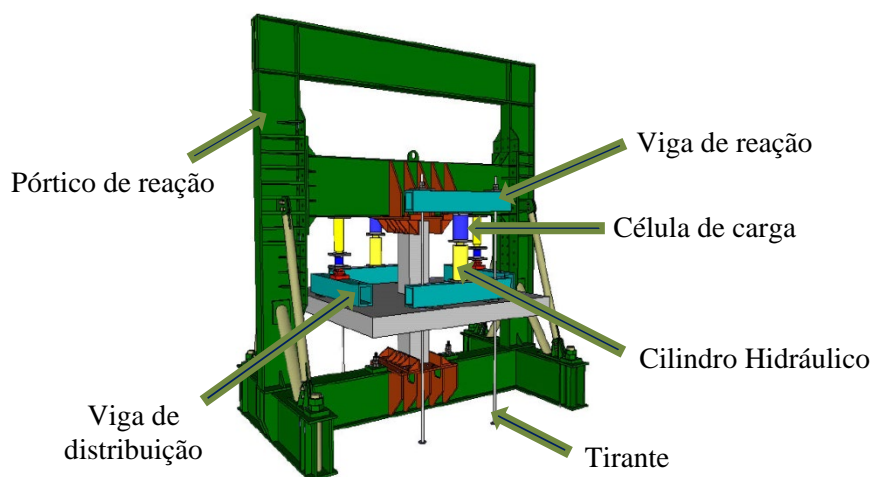


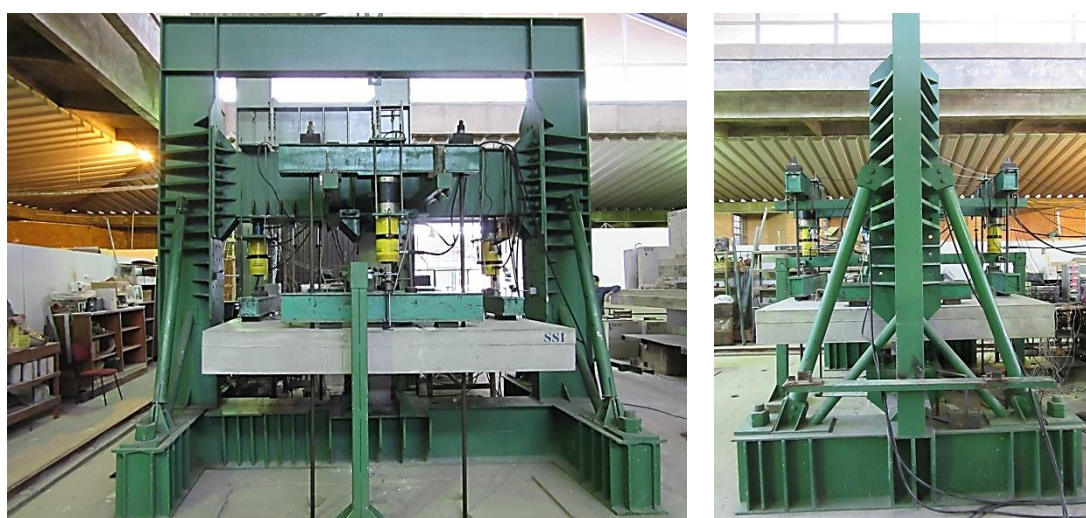
Figura 3.30 – Sistema de ensaio 3D. [FERREIRA (2010)]



Figura 3.31 – Sistema de aquisição de dados.

A aplicação do carregamento ocorreu no sentido gravitacional. Durante o processo de carregamento das lajes, cuidados especiais eram tomados para não ocorrer desbalanceamento nas mesmas e desta forma evitar rupturas com carregamentos menores aos previstos, para isso, o monitoramento dos deslocamentos verticais foi fundamental, principalmente aqueles que aconteciam nas bordas das lajes para as cargas iniciais.

As Figuras 3.32 e 3.33 ilustram o pórtico utilizado nos ensaios das lajes e o sistema de travamento dos pilares respectivamente.



a) Vista Frontal

b) Vista Lateral

Figura 3.32 – Sistema de ensaio, Pórtico de Reação (Laje posicionada)



a) Travamento superior

b) Travamento inferior

Figura 3.33 – Sistema de travamento dos Pilares

### 3.9. RESISTÊNCIA A FLEXÃO DAS LAJES

A resistência última de flexão das lajes foi calculada utilizando o método teórico proposto por GUANDALINI (2009), baseado na teoria das linhas de ruptura.

Com o fim de analisar os resultados experimentais obtidos durante a pesquisa foi utilizado este método o qual baseasse na ocorrência de charneiras plásticas ao longo das linhas de ruptura, onde a laje, neste caso, encontrasse dividida em porções rígidas e planas entre as linhas de plastificação, ocorrendo o colapso quando as linhas de ruptura formam um mecanismo deformável.

A Figura 3.34 mostra o mecanismo de ruptura proposto por GUANDALINI (2009), e seguidamente na Equação 3.2 a formulação analítica para o cálculo da carga que produziria a ruptura por flexão das lajes.

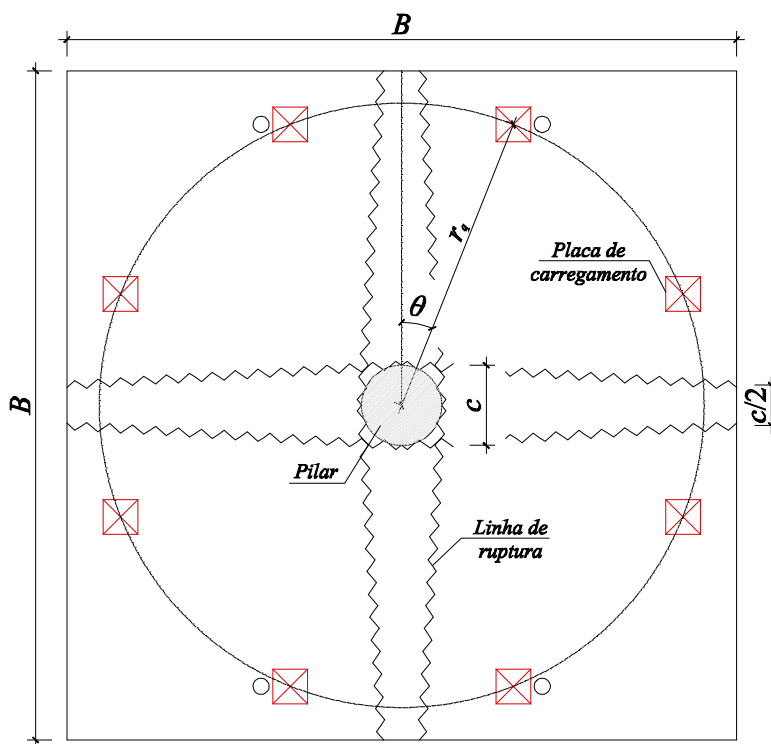


Figura 3.34 – Mecanismo de Ruptura para os modelos ensaiados

$$V_{flex} = \frac{4 * m_R}{r_q * (\cos \theta + \text{sen} \theta) - c} \cdot \left( \frac{B^2 - B * c - \frac{c^2}{4}}{B - c} \right) \quad \text{Equação 3.2}$$

Sendo:

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

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

$B$ : comprimento do modelo de laje;

$c$ : diâmetro do pilar.

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

Para o caso experimental o momento resistente foi calculado como:

$$m_R = 0,95 \cdot f_c \cdot (0,8 \cdot x) \cdot b_w \cdot (d - 0,4x) \quad \text{Equação 3.3}$$

$$x = \frac{\sum (A_s \cdot f_y)}{0,95 \cdot f_c \cdot b_w \cdot 0,8} \quad \text{Equação 3.4}$$

Sendo:

$f_c$ : Resistência à compressão do concreto;

$x$ : Profundidade da linha neutra;

$b_w$ : Largura unitária de faixa de laje;

$d$ : Altura útil da laje;

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

$f_y$ : Tensão de escoamento do aço

Os resultados das cargas que produziram a ruptura por flexão são mostrados na Tabela 5.1.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados correspondentes aos ensaios tal como descritos no capítulo anterior. Serão expostos a seguir os resultados dos deslocamentos verticais das lajes, deformações nas armaduras de flexão, deformações nas armaduras de cisalhamento, deformações na superfície comprimida do concreto, o mapa de fissuração correspondente às fissuras acompanhadas durante os ensaios e as cargas últimas de ruptura para cada laje, possibilitando um estudo conjunto de todos estes fatores, na determinação do modo de ruptura das lajes.

### 4.1. CARGA DE RUPTURA

A Tabela 4.1 mostra algumas das características das lajes ensaiadas assim como a carga de ruptura atingida durante os ensaios.

Tabela 4.1 – Carga de ruptura experimental das lajes

Laje	Tipo	Distribuição dos estribos	Estribo ancorado	$d$ (mm)	$\rho$ (%)	$V_u$ (kN)
SS1	Maciça sem pré-laje	Cruz	Sim	232	0,54	1040,8
SS2	Maciça com pré-laje	Cruz	Semi-Ancorado	246	0,48	986,8
BD1	<i>BubbleDeck</i> sem pré-laje	Padrão <i>BubbleDeck</i>	Não	241	0,50	817,2
BD2	<i>BubbleDeck</i> com pré-laje	Padrão <i>BubbleDeck</i>	Não	255	0,45	832,5

### 4.2. DESLOCAMENTOS VERTICAIS DAS LAJES

Os deslocamentos verticais foram lidos em doze pontos das quatro lajes, sendo sempre na mesma posição para todas as lajes, com o fim de poder comparar os resultados obtidos nos ensaios.

As leituras foram realizadas a cada passo de carga durante o ensaio, na Figura 4.1 a Figura 4.8 serão apresentados os gráficos dos deslocamentos verticais das lajes com passos de carga cada 20% da carga de ruptura.

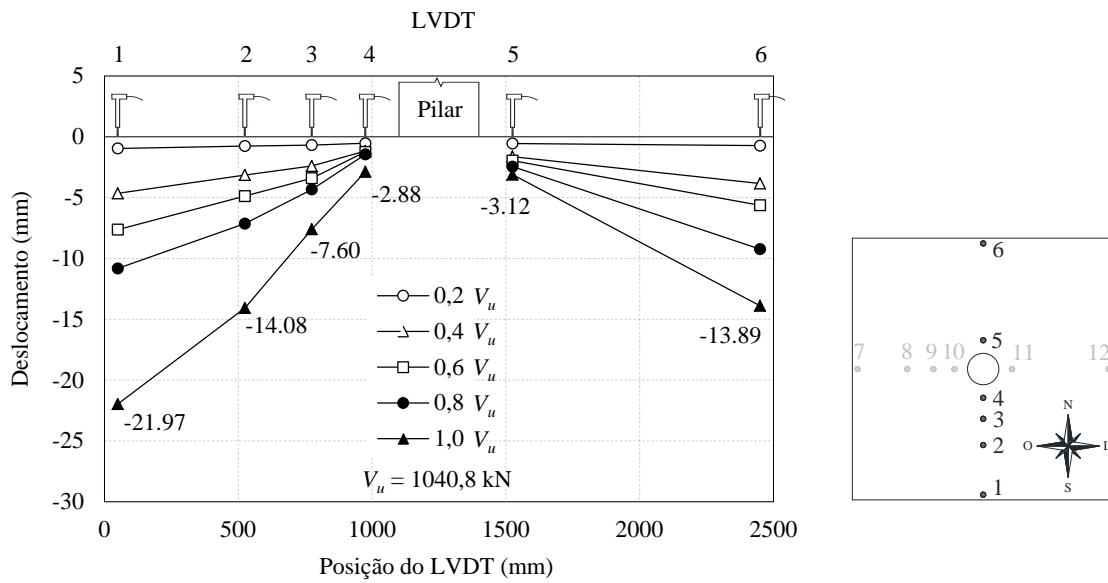


Figura 4.1 – Deslocamentos verticais da laje SS1 (direção S-N)

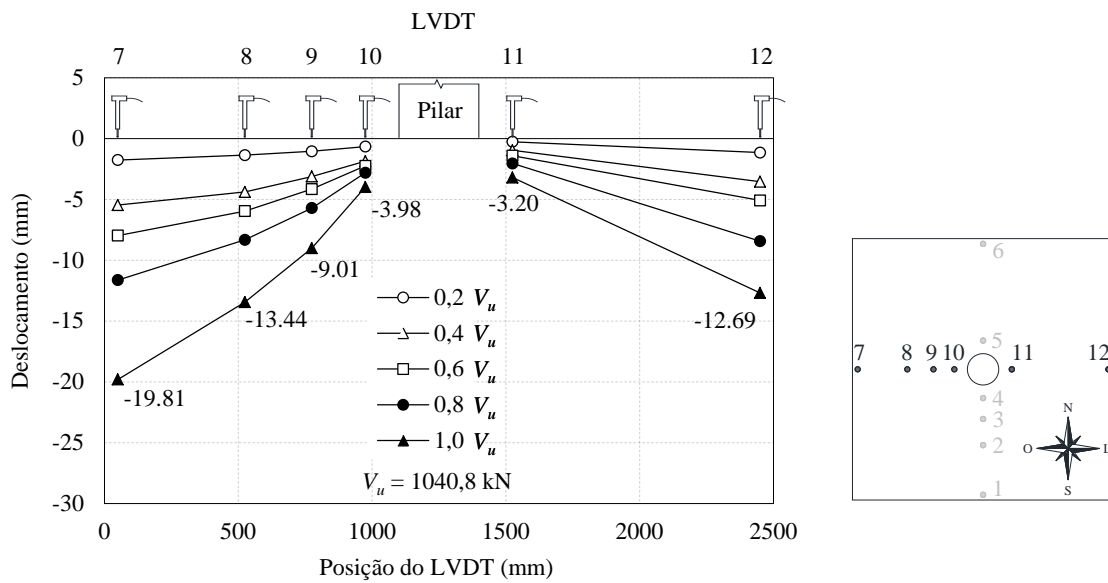


Figura 4.2 – Deslocamentos verticais da laje SS1 (direção O-L)

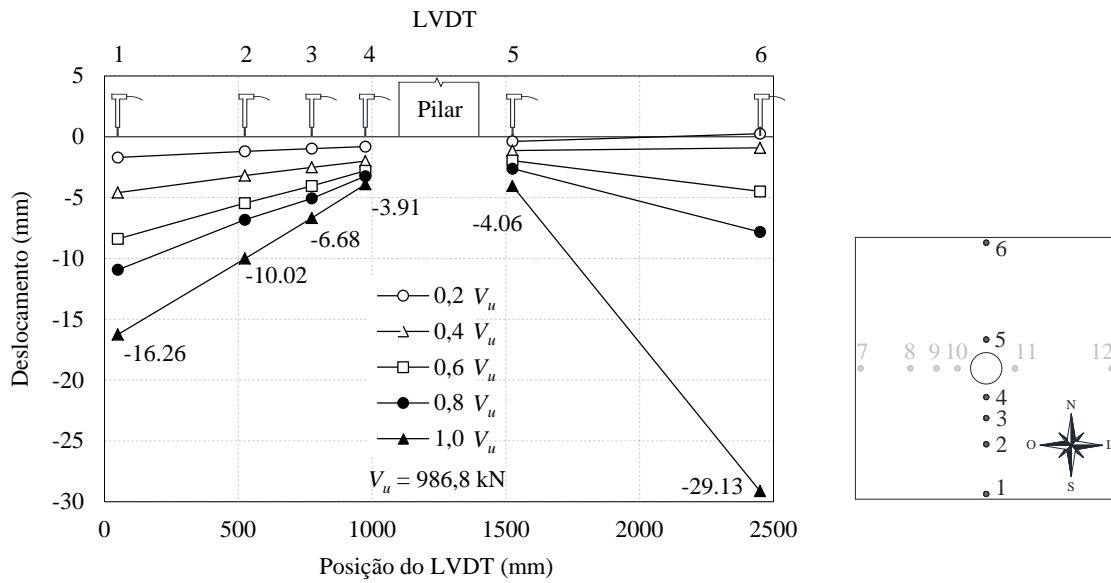


Figura 4.3 – Deslocamentos verticais da laje SS2 (direção S-N)

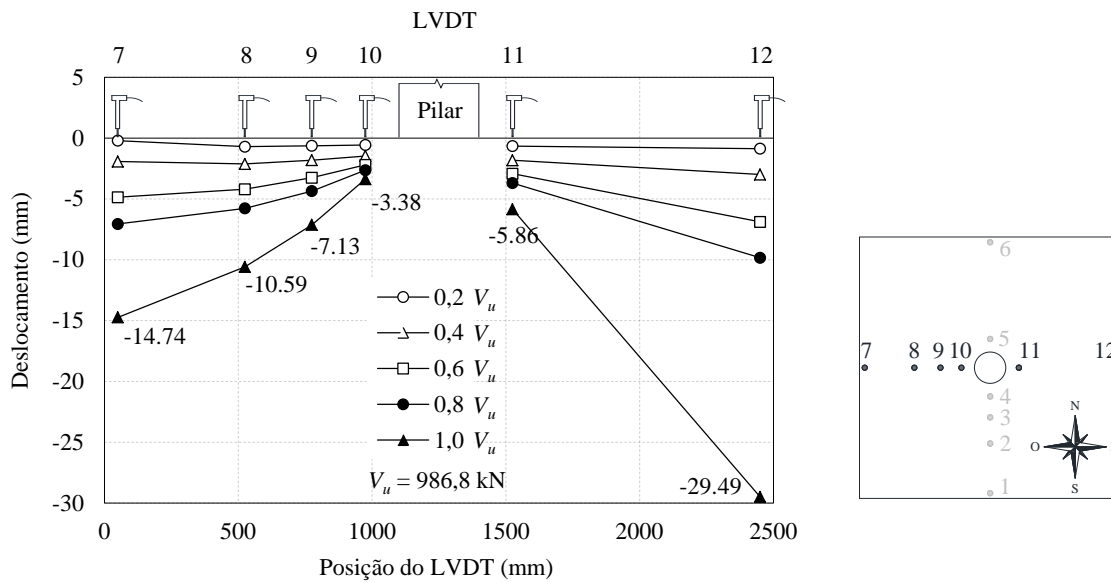


Figura 4.4 – Deslocamentos verticais da laje SS2 (direção O-L)



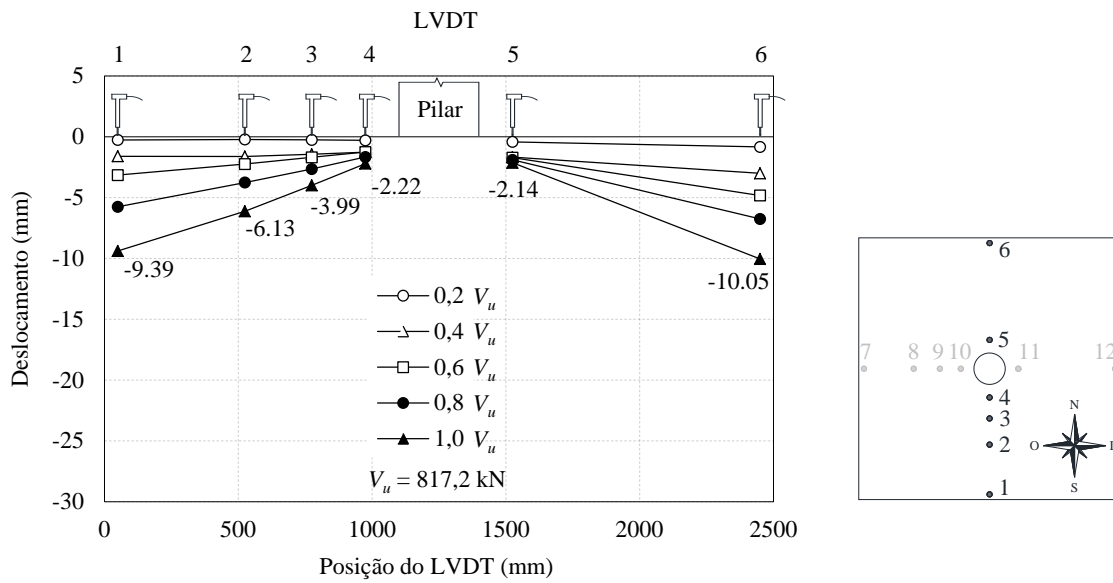


Figura 4.5 – Deslocamentos verticais da laje BD1 (direção S-N)

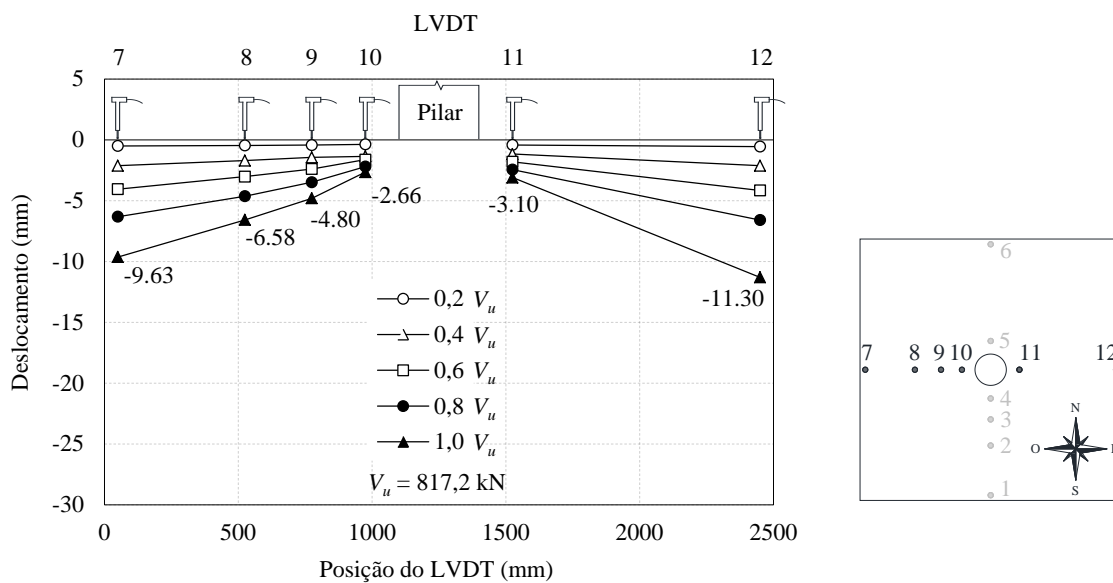


Figura 4.6 – Deslocamentos verticais da laje BD1 (direção O-L)

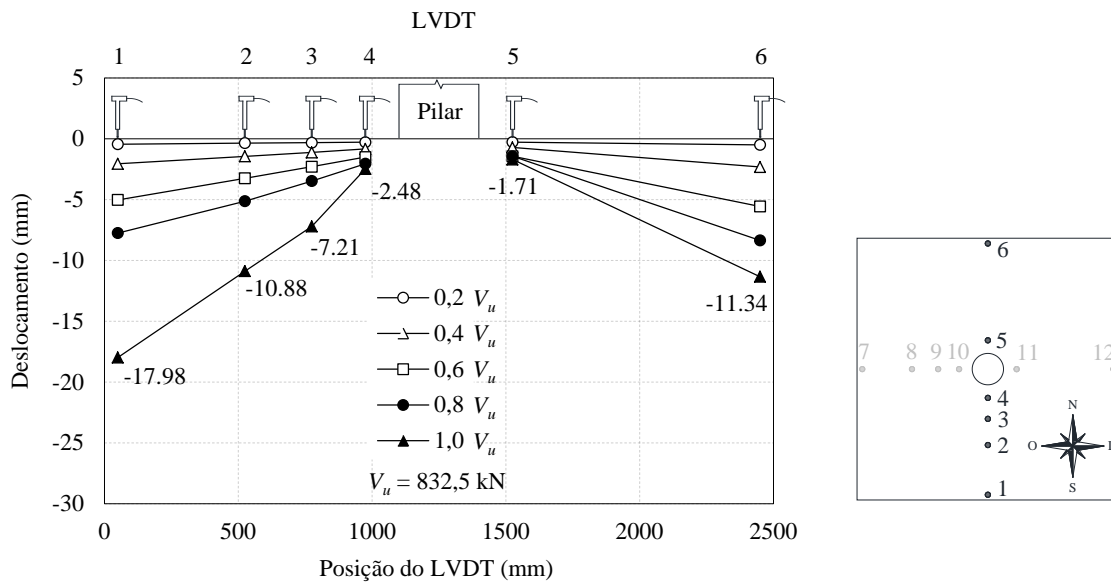


Figura 4.7 – Deslocamentos verticais da laje BD2 (direção S-N)

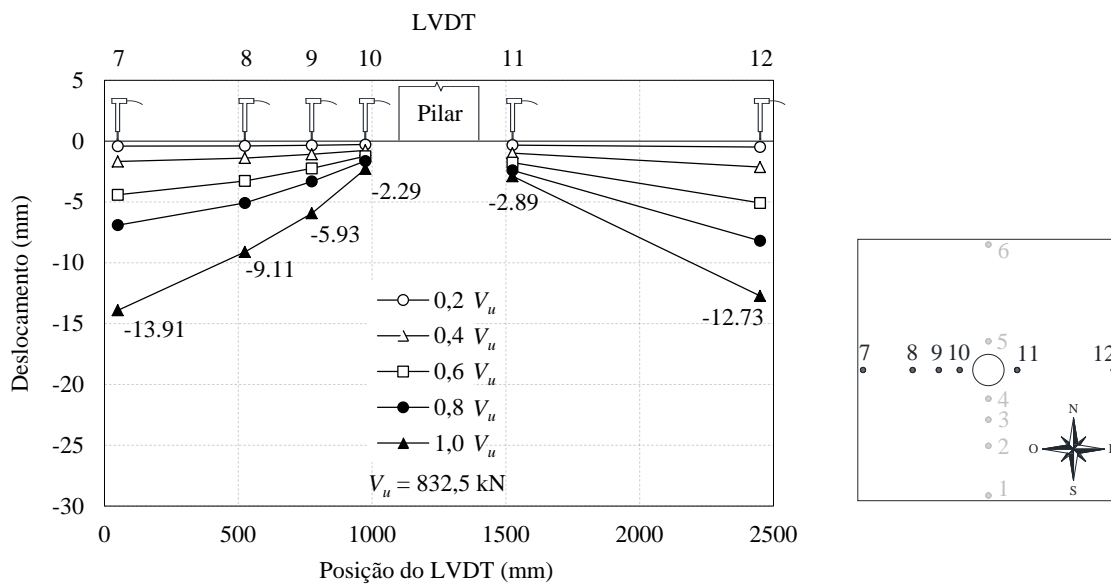


Figura 4.8 – Deslocamentos verticais da laje BD2 (direção O-L)

A Figura 4.9 mostra o gráfico da comparação entre os deslocamentos médios correspondentes aos LVDT's posicionados nas extremidades das lajes.

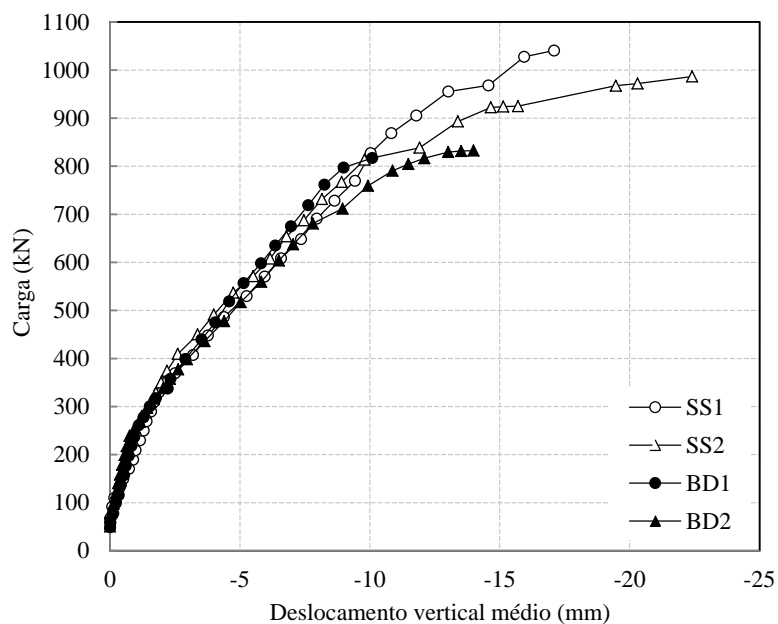


Figura 4.9 – Deslocamentos verticais médios dos extremos (LVDT’s 1, 6, 7 e 12)

### 4.3. DEFORMAÇÕES NA SUPERFÍCIE COMPRIMIDA DO CONCRETO

As deformações na superfície do concreto serão mostradas na Figura 4.10 a Figura 4.13, as mesmas foram obtidas mediante quatro extensômetros, dos para as deformações tangenciais (EC1 e EC2) e dos para as deformações radiais (EC3 e EC4).

As leituras foram realizadas a cada passo de carga durante o ensaio até a ruptura das quatro lajes.

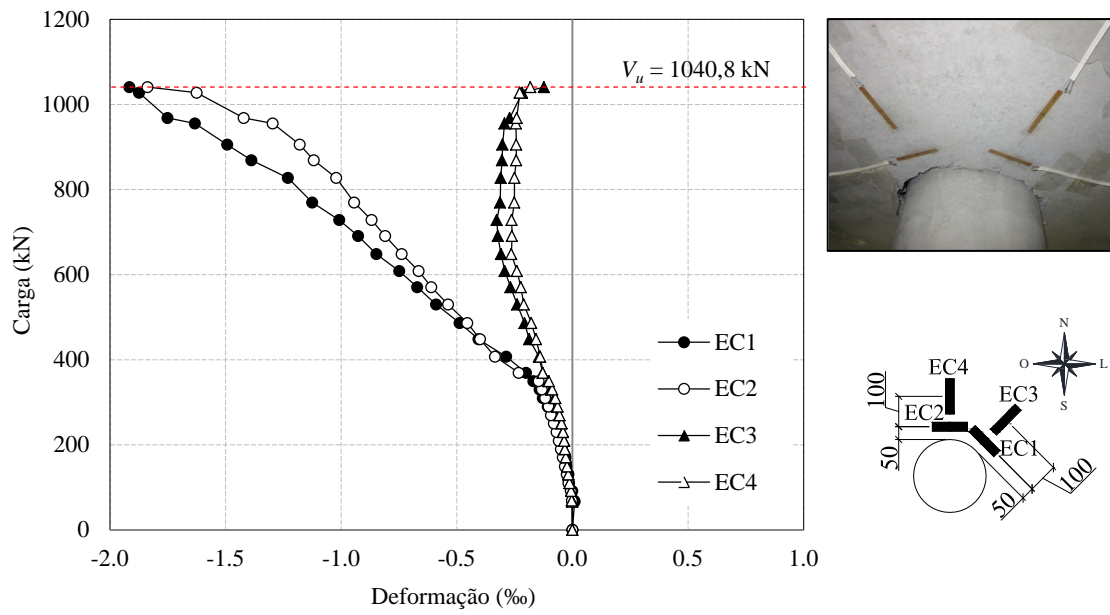


Figura 4.10 – Deformações na superfície do concreto (laje SS1)

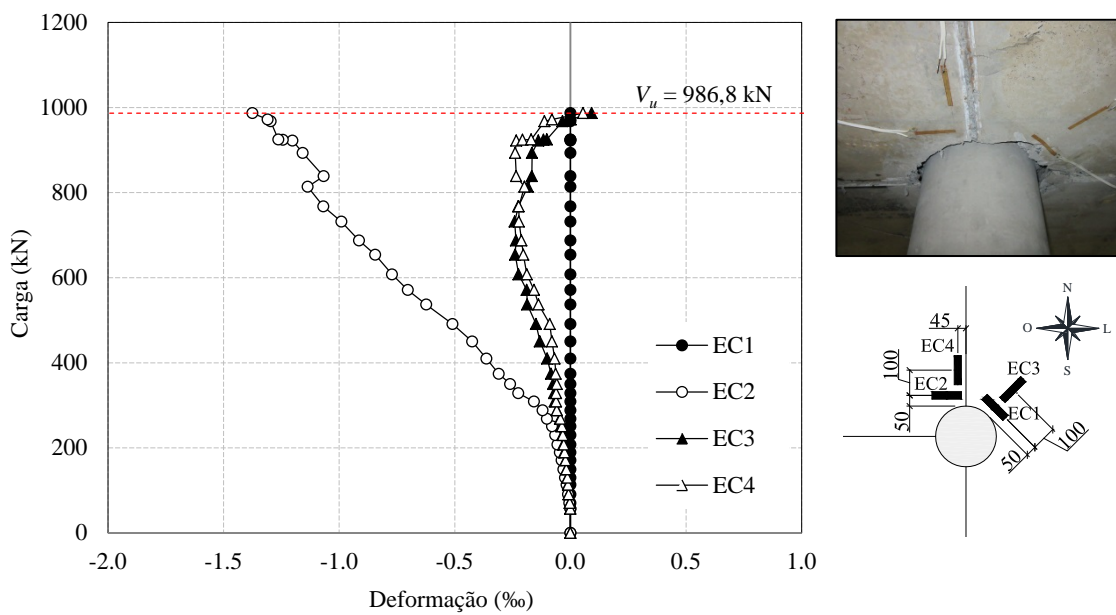


Figura 4.11 – Deformações na superfície do concreto (laje SS2)

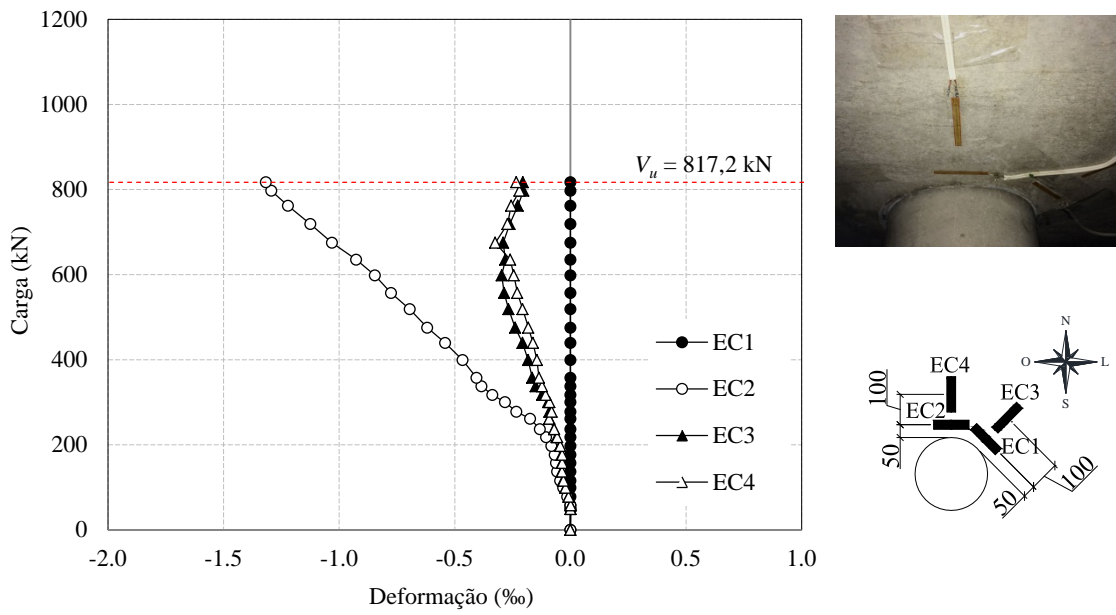


Figura 4.12 – Deformações na superfície do concreto (laje BD1)

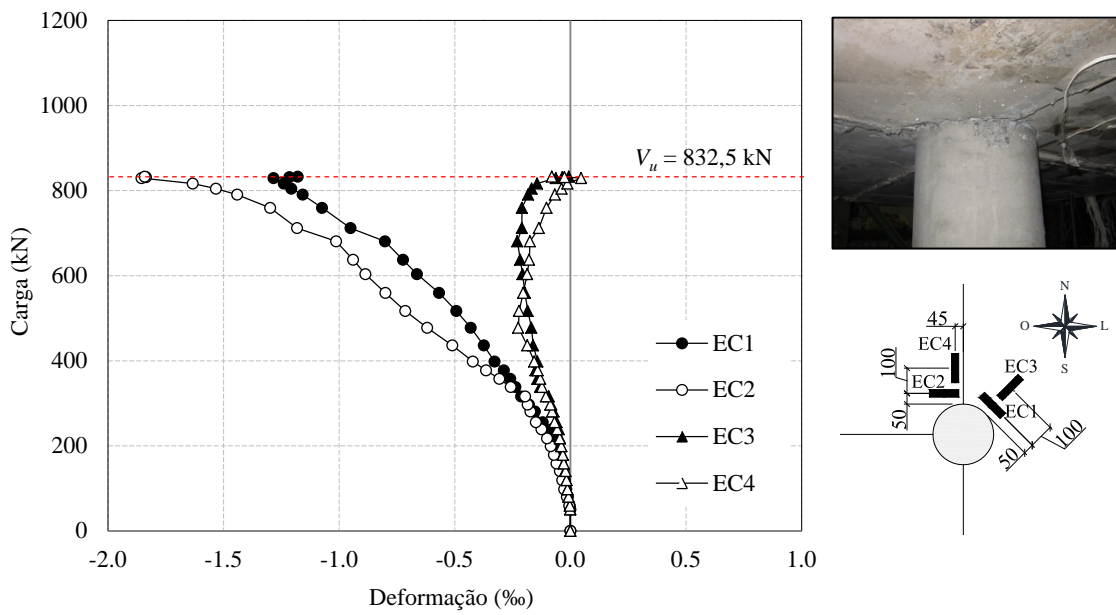


Figura 4.13 – Deformações na superfície do concreto (laje BD2)

#### **4.4. DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO**

Nesta seção serão apresentados os gráficos das deformações nas armaduras de flexão experimentadas durante o ensaio. Foram instrumentadas seis barras de flexão consecutivas e tomada a média aritmética das leituras medidas pelos extensômetros. As leituras foram realizadas a cada passo de carga durante o ensaio a fim de avaliar a distribuição dos esforços de flexão ao longo da seção transversal das lajes, além de auxiliar na avaliação do modo de ruptura das lajes com base no escoamento das barras instrumentadas.

As Figuras 4.14 a 4.17 mostram as leituras registradas a cada 20% da carga de ruptura em função da posição dos extensômetros.

Para o caso da laje SS1 foi adotada a leitura só do extensômetro EF2b no lugar da média dos dois extensômetros diametralmente opostos, pois o extensômetro EF2a foi perdido desde o início do ensaio.

No caso da laje SS2, os extensômetros EF2a e EF2b foram perdidos próximo da carga de ruptura da laje, por tal motivo são apresentadas as leituras para  $0,9 \cdot V_u$ .

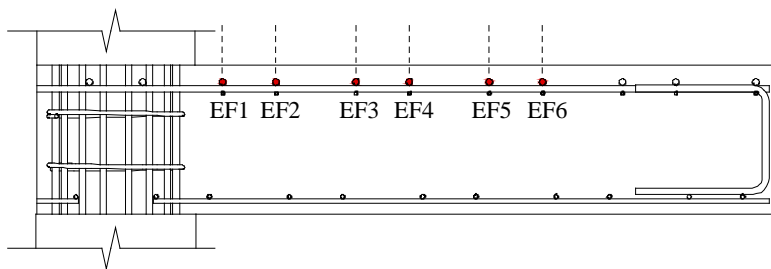
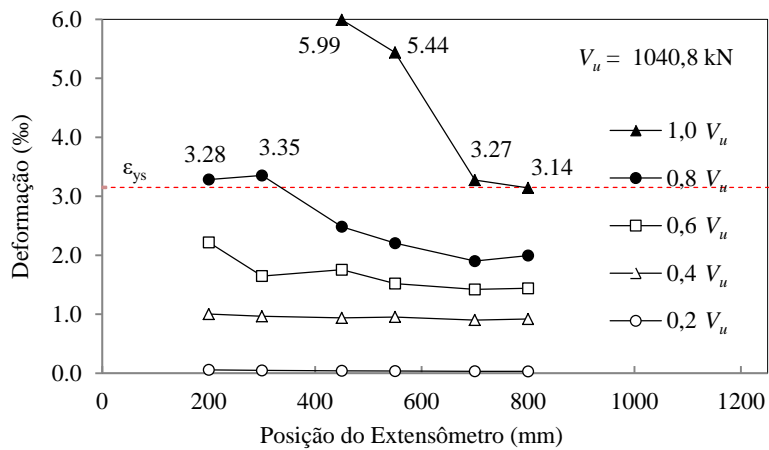


Figura 4.14 – Deformações nas armaduras de flexão (laje SS1)

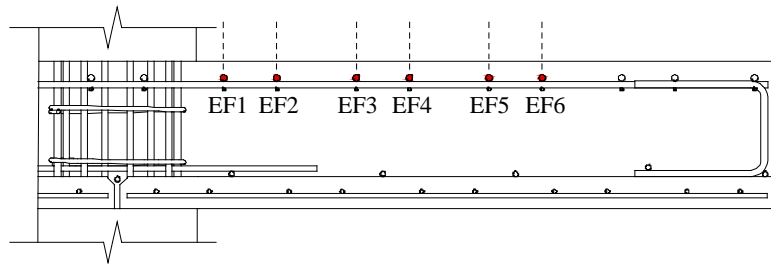
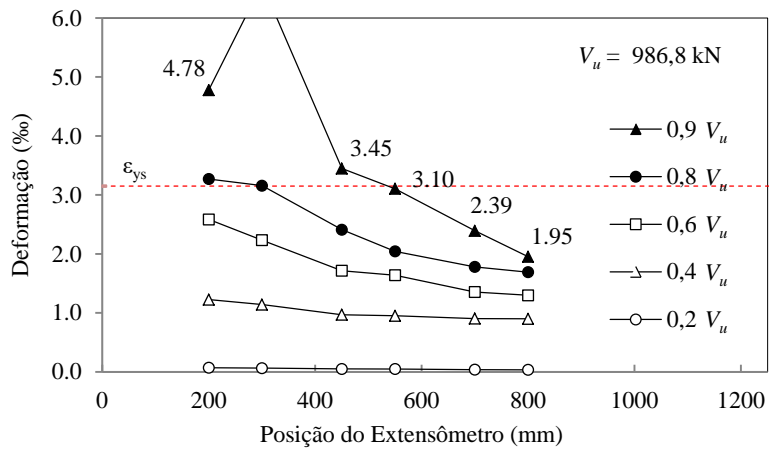


Figura 4.15 – Deformações nas armaduras de flexão (laje SS2)

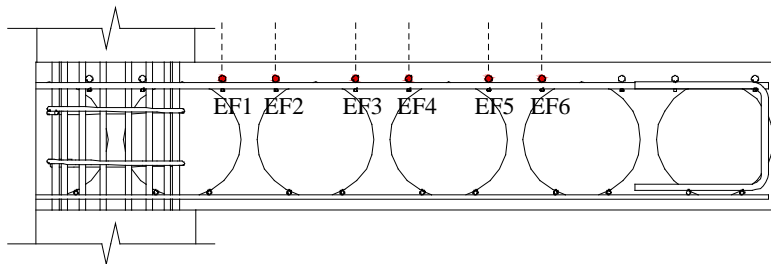
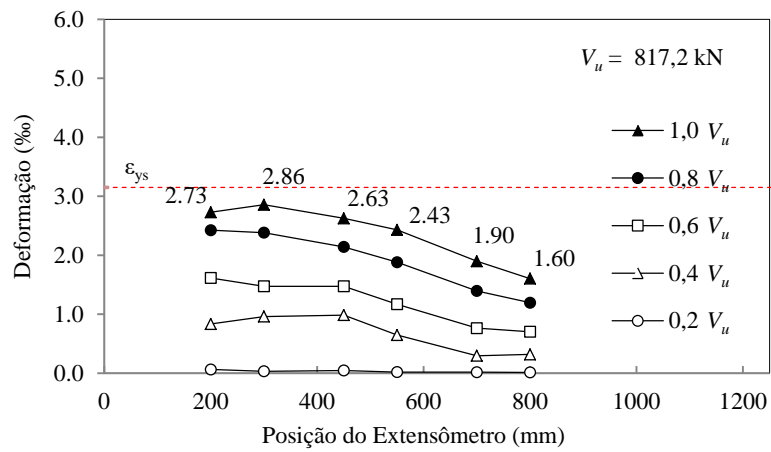


Figura 4.16 – Deformações nas armaduras de flexão (laje BD1)

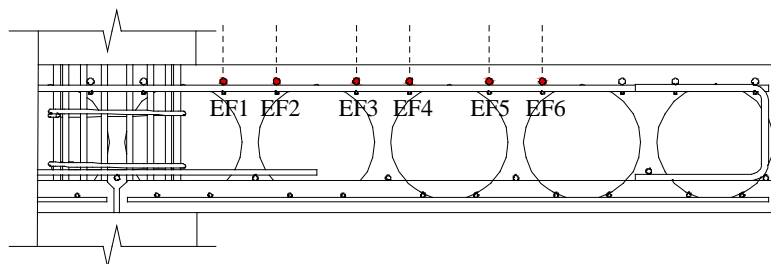
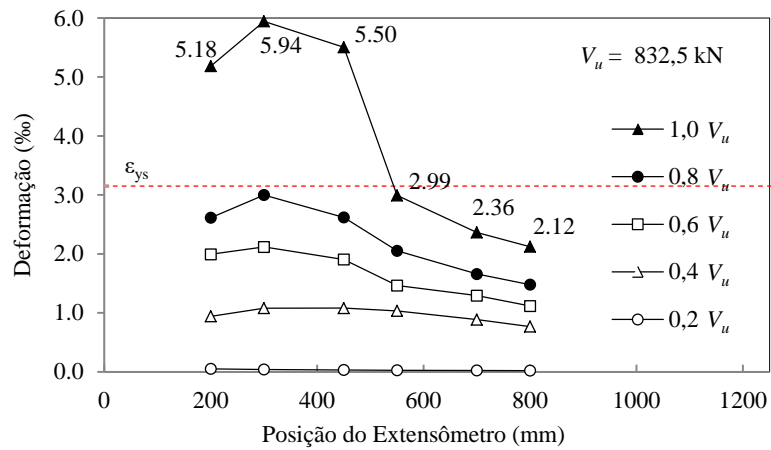


Figura 4.17 – Deformações nas armaduras de flexão (laje BD2)



#### 4.5. DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE CISALHAMENTO

As Figuras 4.18 a 4.21 mostram os gráficos correspondentes às deformações experimentadas pelas armaduras de cisalhamento instrumentadas a cada passo de carga até a ruptura das lajes.

Foram posicionados extensômetros em seis estribos de cada laje para registrar as leituras. O extensômetro EE4 da laje BD2 foi perdido pouco depois do início do ensaio.

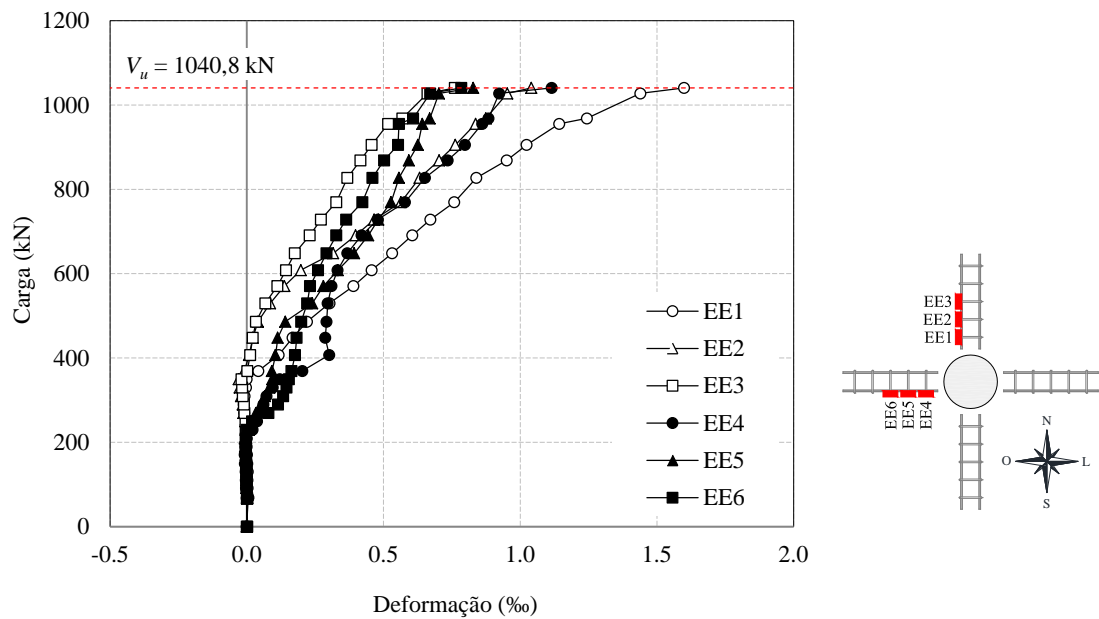


Figura 4.18 – Deformações nas armaduras de cisalhamento (laje SS1)

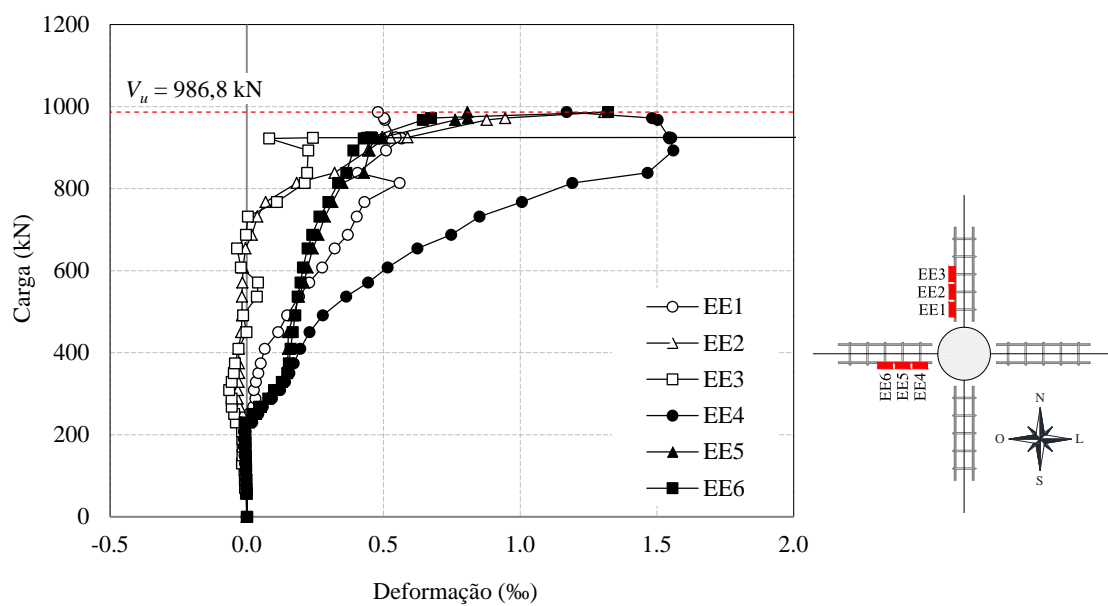


Figura 4.19 – Deformações nas armaduras de cisalhamento (laje SS2)

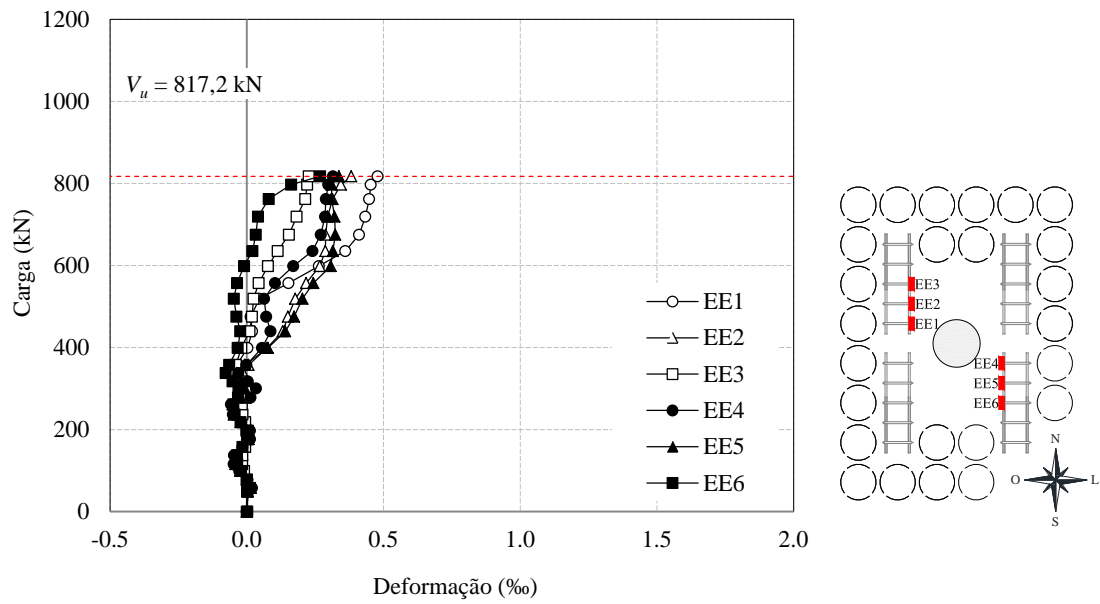


Figura 4.20 – Deformações nas armaduras de cisalhamento (laje BD1)

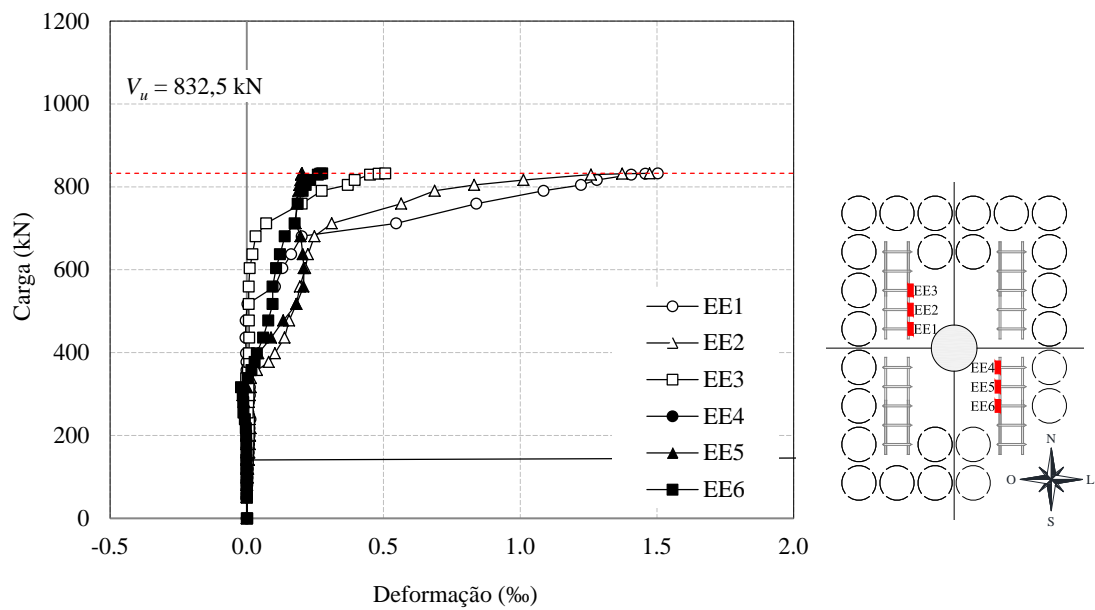


Figura 4.21 – Deformações nas armaduras de cisalhamento (laje BD2)

#### 4.6. MAPA DE FISSURAÇÃO

Para acompanhar o processo de fissuração, foram marcadas as fissuras que iriam sucedendo durante o processo de carregamento das lajes, sendo marcadas a medida que abriam durante o ensaio. Após o término do ensaio eram marcadas totalmente as fissuras até completar o mapa de fissuração mostrado nas Figuras 4.22 à 4.25.

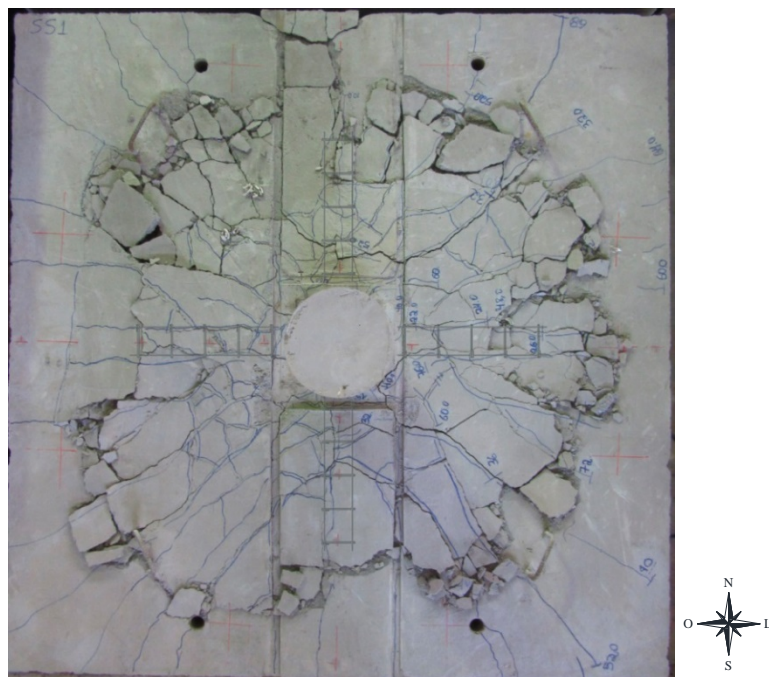


Figura 4.22 – Mapa de fissuração (laje SS1)

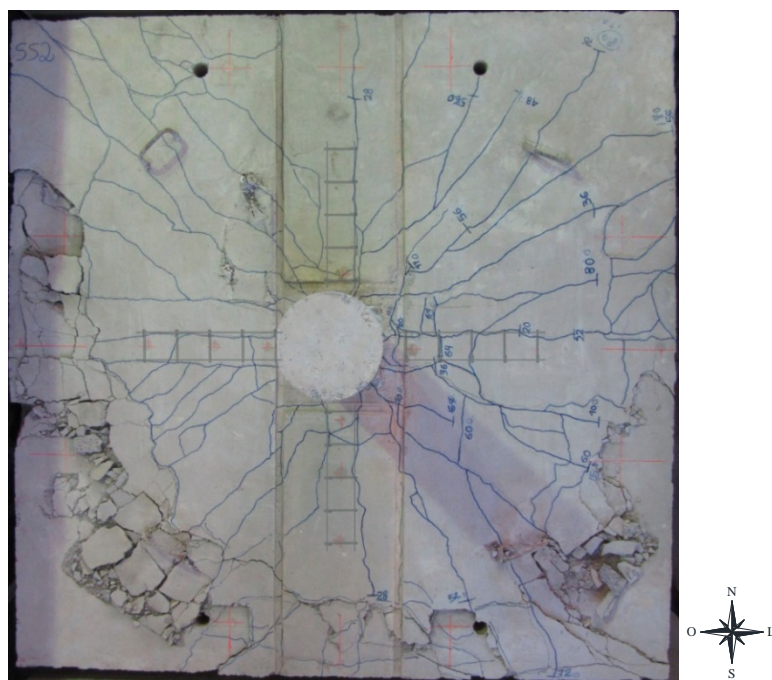


Figura 4.23 – Mapa de fissuração (laje SS2)

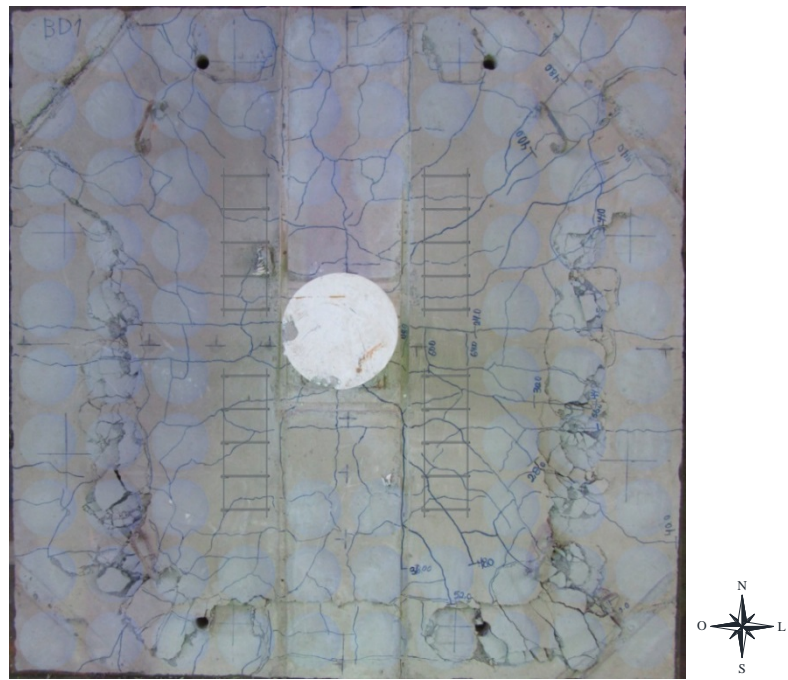


Figura 4.24 – Mapa de fissuração (laje BD1)

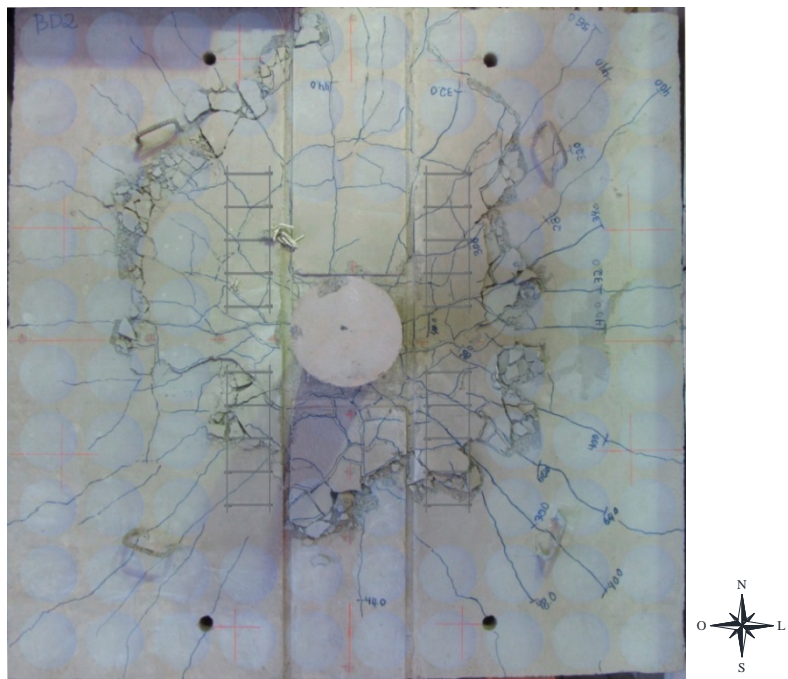


Figura 4.25 – Mapa de fissuração (laje BD2)

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão analisados os resultados experimentais obtidos durante a pesquisa, os pontos a analisar serão as cargas de ruptura e modo de ruptura das lajes, os deslocamentos verticais das lajes, as deformações ocorridas na superfície comprimida do concreto, as deformações nas armaduras de flexão e cisalhamento, o padrão de fissuras marcadas durante os ensaios e por último será feita uma comparação entre as cargas de ruptura experimentais e as estimadas pelas prescrições das normas ACI 318 (2011), EUROCODE 2 (2004) e NBR 6118 (2014).

### 5.1. CARGA DE RUPTURA

A Tabela 5.1 resume as principais características das lajes ensaiadas, as cargas de ruptura experimentais e a resistência à flexão calculada para as lajes.

Tabela 5.1 – Carga de ruptura experimental, resistência à flexão e características principais das lajes

Laje	Tipo	Distribuição dos estribos	$d$ (mm)	$\rho$ (%)	$V_u$ (kN)	$V_{flex}$ (kN)	$V_u / V_{flex}$ (kN)	Modo de Ruptura
SS1	Maciça sem pré-laje	Cruz (ancorado)	232	0,54	1040,8	1380,5	0,75	Flexo-Punção
SS2	Maciça com pré-laje	Cruz (ancorado)	246	0,48	986,8	1467,0	0,67	Flexo-Punção
BD1	<i>BubbleDeck</i> sem pré-laje	Padrão <i>BubbleDeck</i> (não ancorado)	241	0,50	817,2	1436,1	0,57	Punção
BD2	<i>BubbleDeck</i> com pré-laje	Padrão <i>BubbleDeck</i> (não ancorado)	255	0,45	832,5	1522,6	0,55	Punção

Como observado na Tabela 5.1 as lajes *BubbleDeck* atingirem uma carga de ruptura menor que as lajes maciças, a média atingida pelas lajes tipo *BubbleDeck* foi de 824,9 kN e a média atingida pelas lajes maciças foi de 1013,8 kN, o seja, as lajes com tecnologia de fabricação *BubbleDeck* resistiram aproximadamente 20% a menos que as maciças, o qual significa que a redução de 40% para resistência ao cisalhamento proposta pela *BubbleDeck Intransional* é conservador para este caso específico.

Cabe ressaltar que a distribuição dos estribos e a sua ancoragem nas armaduras de flexão influenciou na resistência ao cisalhamento neste tipo de lajes, pois a distribuição proposta pela *BubbleDeck* (Padrão *BubbleDeck*) dispõe os estribos só numa direção e não são ancorados na armadura principal de flexão, diferente das lajes maciças que foram armadas em cruz e com estribos ancorados nas armaduras de flexão.

Em relação à técnica construtiva utilizada (uso ou não de pré-laje), pode-se dizer que a laje SS2 (com pré-laje) resistiu 5% a menos que a laje SS1 (sem pré-laje), valor que não é representativo levando em consideração que os estribos colocados na laje SS2 são menores que os da laje SS1, fator que pode ter influenciado na resistência à punção da laje SS2. Já para o caso das lajes tipo *BubbleDeck*, as quais apresentam igual armadura de cisalhamento, a BD2 (com pré-laje) atingiu a carga última de ruptura 2% superior à carga atingida pela BD1 (sem pré-laje), fatos que demonstram que o uso ou não de pré-laje não influencia na resistência última à punção das lajes.

## **5.2. MODO DE RUPTURA DAS LAJES**

O recomendado para analisar o modo de ruptura das lajes seria cortá-las após os ensaios, observando a existência ou não do cone de punção, sua inclinação e localização.

Como não foi possível executar o corte das lajes, o critério predominante para determinação do tipo de ruptura foi a observação clara do cone de ruptura formado na superfície superior das lajes após os ensaios. Este tipo de ruptura se caracteriza por ocorrer de forma abrupta, verificando-se pequenos deslocamentos nas extremidades das lajes e o não escoamento de parte ou todas as armaduras de flexão dispostas.

No caso de rupturas por flexão, as quais ocorrem de forma dúctil, constata-se um elevado grau de fissuração, escoamento das armaduras de flexão e aumento considerável dos deslocamentos para pequenos passos de carga perto da ruptura.

Com base a Tabela 5.1, a qual compara as cargas atingidas durante os ensaios com as cargas estimadas de ruptura por flexão para cada laje, pode-se dizer que as lajes BD1 e BD2 romperam por punção, baseadas fundamentalmente na observação dos cones de ruptura das mesmas, já para o caso das lajes maciças (SS1 e SS2) pode-se dizer que elas

tiverem uma ruptura por flexo-punção, pois o cone de ruptura é claramente visível nas duas lajes, porém na laje SS1 cinco das seis barras de flexão monitoradas escoaram e a sexta esteve próxima do escoamento no momento da ruptura. Para o caso da SS2, as seis barras instrumentadas escoaram na ruptura.

### **5.3. DESLOCAMENTOS VERTICAIS DAS LAJES**

Observando o gráfico da Figura 4.9 pode-se dizer que as quatro lajes apresentaram deslocamentos médios semelhantes, para um mesmo nível de carga, até a ruptura, fato pelo qual, não se pode afirmar que exista uma diferença na rigidez nítida para estes modelos ensaiados.

As lajes maciças apresentaram maiores deslocamentos na ruptura que as do tipo *BubbleDeck*, associado ao fato das lajes maciças terem atingido maiores cargas últimas, e não ao fato de haver diferença na rigidez das mesmas.

Para o caso da laje SS2, observasse na Figura 4.3 que os deslocamentos medidos na extremidade da laje na direção Norte foram superiores aos medidos na mesma posição na direção Sul, o mesmo ocorreu na direção Oeste-Leste, mostrados na Figura 4.4, onde os deslocamentos medidos na extremidade da laje na direção Leste foram superiores aos medidos na mesma posição na direção Oeste, estas diferenças podem-se atribuir ao fato de que próximo da carga de ruptura e bem difícil controlar as bombas que proporcionam a pressão de óleo aos macacos hidráulicos, além de que a integridade estrutural da laje fica comprometida devido ao alto grau de fissuração da mesma.

### **5.4. DEFORMAÇÕES NA SUPERFÍCIE COMPRIMIDA DO CONCRETO**

Dos gráficos correspondentes as Figuras 4.10 a 4.13, observa-se que em nenhuma das lajes ensaiadas foi atingida a deformação de esmagamento do concreto de 3,5%, os maiores valores alcançados foram de aproximadamente 2%, correspondentes as lajes SS1 e BD2, o qual representa 57% da deformação de esmagamento do concreto.

Entre 200 kN e 250 kN de carregamento, observa-se que as deformações radiais e tangenciais foram similares, valores estes aproximados de carregamento para os quais surgirem as primeiras fissuras radiais nas lajes. Para valores de carga acima destes valores, pode-se observar uma mudança na inclinação dos gráficos das deformações tangenciais, sugerindo maiores deformações para mesmos intervalos de carga.

Para o caso das lajes maciças, observa-se nas Figuras 4.10 e 4.11 que as deformações radiais foram diminuindo a partir dos 700 kN de carga aproximadamente, o mesmo aconteceu para o caso das lajes tipo *BubbleDeck*, onde o valor a partir do qual começaram a diminuir estas deformações foi de 600 kN, destacando que estas deformações chegaram a ser positivas nos valores próximos da ruptura para as lajes com técnica construtiva com pré-laje (SS2 e BD2).

## **5.5. DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO**

Dos gráficos de deformação das armaduras de flexão mostrados nas Figuras 4.14 a 4.17, pode-se inferir que para os casos das lajes SS1 e SS2, as seis barras instrumentadas próximas ao pilar escoaram na ruptura, o que sugere uma ruptura com certa ductilidade, já que todas as seções destas lajes nesta zona plastificaram.

Já para o caso da laje BD2 só escoaram as três barras mais próximas ao pilar, e na laje BD1 nenhuma barra escoou na ruptura, o que sugere uma ruptura brusca, típica de punção.

## **5.6. DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE CISALHAMENTO**

Observa-se nos gráficos das Figuras 4.18 a 4.21 que as maiores deformações registradas durante os ensaios aconteceram nos estribos mais próximos do pilar, sendo 0,5‰ para EE1 da laje BD1, 1,5‰ de EE1 para laje BD2, 1,6‰ para EE1 da laje SS1 e 1,6‰ para EE4 correspondente à laje SS2. Valores estes abaixo do escoamento do aço utilizado nas armaduras de cisalhamento (3,6‰), correspondendo a 44% da deformação de escoamento para o aço utilizado, no caso dos estribos com maiores deformações registrados.



Vale ressaltar para o caso das lajes *BubbleDeck*, diferentemente das maciças, que os estribos atingiram deformação de apenas 0,5‰, a exceção dos estribos instrumentados pelos extensômetros EE1 e EE2 correspondente à laje BD2, como mostrado nos gráficos das Figuras 4.20 e 4.21, valor este que representa menos de 15% da deformação de escoamento para o aço utilizado. Os valores obtidos para as lajes do tipo *BubbleDeck* se devem principalmente ao fato da distribuição em só numa direção das armaduras de cisalhamento e pela falta de ancoragem na armadura principal de flexão.

Para o caso de comparação entre as leituras obtidas pelos extensômetros posicionados nas armaduras de cisalhamento das lajes maciças SS1 e SS2, ver gráficos das Figuras 4.18 e 4.19, observa-se que para o caso da laje SS1 a maioria dos estribos apresentaram deformações superiores às dos estribos da laje SS2. Esta diferença pode ser atribuída ao fato dos estribos da laje SS2 serem menores que os da laje SS1.

Observa-se que para todas as lajes ensaiadas os estribos começaram a serem solicitados a partir de cargas superiores aos 200 kN, carga na qual surgiram as primeiras fissuras radiais.

## 5.7. MAPAS DE FISSURAÇÃO

Foi constatado que as lajes começaram a fissurar em um nível de carga médio de  $0.25 \cdot V_u$  e que estas se propagaram radialmente ao redor da área carregada até em média  $0.50 \cdot V_u$ , momento este em que surgiram as primeiras fissuras tangenciais. Após o nível de carga  $0.50 \cdot V_u$ , foi observado que as fissuras radiais existentes apenas abriam e que mais fissuras tangenciais surgiam ao redor da área carregada. Este comportamento manteve-se até o momento da ruptura da laje.

Baseados nos mapas de fissuração, Figuras 4.22 à 4.25, pode-se dizer que a laje SS1 teve uma ruptura aparentemente fora, fato que irá ser comprovado apenas ao serem cortadas as lajes, pois neste caso a superfície visível do cone de punção se encontra próximo da última camada das armaduras de cisalhamento. Para o caso da laje SS2 observa-se que o cone de ruptura encontra-se um pouco mais distante da última camada de armadura de cisalhamento, apresentando um cone de ruptura de maior diâmetro que o observado para o caso da laje SS1, o qual sugere que esta laje teve uma ruptura fora das armaduras de cisalhamento.

Já para o caso das lajes tipo *BubbleDeck*, o cone de punção não segue a visualização padrão do cone circular de punção na vista em planta, observando-se uma marcada distribuição assimétrica seguindo a distribuição das armaduras dispostas só numa direção sugeridas pela *BubbleDeck International*. Define-se com maior precisão esta assimetria no caso da laje BD1. Nesta, observa-se que o cone de punção encontra-se suficientemente afastado da última camada de armadura de cisalhamento sugerindo que a ruptura desta laje aconteceu fora das armaduras de cisalhamento. Já para o caso da laje BD2 pelo observado no mapa de fissuração da Figura 4.25, deduz-se que a mesma rompeu fora das armaduras de cisalhamento dispostas na direção Norte e passando pelas armaduras na direção Sul.

## **5.8. ANÁLISE DAS PRESCRIÇÕES NORMATIVAS DO ACI 318 (2011), EUROCODE 2 (2004) E NBR 6118 (2014)**

Neste ponto será feita uma comparação das cargas calculadas pelos modelos teóricos correspondentes as normativas americana ACI 318 (2011), europeia EUROCODE 2 (2004) e brasileira NBR 6118 (2014), com as cargas obtidas experimentalmente para as quatro lajes ensaiadas (SS1, SS2, BD1 e BD2).

### **5.8.1. Cargas de ruptura previstas pelo ACI 318 (2011)**

Nesta seção serão apresentados os resultados correspondentes às cargas de ruptura previstas pelos modelos teóricos de ruptura a punção do ACI 318 (2011), tratando todas as lajes como se fossem maciças, o seja, sem descontar os vazios deixados pelas esferas para o caso das lajes tipo *BubbleDeck*.

Com o fim de comparar os resultados obtidos experimentalmente com as prescrições normativas, serão analisados os resultados correspondentes a esta pesquisa como continuidade da pesquisa de LIMA (2015), dados estes últimos os quais serão também incluídos nesta análise.

As principais características para as lajes a serem analisadas estão apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Características das lajes a comparar

Autor	Laje	Tipo	$h$ (mm)	$d$ (mm)	$c$ (mm)	$\rho$ (%)	$f'_c$ (MPa)	$\phi_t$ (mm)	$V_u$ (kN)
<b>LEDO (2016)</b>	SS1	Maciça sem pré-laje	280	232	300	0,54	44,6	8,0	1040,8
	SS2	Maciça com pré-laje	280	246	300	0,48	44,6	8,0	986,8
	BD1	<i>BubbleDeck</i> sem pré-laje	280	241	300	0,50	44,6	8,0	817,2
	BD2	<i>BubbleDeck</i> com pré-laje	280	255	300	0,45	44,6	8,0	832,5
<b>LIMA (2015)</b>	RSP	Maciça sem pré-laje	280	238	300	0,41	47,7	–	858,0
	BD28-P1	<i>BubbleDeck</i> sem pré-laje	280	250	300	0,39	47,7	–	642,0
	BD28-P2	<i>BubbleDeck</i> com pré-laje	280	255	300	0,39	47,7	–	651,0
	BD28-P3	<i>BubbleDeck</i> com pré-laje	280	255	300	0,39	47,7	6,3	697,0

Tabela 5.3 – Cargas de ruptura pelo modelo teórico ACI 318 (2011)

Autor	Laje	$V_u$ (kN)	$V_{int}$ (kN)	$V_c$ (kN)	$V_{Tcs}$ (kN)	$V_{out}$ (kN)	$V_{ACI}$ (kN)	$V_u / V_{ACI}$	$M_{RUP,U} / M_{RUP,ACI}$
<b>LEDO (2016)</b>	SS1	1040,8	1294,8	-	753,7	1357,2	753,7	1,38	OUT/IN
	SS2	986,8	1409,0	-	811,4	1452,0	811,4	1,22	OUT/IN
	BD1	817,2	1367,7	-	790,7	1455,1	790,7	1,03	OUT/IN
	BD2	832,5	1484,6	-	849,3	1555,8	849,3	0,98	IN/IN
<b>LIMA (2015)</b>	RSP	858,0	1389,1	916,8	-	-	916,8	0,94	TD/TD
	BD28-P1	642,0	1491,7	984,5	-	-	984,5	0,65	TD/TD
	BD28-P2	651,0	1535,4	1013,3	-	-	1013,3	0,64	TD/TD
	BD28-P3	697,0	1535,4	-	789,1	1056,1	789,1	0,88	OUT/IN

### **Modos de ruptura:**

*EB*: Ruptura produto do esmagamento do concreto na diagonal comprimida.

*TD*: Ruptura por tração diagonal do concreto para lajes sem armadura de cisalhamento.

*IN*: Ruptura por tração diagonal do concreto para lajes com armadura de cisalhamento na zona armada a cisalhamento.

*OUT*: Ruptura por tração diagonal do concreto para lajes com armadura de cisalhamento na zona fora das armaduras dispostas.

Da Tabela 5.3 observa-se que para o caso das lajes maciças SS1 e SS2 a normativa americana mostra-se conservadora em quanto à resistência para as lajes maciças armadas a punção, já para o caso das lajes tipo *BubbleDeck*, sem armadura de cisalhamento, tende a superestimar de forma considerável a resistência a punção para este tipo de lajes.

### **5.8.2. Cargas de ruptura previstas pelo EUROCODE 2 (2004)**

Nesta seção serão apresentados os resultados correspondentes às cargas de ruptura previstas pelos modelos teóricos de ruptura a punção do EUROCODE 2 (2004), tratando-se de todas as lajes como se fossem maciças, o seja, sem descontar os vazios deixados pelas esferas para o caso das lajes tipo *BubbleDeck*.

Tabela 5.4 – Cargas de ruptura pelo modelo teórico EUROCODE 2 (2004)

<b>Autor</b>	<b>Laje</b>	<b><math>V_u</math> (kN)</b>	<b><math>V_{int}</math> (kN)</b>	<b><math>V_c</math> (kN)</b>	<b><math>V_{Tcs}</math> (kN)</b>	<b><math>V_{out}</math> (kN)</b>	<b><math>V_{EC}</math> (kN)</b>	<b><math>V_u/V_{EC}</math></b>	<b><math>M_{RUP,U} / M_{RUP,EC}</math></b>
<b>LEDO (2016)</b>	SS1	1040,8	2403,7	-	1069,4	1064,7	1064,7	0,98	<i>OUT / OUT</i>
	SS2	986,8	2548,7	-	1132,6	1127,4	1127,4	0,88	<i>OUT / OUT</i>
	BD1	817,2	2496,9	-	1109,8	1503,4	1109,8	0,74	<i>OUT / IN</i>
	BD2	832,5	2642,0	-	1175,5	1559,7	1175,5	0,71	<i>IN / IN</i>
<b>LIMA (2015)</b>	RSP	858,0	2597,4	870,1	-	-	870,1	0,99	<i>TD / TD</i>
	BD28-P1	642,0	2728,4	922,5	-	-	922,5	0,70	<i>TD / TD</i>
	BD28-P2	651,0	2783,0	951,0	-	-	951,0	0,68	<i>TD / TD</i>
	BD28-P3	697,0	2783,0	-	1057,4	1126,2	1057,4	0,66	<i>OUT / IN</i>

Da Tabela 5.4 observa-se que para o caso das lajes maciças o EUROCODE 2 (2004) mostra-se preciso, já para o caso das lajes tipo *BubbleDeck*, com ou sem armadura de cisalhamento e desconsiderando os vazios deixados pelas esferas, o mesmo, tende a superestimar de forma considerável a resistência a punção para este tipo de lajes.

### 5.8.3. Cargas de ruptura previstas pela NBR 6118 (2014)

Nesta seção serão apresentados os resultados correspondentes às cargas de ruptura previstas pelos modelos teóricos de ruptura a punção da NBR 6118 (2014), tratando-se de todas as lajes como se fossem maciças, o seja, sem descontar os vazios deixados pelas esferas para o caso das lajes tipo *BubbleDeck*.

Tabela 5.5 – Cargas de ruptura pelo modelo teórico NBR 6118 (2014)

Autor	Laje	$V_u$ (kN)	$V_{int}$ (kN)	$V_c$ (kN)	$V_{Tcs}$ (kN)	$V_{out}$ (kN)	$V_{NBR}$ (kN)	$V_u / V_{NBR}$	$M_{RUP,U} / M_{RUP,NBR}$
<b>LEDO (2016)</b>	SS1	1040,8	2163,3	-	1174,5	1247,9	1174,5	0,89	OUT / IN
	SS2	986,8	2293,9	-	1239,0	1057,4	1057,4	0,93	OUT / OUT
	BD1	817,2	2247,2	-	1215,8	1698,8	1215,8	0,67	OUT / IN
	BD2	832,5	2377,8	-	1282,6	1768,0	1282,6	0,65	IN / IN
<b>LIMA (2015)</b>	RSP	858,0	2337,7	879,8	-	-	879,8	0,98	TD / TD
	BD28-P1	642,0	2455,6	932,8	-	-	932,8	0,69	TD / TD
	BD28-P2	651,0	2504,7	961,6	-	-	961,6	0,68	TD / TD
	BD28-P3	697,0	2504,7	-	1145,8	1324,4	1145,8	0,61	OUT / IN

Da Tabela 5.5 observa-se que para o caso das lajes maciças a normativa brasileira se mostra precisa, já para o caso das lajes tipo *BubbleDeck*, com ou sem armadura de cisalhamento, esta normativa tende a superestimar de forma considerável a resistência a punção para este tipo de lajes.

### 5.9. CARGAS DE RUPTURA SEGUNDO PRESCRIÇÕES DA *BUBBLEDECK INTERNATIONAL*

Nesta seção serão apresentados os resultados correspondentes às cargas de ruptura previstas seguindo as recomendações de cálculo da *BubbleDeck International*, a qual recomenda reduzir em 40% a resistência ao cisalhamento neste tipo de laje em relação às mesmas calculadas como maciças, devido aos vazios deixados pelas esferas plásticas.

Na Tabela 5.6 são exibidos os resultados das cargas de ruptura estimadas para o ACI 318 (2011), EUROCODE 2 (2004) e NBR 6118 (2014), reduzidas em 40% para as lajes de tipo *BubbleDeck*.

Tabela 5.6 – Cargas de ruptura segundo recomendações da *BubbleDeck International*

Autor	Laje	$V_u$ (kN)	$V_{ACI,60\%}$ (kN)	$V_u/V_{ACI,60\%}$	$V_{EC,60\%}$ (kN)	$V_u/V_{EC,60\%}$	$V_{NBR,60\%}$ (kN)	$V_u/V_{NBR,60\%}$
<b>LEDO (2016)</b>	SS1	1040,8	753,7	1,38	1064,7	0,98	1174,5	0,89
	SS2	986,8	811,4	1,22	1127,4	0,88	1057,4	0,93
	BD1	817,2	474,4	1,72	665,9	1,23	729,5	1,12
	BD2	832,5	509,6	1,63	705,3	1,18	769,6	1,08
<b>LIMA (2015)</b>	RSP	858,0	916,8	0,94	870,1	0,99	879,8	0,98
	BD28-P1	642,0	590,7	1,09	553,5	1,16	559,7	1,15
	BD28-P2	651,0	608,0	1,07	570,6	1,14	577,0	1,13
	BD28-P3	697,0	473,5	1,47	634,4	1,10	687,5	1,01

Da Tabela 5.6 observa-se que os resultados obtidos pelas três normas são conservadores do ponto de vista de resistência, considerando a redução da capacidade resistente ao cisalhamento em 40%, utilizado pela *BubbleDeck International*. Destacando que o ACI 318 (2011) apresenta os resultados mais conservadores para este tipo de laje armadas à punção, já para as não armadas, as três normas proporcionam resultados similares.

Vale ressaltar que apesar deste método ser conservador, não permite determinar com grau de precisão adequado o tipo de ruptura da laje, pois se deve admitir a laje como maciça, fato que não é real, pois os perímetros críticos calculados não consideram os vazios deixados pelas esferas, que podem subestimar ou superestimar em determinados casos a verificação dentro e fora da linha de armaduras.

#### **5.10. PROPOSTA DE ADAPTAÇÃO AO ACI 318 (2011), EUROCODE 2 (2004) E NBR 6118 (2014)**

Com o intuito de obter resultados mais precisos que os recomendados pela *BubbleDeck International* no cálculo da resistência à punção para lajes *BubbleDeck*, será feita nesta seção, uma adaptação às normativas vigentes, que consiste em subtrair, para cada perímetro crítico calculado, a área dos vazios deixados pelas esferas que o interceptam. Para isto, será descontada a área do círculo, com diâmetro igual à corda que resulta da intercepção do perímetro crítico com o vazio esférico interceptado.

Esta adaptação proposta, diferente da redução proposta pela *BubbleDeck International*, não reduz a capacidade total resistente da laje, que reduziria as parcelas de aço e

concreto indistintamente, se não que, reduz apenas a parcela referente ao concreto inexistente devido aos vazios deixados pelas esferas plásticas.

A Figura 5.1 mostra um detalhe da área descontada produto da intercepção do perímetro crítico com os vazios deixados pelas esferas plásticas.

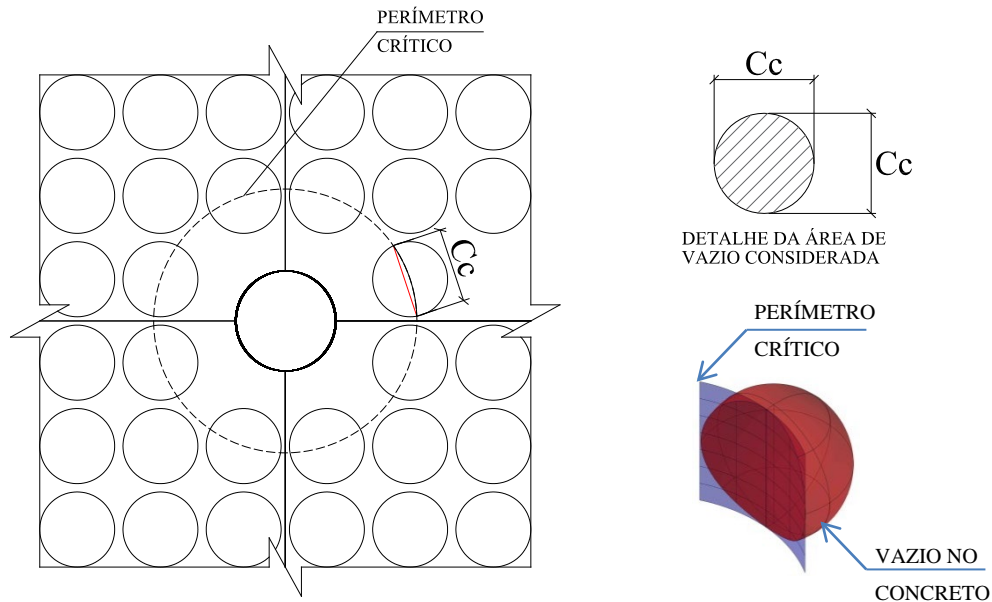


Figura 5.1 – Detalhe da área de vazio gerado pelo comprimento de arco da esfera cortada pelo perímetro crítico

A formulação proposta às normas para considerar os vazios deixados pelas esferas plásticas pode ser visualizada na Equação 5.1.

$$A_{c,ef} = u \cdot d - \sum \frac{\pi \cdot C_c^2}{4} \quad \text{Equação 5.1}$$

Sendo:

$A_{c,ef}$ : Área efetiva de concreto na seção do perímetro crítico considerando os vazios;

$u$ : Perímetro crítico na seção de análise;

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

$C_c$ : Comprimento da corda correspondente ao arco gerado pela intercepção do perímetro crítico e a zona de vazio interceptada.

A seguir serão apresentados os resultados das lajes analisadas com a proposta de modificação da área efetiva de concreto para cada uma das normativas. As células em destaque representam as alterações dos resultados em relação as lajes *BubbleDeck* consideradas como maciças.

### 5.10.1. Cargas de ruptura previstas pelo ACI 318 (2011) considerando os vazios para lajes tipo *BubbleDeck*

Tabela 5.7 – Cargas de ruptura considerando os vazios pelo ACI 318 (2011)

Autor	Laje	$V_u$ (kN)	$V_{int}$ (kN)	$V_c$ (kN)	$V_{Tcs}$ (kN)	$V_{out}$ (kN)	$V_{ACI}$ (kN)	$V_u / V_{ACI}$	$M_{RUP,U} / M_{RUP,ACI}$
<b>LEDO (2016)</b>	SS1	1040,8	1294,8	-	753,7	1357,2	753,7	1,38	OUT/IN
	SS2	986,8	1409,0	-	811,4	1452,0	811,4	1,22	OUT/IN
	BD1	817,2	1367,7	-	790,7	938,2	790,7	1,03	OUT/IN
	BD2	832,5	1484,6	-	849,3	1065,8	849,3	0,98	IN/IN
<b>LIMA (2015)</b>	RSP	858,0	1389,1	916,8	-	-	916,8	0,94	TD/TD
	BD28-P1	642,0	1491,7	984,5	-	-	984,5	0,65	TD/TD
	BD28-P2	651,0	1535,4	1013,3	-	-	1013,3	0,64	TD/TD
	BD28-P3	697,0	1535,4	-	789,1	771,0	771,0	0,90	OUT/OUT

Da Tabela 5.7 pode-se dizer que as cargas estimadas para as lajes *BubbleDeck* armadas à punção, BD1, BD2 e BD28-P3, mostram resultados satisfatórios, fato associado ao perímetro crítico estar afastado a  $0,5d$  da face do pilar, e não interceptar a superfície com vazios. Nota-se que para o caso do perímetro crítico fora da região de armaduras, as resistências diminuiriam em relação às lajes calculadas como maciças, destacadas nas células em cinza, devido ao perímetro crítico interceptar as superfícies com vazios.

Já para o caso das lajes *BubbleDeck* sem armadura de cisalhamento, BD28-P1 e BD28-P2, os resultados mostram-se insatisfatórios, evidenciando para o caso destas lajes que a norma tende a superestimar a resistência à punção das mesmas, fato associado, fundamentalmente, ao critério do afastamento do perímetro crítico à  $0,5d$  da face do pilar, que não passa por uma região de vazios esféricos.



### 5.10.2. Cargas de ruptura previstas pelo EUROCODE 2 (2004) considerando os vazios para lajes tipo *BubbleDeck*

Tabela 5.8 – Cargas de ruptura considerando os vazios pelo EUROCODE 2 (2004)

Autor	Laje	$V_u$ (kN)	$V_{int}$ (kN)	$V_c$ (kN)	$V_{Tcs}$ (kN)	$V_{out}$ (kN)	$V_{EC}$ (kN)	$V_u/V_{EC}$	$M_{RUP,U} / M_{RUP,EC}$
<b>LEDO (2016)</b>	SS1	1040,8	2403,7	-	1069,4	1064,7	1064,7	0,98	OUT/OUT
	SS2	986,8	2548,7	-	1132,6	1127,4	1127,4	0,88	OUT/OUT
	BD1	817,2	2496,9	-	857,3	1010,0	857,3	0,95	OUT/IN
	BD2	832,5	2642,0	-	897,3	1049,3	897,3	0,93	IN/IN
<b>LIMA (2015)</b>	RSP	858,0	2597,4	870,1	-	-	870,1	0,99	TD/TD
	BD28-P1	642,0	2728,4	505,7	-	-	505,7	1,27	TD/TD
	BD28-P2	651,0	2783,0	508,6	-	-	508,6	1,28	TD/TD
	BD28-P3	697,0	2783,0	-	725,6	743,1	725,6	0,96	OUT/IN

Da Tabela 5.8, diferente dos resultados obtidos para a adaptação feita à normativa ACI 318 (2011), observa-se que os valores correspondentes às parcelas de resistência para ruptura passando dentro e fora das armaduras de cisalhamentos mudaram, o que se deve aos perímetros críticos definidos por esta normativa encontrar-se afastado  $2d$  e  $1,5d$  desta região, respectivamente.

As cargas calculadas pelo EUROCODE 2 (2004), aplicando a adaptação proposta, mostram-se satisfatórias para as lajes *BubbleDeck* armadas à punção, caso das lajes BD1, BD2 e BD28-P3. Para o caso das não armadas, BD28-P1 e BD28-P2 obtêm-se resultados bem conservadores.

Observa-se como os modos de ruptura teóricos não variaram mesmo sendo considerados os vazios no interior das lajes.

### 5.10.3. Cargas de ruptura previstas pela NBR 6118 (2014) considerando os vazios para lajes tipo *BubbleDeck*

Tabela 5.9 – Cargas de ruptura considerando os vazios pela NBR 6118 (2014)

Autor	Laje	$V_u$ (kN)	$V_{int}$ (kN)	$V_c$ (kN)	$V_{Tcs}$ (kN)	$V_{out}$ (kN)	$V_{NBR}$ (kN)	$V_u/V_{NBR}$	$M_{RUP,U}/M_{RUP,NBR}$
<b>LEDO (2016)</b>	SS1	1040,8	2163,3	-	1174,5	1247,9	1174,5	0,89	OUT/IN
	SS2	986,8	2293,9	-	1239,0	1057,4	1057,4	0,93	OUT/OUT
	BD1	817,2	2247,2	-	954,0	869,9	869,9	0,94	OUT/OUT
	BD2	832,5	2377,8	-	994,0	1103,4	994,0	0,84	IN/IN
<b>LIMA (2015)</b>	RSP	858,0	2337,7	879,8	-	-	879,8	0,98	TD/TD
	BD28-P1	642,0	2455,6	511,3	-	-	511,3	1,26	TD/TD
	BD28-P2	651,0	2504,7	514,3	-	-	514,3	1,27	TD/TD
	BD28-P3	697,0	2504,7	-	801,7	773,4	773,4	0,90	OUT/OUT

As cargas calculadas pela NBR 6118 (2014) aplicando a adaptação proposta para as lajes *BubbleDeck* armadas à punção, BD1, BD2 e BD28-P3, mostram-se ligeiramente anti-conservadoras. Para o caso das lajes sem armadura de cisalhamento, BD28-P1 e BD28-P2, obtêm-se resultados conservadores.

## 5.11. COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE CÁLCULO ANALISADOS

Nesta seção será apresentada na Tabela 5.10 a comparação dos resultados obtidos para os diferentes critérios de cálculos desenvolvidos.

A fim de validar o melhor método a empregar para a obtenção da carga de ruptura à punção serão comparados os resultados das cargas estimadas pelos métodos teóricos e os obtidos experimentalmente de cada um dos critérios utilizados.

Tabela 5.10 – Comparação dos resultados dos modelos de cálculo analisados

Autor	Laje	$V_u$ (kN)	Considerando maciças			<i>BubbleDeck</i> <i>International</i>			Considerando os vazios		
			$V_u/V_{ACI}$	$V_u/V_{EC}$	$V_u/V_{NBR}$	$V_u/V_{ACI,60\%}$	$V_u/V_{EC,60\%}$	$V_u/V_{NBR,60\%}$	$V_u/V_{ACI}$	$V_u/V_{EC}$	$V_u/V_{NBR}$
<b>LEDO</b> <b>(2016)</b>	SS1	1040,8	1,38	0,98	0,89	1,38	0,98	0,89	1,38	0,98	0,89
	SS2	986,8	1,22	0,88	0,93	1,22	0,88	0,93	1,22	0,88	0,93
	BD1	817,2	1,03	0,74	0,67	1,72	1,23	1,12	1,03	0,95	0,94
	BD2	832,5	0,98	0,71	0,65	1,63	1,18	1,08	0,98	0,93	0,84
<b>LIMA</b> <b>(2015)</b>	RSP	858,0	0,94	0,99	0,98	0,94	0,99	0,98	0,94	0,99	0,98
	BD28-P1	642,0	0,65	0,70	0,69	1,09	1,16	1,15	0,65	1,27	1,26
	BD28-P2	651,0	0,64	0,68	0,68	1,07	1,14	1,13	0,64	1,28	1,27
	BD28-P3	697,0	0,88	0,66	0,61	1,47	1,10	1,01	0,90	0,96	0,90

Analisando os resultados dos diferentes critérios estudados, pode-se dizer, que para o caso das lajes *BubbleDeck* armadas ao cisalhamento, BD1, BD2 e BD28-P3, as previsões mais precisas foram as do ACI 318 (2011) e o EUROCODE 2 (2004), considerando a área efetiva de concreto ( $A_{c,ef}$ ), ou seja, subtraindo os vazios deixados pelas esferas plásticas.

Para o caso das lajes *BubbleDeck* sem armadura de cisalhamento, os melhores resultados foram obtidos pelo critério proposto pela recomendação da *BubbleDeck International* de reduzir em 40% a capacidade resistente ao cisalhamento, sendo aplicado o modelo teórico de punção do ACI 318 (2011).

Considerando as lajes como maciças, os modelos teóricos para o ACI 318 (2011), EUROCODE 2 (2004) e NBR 6118 (2014) superestimam a resistência das lajes *BubbleDeck*. Para o caso das modificações sugeridas por subtração das áreas de vazios o ACI 318 (2011) para as lajes *BubbleDeck* sem armadura de punção se mostra extremamente anti-conservador, superestimando os valores de resistência destas lajes; já o EUROCODE 2 (2004) e a NBR 6118 (2014) são extremamente conservadores para estas lajes, subestimando a resistência das mesmas entre 25% e 30% da carga de ruptura experimental.

Os resultados comparativos mostrados na Tabela 5.10 são apresentados nas Figuras 5.2 a 5.4, com o fim de visualizar graficamente os resultados comparativos da relação entre as cargas últimas experimentais e as estimadas pelas normas, e deste modo, avaliar a precisão com que cada uma das normas se adapta as propostas estudadas.

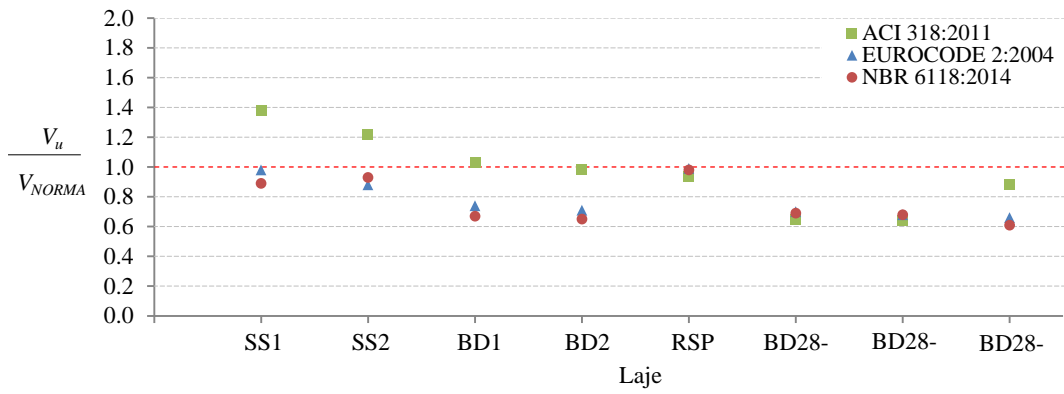


Figura 5.2 – Razão entre a carga de ruptura experimental e a estimada pelas normas.  
(Variante considerando as lajes como maciças)

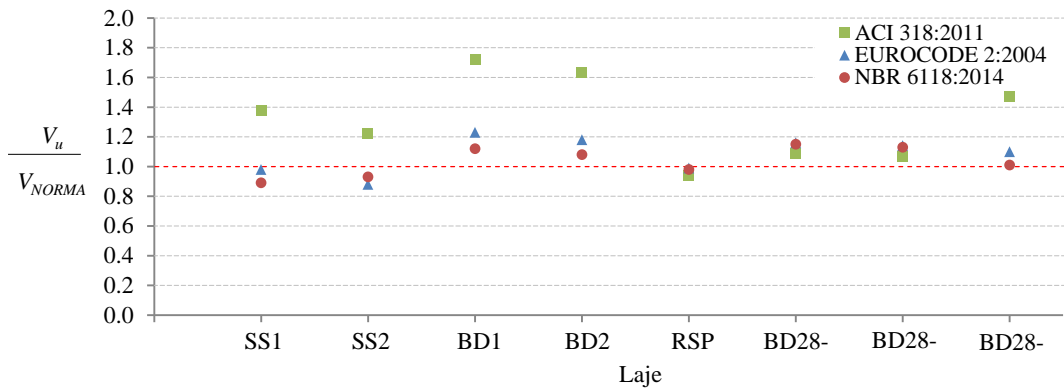


Figura 5.3 – Razão entre a carga de ruptura experimental e a estimada pelas normas.  
(Variante aplicando recomendação da *BubbleDeck International*)

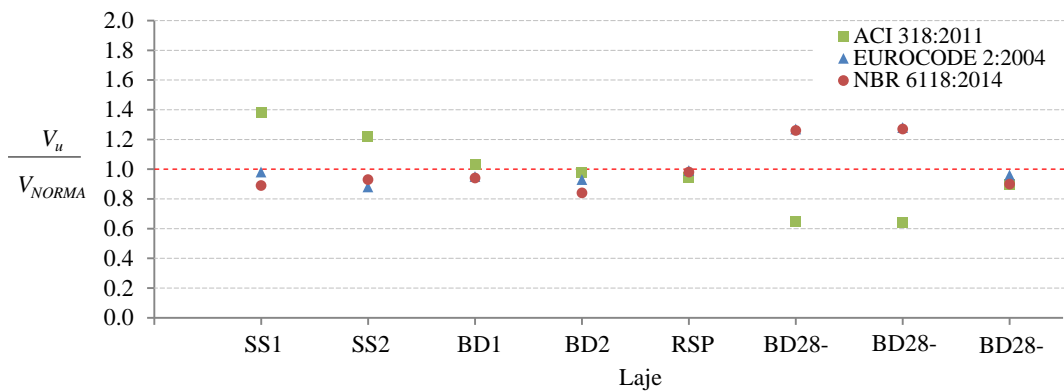


Figura 5.4 – Razão entre a carga de ruptura experimental e a estimada pelas normas.  
(Variante considerando os vazios nas lajes)

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou experimentalmente a resistência à punção de quatro lajes submetidas a carregamento simétrico, todas confeccionadas e ensaiadas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília. Foram ensaiadas duas lajes maciças, denominadas de SS1 e SS2, e duas de tipo *BubbleDeck*, denominadas de BD1 e BD2, todas com mesma altura e mesma taxa de armadura de flexão, porém com diferentes altura útil.

As maciças foram confeccionadas com estribos distribuídos em cruz e ancorados na armadura de flexão, variando apenas a técnica construtiva utilizada para ambas, sendo que, para a laje SS2 foi utilizada uma pré-laje de 60 mm de espessura. Já para o caso das duas lajes tipo *BubbleDeck*, a distribuição utilizada para dispor a armadura de cisalhamento foi o padrão sugerido pela *BubbleDeck International*, que não estava ancorada na armadura de flexão principal, para o caso da laje BD2, foi empregada pré-laje com 60mm de espessura.

As lajes *Bubbledeck* BD1 e BD2 atingiram cargas de ruptura menores que as lajes maciças SS1 e SS2, a média atingida pelas lajes tipo *Bubbledeck* foi de 824,9 kN e a média atingida pelas lajes maciças foi de 1013,8 kN, ou seja, as lajes com tecnologia de fabricação *Bubbledeck* resistiram aproximadamente 20% menos que as maciças. Portanto, a redução de 40% para resistência ao cisalhamento, proposta pela *Bubbledeck International*, é conservadora para este caso específico. Já para a análise comparativa entres as lajes com e sem pré-laje, verificamos que seu uso não influenciou na resistência última à punção das lajes.

Com base nos critérios definidos para o modo de ruptura: visualização do cone de ruptura, cargas últimas de flexão estimadas, deslocamentos verticais, deformações nas armaduras de flexão e deformações na superfície do concreto, pode-se dizer, que as lajes SS1 e SS2 romperam por flexo-punção e as lajes BD1 e BD2 romperam por punção.

As quatro lajes apresentaram deslocamentos verticais médios semelhantes até a ruptura, fato pelo qual, não se pode afirmar que exista uma diferença nítida na rigidez para estes modelos ensaiados.

Não foi atingido o valor de deformação de esmagamento do concreto de 3,5‰ em nenhuma das quatro lajes, os máximos valores atingidos foram de aproximadamente 2‰, o qual representa 57% da resistência de esmagamento do concreto.

Pelo observado nos mapas de fissuração, as lajes SS2 e BD1 romperam fora das armaduras de cisalhamento dispostas. A laje SS1 teve uma ruptura aparentemente fora, fato que irá ser comprovado apenas ao serem cortadas as lajes, pois neste caso a superfície visível do cone de punção se encontra próximo da última camada das armaduras de cisalhamento, o qual indica que a ruptura pode ter acontecido passando pelas armaduras. Já a laje BD2 teve uma ruptura incomum, pois a configuração do cone de punção visível sugere que a laje rompeu passando pelas armaduras de cisalhamento na direção sul, e fora das mesmas na direção norte.

Analisando as prescrições normativas do ACI 318 (2011), EUROCODE 2 (2004) e NBR 6118 (2014), pode-se dizer, que para o caso das lajes *BubbleDeck* armadas ao cisalhamento, BD1, BD2 e BD28-P3, as previsões mais precisas foram as do ACI 318 (2011) e o EUROCODE 2 (2004), considerando a área efetiva de concreto.

Para as lajes *BubbleDeck* sem armadura de cisalhamento, os melhores resultados foram obtidos pelo critério proposto pela recomendação da *BubbleDeck International*, sendo aplicado o modelo teórico de punção da NBR 6118 (2014); para o caso das modificações sugeridas, por subtração das áreas de vazios, o ACI 318 (2011) superestima os valores de resistência para estas lajes, enquanto o EUROCODE 2 (2004) e a NBR 6118 (2014) subestimam sua resistência.

## 6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- I. Uniformar a distribuição das armaduras para o combate a punção dispostas nas lajes maciças de referencia e tipo *BubbleDeck*, com o fim de se poderem comparar de forma direta e mais precisa os resultados obtidos nos ensaios.
- II. Realizar mais ensaios de lajes tipo *BubbleDeck* no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília, com o fim de se ter uma amplo banco de dados e poder assim avaliar a influência de parâmetros tais como: altura da laje, espaçamento das esferas plásticas, geometria e dimensões do pilar e taxa de armadura de flexão, parâmetros estes que influenciam de forma direta na resistência a punção em lajes lisas de concreto armado.
- III. Variar a distribuição e tipo de armadura de cisalhamento utilizada e ancorar devidamente as mesmas na armadura de flexão para lajes tipo *BubbleDeck*.
- IV. Melhorar o sistema de ensaio para o caso de ensaios de punção centrada, pois seria bem mais simples o uso de um só macaco e uma ou duas células de cargas utilizadas no ensaio, minorando de forma considerável o risco de aplicação de momentos desbalanceados nas lajes produto da aplicação de cargas diferentes nas quatro laterais das lajes, sejam estas por erro humano o do equipamento.
- V. Aplicar momentos desbalanceados as lajes com o intuito de comparar os resultados obtidos com as sugestões propostas as normativas avaliadas, além de conferir se os resultados se enquadrariam com as recomendações propostas pela *BubbleDeck International*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALBUQUERQUE, N. G. *Análise Experimental de Lajes Lisas Nervuradas de Concreto Armado com Região Maciça de Geometria Variável ao Funcionamento*. Belém. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, 2009, 190 pp.
- [2] ALDEJOHANN, M. *Zum Querkrafttragverhalten von Hohlkörperdecken mit zweiachsiger Lastabtragung*. Doktor-Ingenieurs, Universität Duisburg-Essen, Alemanha, 2008, pp. 129-133.
- [3] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318 (2011). ACI Committee 318 – *Building Code Requirements for Structural Concrete*, Farmington Hills, Michigan, 2011.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 (2007). *Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 (2014). *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222 (2011). *Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- [7] A. CHURAKOV. *Biaxial hollow slab with innovative types of voids*. Saint-Petersburg Polytechnical University, 29 Polytechnicheskaya st., St.Petersburg, 195251, Russia, pp. 71-88.
- [8] BAZANT, Z. P. e CAO, Z., *Size Effect in Punching Shear Failure of Slabs*. ACI Structural Journal, January-February 1987. N° 84S6.
- [9] BOMPA, D. V. e ONET, T., *An incursion on punching of reinforced concrete flat slabs*. BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IA, SI Publicat de Universitatea Tehnica, Gheorghe Asachi" din Iasi Tomul LV (LIX), Fasc. 2, 2009, 10 pp.



- [10] BRÆSTRUP, M. W. W.; NIELSEN, M.P.; JENSEN, B.C.; BACH, F. (1976). *Axisymmetric Punching of Plain and Reinforced Concrete*. Structural Research Laboratory, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark, Report, N°. R-75, 1976, 33 pp.
- [11] BUBBLEDECK BRASIL, disponível em <<http://www.bubbledeck.com.br>>, Acesso em: 28 de agosto de 2015.
- [12] CANEIRO, J. A. H. e SANTANA J. J. H., *Hormigón Estructural, Diseño por estados límites, Parte I*, 2010. Versión enfocada al código ACI 318 “Building Code Requirements for Structural Concrete”.
- [13] EUROCODE 2 (2004). *Design of Concrete Structures, Part 1, General rules and rules for buildings*, CEN, EN 1992-1-1, Brussels, Belgium, 2004.
- [14] 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 pp.
- [15] GUANDALINI, OLIVER L. BURDET, AURELIO MUTTONI, *Punching Test of Slabs with Low Reinforcement Ratios*, ACI Structural Journal, January-February 2009, pp. 87-95.
- [16] 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.
- [17] LAI, T., *Structural Behavior of BubbleDeck Slabs And Their Application to Lightweight Bridge Decks*. Msc-Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2010. 41 pp.
- [18] 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.

- [19] MACGREGOR, J. G and WIGHT, J. K. (2012) *Reinforced Concrete, Mechanics and Design 6<sup>th</sup> Edition*. Upper Saddle River, New Jersey.
- [20] MELO, G. S. S. A., *Behavior of Reinforced Concrete Flat Slabs after Local Failure*. PhD Thesis, Polytechnic of Central London, London, England, 1990, 214 pp.
- [21] MENETRY, P., *Relationships between Flexural and Punching Failure*, ACI Structural Journal, July-August 1998, pp. 412–417.
- [22] MUTTONI, A., *Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs Without Transverse Reinforcement*, ACI Structural Journal, July-August 2008, pp. 440–450.
- [23] 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.
- [24] WOOD, J. G. M., *Pipers Row Car Park - Wolverhampton Quantitative Study of the Causes of the Partial Collapse on 20th March 1997*. Report presented to Structural Studies & Design Ltd, England, 1997. 209pp.

# APÊNDICE A – LEITURAS REGISTRADAS DURANTE OS ENSAIOS

## A.1 – DESLOCAMENTOS VERTICAIS DAS LAJES

### Laje Maciça (SS1)

Passo de Carga	Carga Total (KN)	LVDT01 (mm)	LVDT02 (mm)	LVDT03 (mm)	LVDT04 (mm)	LVDT05 (mm)	LVDT06 (mm)	LVDT07 (mm)	LVDT08 (mm)	LVDT09 (mm)	LVDT10 (mm)	LVDT11 (mm)	LVDT12 (mm)
1	66.9	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	68.9	-0.04	0.02	0.02	0.01	-0.01	-0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	91.8	-0.21	-0.15	-0.11	-0.02	-0.02	0.06	-0.10	-0.09	-0.08	-0.05	-0.05	-0.08
4	110.2	-0.15	-0.13	-0.11	-0.04	-0.08	-0.16	-0.18	-0.18	-0.15	-0.10	-0.12	-0.16
5	130.3	-0.23	-0.20	-0.18	-0.11	-0.17	-0.31	-0.54	-0.43	-0.34	-0.21	-0.14	-0.36
6	149.3	-0.35	-0.29	-0.27	-0.19	-0.25	-0.42	-0.76	-0.60	-0.47	-0.29	-0.19	-0.51
7	170.8	-0.41	-0.37	-0.35	-0.27	-0.37	-0.63	-1.15	-0.88	-0.67	-0.41	-0.21	-0.73
8	189.7	-0.59	-0.49	-0.46	-0.36	-0.44	-0.66	-1.41	-1.07	-0.82	-0.51	-0.25	-0.89
9	209.4	-0.77	-0.63	-0.57	-0.44	-0.49	-0.67	-1.50	-1.16	-0.90	-0.57	-0.32	-0.98
10	230.0	-0.96	-0.76	-0.68	-0.53	-0.56	-0.73	-1.76	-1.36	-1.05	-0.66	-0.27	-1.15
11	250.2	-1.16	-0.91	-0.81	-0.63	-0.64	-0.81	-2.03	-1.59	-1.22	-0.77	-0.30	-1.18
12	269.6	-1.45	-1.11	-0.97	-0.74	-0.70	-0.83	-2.18	-1.76	-1.34	-0.85	-0.35	-1.18
13	289.8	-1.69	-1.27	-1.09	-0.83	-0.77	-0.91	-2.44	-1.95	-1.48	-0.94	-0.38	-1.26
14	309.8	-1.98	-1.46	-1.24	-0.90	-0.85	-0.99	-2.57	-2.10	-1.60	-1.02	-0.44	-1.27
15	330.2	-2.21	-1.62	-1.35	-0.93	-0.93	-1.18	-2.89	-2.33	-1.76	-1.12	-0.47	-1.27
16	349.8	-2.41	-1.77	-1.47	-0.98	-1.01	-1.41	-3.27	-2.59	-1.94	-1.23	-0.49	-1.45
17	369.4	-2.71	-1.96	-1.63	-0.98	-1.11	-1.77	-3.74	-2.98	-2.19	-1.37	-0.55	-1.80
18	407.3	-3.43	-2.40	-1.92	-1.04	-1.28	-2.37	-4.56	-3.54	-2.56	-1.59	-0.66	-2.42
19	448.1	-4.09	-2.80	-2.18	-1.08	-1.47	-3.19	-4.93	-3.91	-2.81	-1.72	-0.83	-2.86
20	486.3	-4.65	-3.14	-2.40	-1.17	-1.63	-3.85	-5.47	-4.39	-3.12	-1.87	-0.97	-3.55
21	529.9	-6.01	-3.93	-2.91	-1.18	-1.77	-4.49	-6.46	-5.01	-3.53	-2.04	-1.15	-4.07
22	570.7	-6.84	-4.41	-3.13	-1.25	-1.88	-5.12	-7.31	-5.54	-3.87	-2.16	-1.29	-4.53
23	608.4	-7.63	-4.88	-3.41	-1.25	-1.96	-5.63	-7.98	-5.96	-4.15	-2.25	-1.41	-5.09
24	648.5	-8.53	-5.41	-3.55	-1.25	-2.04	-6.32	-8.88	-6.53	-4.52	-2.38	-1.55	-5.68
25	691.0	-9.24	-5.92	-3.84	-1.25	-2.13	-6.88	-9.67	-7.04	-4.87	-2.51	-1.70	-6.03
26	728.4	-9.68	-6.27	-3.90	-1.29	-2.25	-7.62	-10.46	-7.54	-5.19	-2.64	-1.77	-6.79
27	769.6	-10.49	-6.85	-4.17	-1.40	-2.34	-8.38	-11.24	-8.05	-5.52	-2.76	-1.87	-7.59
28	827.4	-10.82	-7.14	-4.33	-1.45	-2.45	-9.24	-11.63	-8.32	-5.71	-2.81	-2.05	-8.43
29	868.9	-11.62	-7.82	-4.62	-1.60	-2.61	-10.29	-12.50	-8.87	-6.06	-2.94	-2.21	-8.90
30	905.6	-13.38	-8.89	-5.09	-1.88	-2.63	-10.27	-13.79	-9.67	-6.58	-3.15	-2.33	-9.72
31	955.4	-14.80	-9.76	-5.40	-2.09	-2.75	-11.19	-15.14	-10.51	-7.13	-3.33	-2.49	-10.95
32	968.3	-17.05	-11.09	-6.19	-2.38	-2.85	-11.96	-16.10	-11.13	-7.53	-3.46	-2.71	-13.15
33	1027.7	-19.33	-12.45	-6.67	-2.64	-3.06	-13.46	-17.27	-11.89	-8.03	-3.62	-3.11	-13.69
34	1040.8	-21.97	-14.08	-7.60	-2.88	-3.12	-13.89	-19.81	-13.44	-9.01	-3.98	-3.20	-12.69
35	1022.2	-29.18	-18.73	-10.02	-3.66	-3.08	-13.70	-24.39	-16.65	-10.66	-4.38	-3.26	-13.69
36	1013.7	-34.25	-21.78	-10.99	-3.92	-3.13	-13.47	-26.64	-18.29	-11.44	-4.57	-3.37	-14.69
37	972.3	-42.02	-23.28	-11.93	-4.14	-3.16	-14.43	-30.87	-20.27	-12.47	-4.80	-3.39	-15.69
38	870.7	-42.38	-23.38	-12.02	-4.16	-3.02	-15.92	-31.22	-20.14	-12.38	-4.86	-2.93	-16.69
39	783.8	-42.38	-24.14	-12.09	-4.13	-3.00	-16.58	-31.08	-20.14	-12.28	-4.84	-2.84	-17.69
40	739.9	-42.38	-24.94	-12.29	-4.05	-2.97	-17.21	-31.98	-20.59	-12.28	-4.86	-2.76	-18.69
41	714.1	-42.38	-25.11	-12.36	-3.99	-2.66	-18.79	-35.43	-21.49	-12.31	-4.88	-2.43	-19.69
42	633.7	-42.38	-25.32	-12.49	-3.93	-2.63	-20.18	-38.83	-21.93	-12.31	-4.86	-2.38	-20.69
43	608.5	-42.38	-25.79	-12.78	-3.88	-2.60	-21.50	-41.19	-21.40	-11.77	-4.74	-2.37	-21.69
44	470.8	-42.38	-26.88	-13.29	-3.83	-2.57	-23.04	-41.19	-20.08	-11.20	-4.64	-2.37	-22.69
45	545.5	-42.38	-28.07	-13.76	-3.79	-2.52	-25.53	-41.19	-18.74	-10.95	-4.57	-2.31	-23.69

## Laje Maciça (SS2)

Passo de Carga	Carga Total (KN)	LVDT01 (mm)	LVDT02 (mm)	LVDT03 (mm)	LVDT04 (mm)	LVDT05 (mm)	LVDT06 (mm)	LVDT07 (mm)	LVDT08 (mm)	LVDT09 (mm)	LVDT10 (mm)	LVDT11 (mm)	LVDT12 (mm)
1	56.9	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	70.7	-0.06	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03	-0.03	0.00	0.04	-0.02	-0.03	-0.04	-0.07
3	90.8	-0.15	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.14	0.00	-0.15	-0.12	-0.12	-0.13	-0.17
4	113.5	-0.78	-0.53	-0.43	-0.35	-0.14	0.20	0.03	-0.29	-0.26	-0.23	-0.27	-0.36
5	130.0	-1.14	-0.77	-0.61	-0.49	-0.16	0.35	0.06	-0.36	-0.32	-0.29	-0.37	-0.53
6	149.7	-1.23	-0.85	-0.69	-0.57	-0.25	0.24	0.03	-0.48	-0.43	-0.38	-0.46	-0.63
7	171.0	-1.58	-1.10	-0.88	-0.72	-0.31	0.33	-0.05	-0.57	-0.52	-0.48	-0.58	-0.80
8	189.5	-1.70	-1.20	-0.97	-0.81	-0.38	0.25	-0.21	-0.70	-0.63	-0.57	-0.66	-0.87
9	207.9	-1.97	-1.38	-1.12	-0.93	-0.44	0.28	-0.25	-0.77	-0.71	-0.64	-0.78	-1.06
10	230.0	-2.22	-1.57	-1.28	-1.06	-0.52	0.23	-0.38	-0.89	-0.82	-0.74	-0.89	-1.21
11	250.7	-2.34	-1.68	-1.37	-1.15	-0.60	0.12	-0.43	-0.96	-0.88	-0.81	-1.00	-1.40
12	268.3	-2.60	-1.86	-1.51	-1.26	-0.67	0.07	-0.54	-1.07	-0.98	-0.89	-1.10	-1.57
13	288.3	-2.76	-1.98	-1.61	-1.34	-0.78	-0.30	-0.64	-1.16	-1.07	-0.97	-1.19	-1.74
14	308.9	-3.27	-2.31	-1.84	-1.50	-0.83	-0.25	-0.76	-1.27	-1.17	-1.04	-1.32	-1.97
15	328.8	-3.45	-2.44	-1.94	-1.58	-0.90	-0.46	-0.88	-1.37	-1.25	-1.10	-1.44	-2.28
16	350.2	-3.74	-2.63	-2.09	-1.69	-0.96	-0.54	-1.16	-1.58	-1.41	-1.21	-1.53	-2.42
17	374.3	-3.99	-2.81	-2.23	-1.81	-1.04	-0.72	-1.36	-1.73	-1.53	-1.29	-1.67	-2.72
18	409.7	-4.59	-3.19	-2.51	-2.01	-1.14	-0.92	-1.93	-2.13	-1.82	-1.48	-1.83	-3.00
19	450.3	-5.52	-3.75	-2.88	-2.22	-1.32	-1.64	-2.56	-2.56	-2.13	-1.66	-2.05	-3.78
20	491.2	-6.23	-4.19	-3.18	-2.39	-1.48	-2.18	-3.02	-2.89	-2.37	-1.81	-2.29	-4.54
21	537.0	-6.93	-4.61	-3.51	-2.57	-1.64	-2.95	-3.78	-3.40	-2.72	-1.98	-2.54	-5.32
22	571.2	-7.92	-5.16	-3.85	-2.71	-1.78	-3.58	-4.38	-3.84	-3.00	-2.09	-2.74	-6.17
23	607.8	-8.39	-5.45	-4.05	-2.80	-1.96	-4.49	-4.87	-4.20	-3.26	-2.20	-2.93	-6.89
24	654.2	-9.01	-5.83	-4.31	-2.93	-2.11	-5.18	-5.50	-4.65	-3.57	-2.34	-3.13	-7.48
25	687.5	-9.56	-6.08	-4.51	-3.01	-2.27	-6.07	-6.14	-5.09	-3.87	-2.46	-3.27	-8.07
26	731.8	-10.25	-6.41	-4.79	-3.13	-2.45	-6.94	-6.47	-5.36	-4.07	-2.53	-3.50	-8.96
27	767.5	-10.94	-6.82	-5.07	-3.25	-2.63	-7.83	-7.06	-5.78	-4.36	-2.64	-3.70	-9.84
28	813.8	-11.40	-7.05	-5.28	-3.33	-2.81	-9.25	-7.79	-6.33	-4.75	-2.78	-3.91	-10.76
29	838.6	-12.36	-7.58	-5.68	-3.48	-3.00	-12.67	-9.71	-7.56	-5.47	-2.96	-4.10	-12.93
30	893.1	-12.95	-8.14	-5.79	-3.63	-3.32	-15.15	-10.56	-8.11	-5.82	-3.04	-4.43	-14.90
31	922.4	-13.82	-8.63	-5.96	-3.77	-3.53	-16.88	-11.03	-8.41	-5.99	-3.08	-4.63	-16.89
32	924.1	-14.04	-8.79	-6.06	-3.80	-3.56	-17.31	-11.38	-8.63	-6.13	-3.08	-4.75	-17.81
33	925.0	-14.27	-8.88	-6.15	-3.82	-3.58	-17.94	-11.78	-8.89	-6.29	-3.13	-4.88	-18.83
34	967.6	-15.18	-9.34	-6.22	-3.91	-4.06	-24.33	-13.18	-9.64	-6.71	-3.26	-5.46	-25.19
35	972.0	-15.32	-9.41	-6.25	-3.91	-4.06	-25.54	-13.65	-9.93	-6.89	-3.31	-5.64	-26.72
36	986.8	-16.26	-10.02	-6.68	-3.91	-4.06	-29.13	-14.74	-10.59	-7.13	-3.38	-5.86	-29.49
37	968.1	-18.53	-11.44	-7.43	-3.92	-4.08	-31.93	-17.12	-11.83	-7.59	-3.43	-5.98	-31.48
38	904.0	-22.81	-8.57	-5.04	-2.97	-4.72	-34.35	-22.33	-8.44	-5.30	-2.43	-5.73	-31.55
39	562.1	-25.74	-7.04	-4.09	-2.39	-4.81	-34.35	-27.51	-8.13	-5.08	-2.36	-5.21	-29.49
40	484.3	-28.62	-5.73	-3.23	-1.83	-4.95	-34.35	-30.01	-7.94	-4.96	-2.27	-4.80	-29.51
41	467.2	-31.29	-5.69	-3.19	-1.80	-4.93	-34.35	-31.99	-7.99	-4.97	-2.27	-4.71	-29.51
42	456.3	-34.44	-5.89	-3.24	-1.80	-4.86	-34.35	-34.03	-8.00	-4.99	-2.28	-4.65	-29.62
43	458.9	-37.25	-6.13	-3.38	-1.85	-4.84	-34.35	-35.64	-8.02	-5.01	-2.29	-4.65	-30.02
44	458.9	-40.43	-6.36	-3.51	-1.91	-4.85	-34.35	-37.66	-8.13	-5.08	-2.32	-4.64	-30.59
45	458.7	-40.86	-6.04	-3.31	-1.83	-4.92	-34.35	-38.67	-8.16	-5.09	-2.31	-4.64	-30.79

### Laje BubbleDeck (BD1)

Passo de Carga	Carga Total (KN)	LVDT01 (mm)	LVDT02 (mm)	LVDT03 (mm)	LVDT04 (mm)	LVDT05 (mm)	LVDT06 (mm)	LVDT07 (mm)	LVDT08 (mm)	LVDT09 (mm)	LVDT10 (mm)	LVDT11 (mm)	LVDT12 (mm)
1	49.0	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	57.7	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	-0.01	-0.03	-0.07
3	77.9	-0.13	-0.11	-0.09	-0.09	-0.08	-0.11	-0.02	-0.05	-0.06	-0.07	-0.12	-0.23
4	98.9	-0.18	-0.18	-0.16	-0.15	-0.16	-0.26	-0.17	-0.18	-0.17	-0.16	-0.19	-0.28
5	115.8	-0.27	-0.18	-0.18	-0.19	-0.24	-0.44	-0.30	-0.28	-0.26	-0.23	-0.25	-0.32
6	137.1	-0.17	-0.22	-0.23	-0.26	-0.34	-0.64	-0.37	-0.36	-0.34	-0.30	-0.35	-0.48
7	157.3	-0.27	-0.23	-0.26	-0.30	-0.43	-0.84	-0.50	-0.46	-0.43	-0.37	-0.43	-0.56
8	176.7	-0.17	-0.25	-0.29	-0.34	-0.50	-1.02	-0.61	-0.56	-0.52	-0.43	-0.50	-0.64
9	197.2	-0.19	-0.31	-0.35	-0.40	-0.58	-1.20	-0.70	-0.65	-0.60	-0.50	-0.58	-0.77
10	217.9	-0.21	-0.33	-0.38	-0.45	-0.65	-1.38	-0.83	-0.75	-0.69	-0.56	-0.66	-0.88
11	236.6	-0.27	-0.39	-0.44	-0.51	-0.57	-1.52	-0.91	-0.83	-0.77	-0.62	-0.74	-1.02
12	261.3	-0.29	-0.45	-0.51	-0.57	-0.72	-1.90	-1.10	-0.97	-0.89	-0.70	-0.82	-1.14
13	277.9	-0.48	-0.60	-0.61	-0.60	-0.81	-1.99	-1.33	-1.14	-1.02	-0.88	-0.90	-1.35
14	300.3	-0.80	-0.83	-0.77	-0.75	-0.78	-2.19	-1.48	-1.26	-1.12	-0.98	-1.02	-1.67
15	317.4	-0.86	-0.86	-0.78	-0.74	-0.95	-2.51	-1.87	-1.52	-1.30	-0.99	-1.07	-1.83
16	337.6	-1.61	-1.63	-1.44	-1.27	-1.68	-3.01	-2.13	-1.70	-1.44	-1.36	-1.17	-2.13
17	357.6	-1.31	-1.13	-0.97	-0.83	-1.62	-3.21	-2.39	-1.88	-1.57	-1.17	-1.25	-2.38
18	399.1	-1.93	-1.51	-1.22	-0.98	-1.63	-3.73	-2.98	-2.28	-1.87	-1.34	-1.46	-2.96
19	439.6	-2.56	-1.89	-1.46	-1.13	-1.64	-4.36	-3.55	-2.67	-2.14	-1.49	-1.65	-3.62
20	475.3	-3.15	-2.24	-1.69	-1.26	-1.72	-4.83	-4.06	-3.02	-2.40	-1.63	-1.80	-4.16
21	518.9	-3.66	-2.55	-1.90	-1.37	-1.81	-5.41	-4.55	-3.39	-2.66	-1.75	-1.98	-4.71
22	557.0	-4.14	-2.83	-2.07	-1.44	-1.82	-5.99	-5.08	-3.78	-2.94	-1.88	-2.14	-5.34
23	598.3	-5.08	-3.38	-2.40	-1.59	-1.90	-6.40	-5.93	-4.35	-3.29	-2.05	-2.27	-5.83
24	635.2	-5.76	-3.76	-2.66	-1.67	-1.91	-6.76	-6.32	-4.63	-3.48	-2.20	-2.45	-6.60
25	674.9	-6.33	-4.13	-2.90	-1.79	-1.91	-7.42	-6.91	-5.03	-3.76	-2.33	-2.60	-7.21
26	718.9	-7.11	-4.61	-3.18	-1.91	-1.92	-8.00	-7.52	-5.49	-4.07	-2.46	-2.76	-7.89
27	761.8	-7.47	-5.03	-3.41	-2.00	-2.05	-8.74	-8.22	-5.96	-4.38	-2.50	-2.90	-8.58
28	797.1	-8.28	-5.56	-3.70	-2.12	-2.09	-9.28	-8.93	-6.42	-4.68	-2.61	-3.03	-9.47
29	817.2	-9.39	-6.13	-3.99	-2.22	-2.14	-10.05	-9.63	-6.58	-4.80	-2.66	-3.10	-11.30
30	788.9	-10.37	-6.47	-4.14	-2.24	-2.16	-10.57	-12.10	-5.98	-4.48	-2.52	-3.07	-11.61
31	784.1	-11.14	-6.69	-4.18	-2.26	-2.19	-11.08	-13.38	-6.07	-4.53	-2.55	-3.04	-12.12
32	792.4	-12.89	-6.98	-4.27	-2.28	-2.25	-12.03	-15.07	-6.08	-4.57	-2.56	-3.04	-13.61
33	789.9	-15.28	-6.55	-4.06	-2.13	-2.24	-13.21	-17.14	-5.71	-4.31	-2.43	-2.97	-15.38
34	687.4	-18.09	-5.98	-3.72	-1.97	-2.27	-13.22	-19.90	-5.46	-4.14	-2.35	-2.85	-15.74
35	643.4	-21.94	-4.27	-2.69	-1.51	-2.27	-13.00	-21.87	-5.23	-3.88	-2.20	-2.54	-17.05
36	535.7	-26.16	-4.31	-2.71	-1.50	-2.19	-11.67	-22.80	-5.09	-3.76	-2.15	-2.46	-19.13
37	511.4	-29.91	-4.33	-2.72	-1.50	-2.13	-10.99	-24.39	-5.04	-3.68	-2.12	-2.41	-21.02
38	511.5	-33.33	-4.50	-2.82	-1.54	-2.11	-10.71	-26.07	-5.08	-3.68	-2.13	-2.42	-22.89
39	517.1	-35.30	-4.64	-2.89	-1.57	-2.09	-10.52	-27.53	-5.14	-3.73	-2.14	-2.42	-24.78
40	516.0	-35.30	-4.69	-2.93	-1.58	-2.08	-10.33	-29.18	-5.18	-3.74	-2.15	-2.43	-26.63
41	518.9	-35.30	-4.79	-2.97	-1.59	-2.08	-10.21	-30.49	-5.20	-3.76	-2.15	-2.43	-27.95
42	525.2	-35.30	-4.95	-3.07	-1.63	-2.08	-10.28	-32.04	-5.22	-3.77	-2.16	-2.45	-29.63
43	531.2	-35.18	-5.09	-3.17	-1.68	-2.07	-11.13	-33.00	-4.95	-3.58	-2.08	-2.54	-32.75
44	522.6	-35.29	-5.12	-3.18	-1.68	-2.07	-11.28	-33.18	-4.84	-3.50	-2.05	-2.49	-33.37

### Laje BubbleDeck (BD2)

Passo de Carga	Carga Total (KN)	LVDT01 (mm)	LVDT02 (mm)	LVDT03 (mm)	LVDT04 (mm)	LVDT05 (mm)	LVDT06 (mm)	LVDT07 (mm)	LVDT08 (mm)	LVDT09 (mm)	LVDT10 (mm)	LVDT11 (mm)	LVDT12 (mm)
1	50.6	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	59.1	-0.04	-0.02	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.00	0.00	-0.02
3	80.4	-0.08	-0.05	-0.04	-0.03	0.00	-0.07	-0.05	-0.05	-0.04	-0.02	-0.03	-0.10
4	98.1	-0.10	-0.07	-0.07	-0.06	-0.05	-0.18	-0.08	-0.08	-0.08	-0.06	-0.08	-0.18
5	119.5	-0.23	-0.18	-0.15	-0.13	-0.09	-0.22	-0.22	-0.20	-0.17	-0.13	-0.13	-0.21
6	141.0	-0.26	-0.21	-0.19	-0.18	-0.17	-0.37	-0.42	-0.36	-0.29	-0.21	-0.18	-0.21
7	158.7	-0.30	-0.25	-0.23	-0.22	-0.24	-0.48	-0.36	-0.33	-0.28	-0.23	-0.27	-0.40
8	178.8	-0.45	-0.36	-0.32	-0.29	-0.28	-0.50	-0.42	-0.40	-0.35	-0.29	-0.33	-0.49
9	199.2	-0.45	-0.38	-0.35	-0.32	-0.35	-0.69	-0.57	-0.52	-0.44	-0.35	-0.39	-0.54
10	217.6	-0.56	-0.47	-0.42	-0.38	-0.40	-0.76	-0.57	-0.54	-0.48	-0.39	-0.47	-0.69
11	239.2	-0.63	-0.53	-0.48	-0.44	-0.47	-0.92	-0.60	-0.60	-0.54	-0.44	-0.56	-0.88
12	255.4	-0.83	-0.66	-0.57	-0.50	-0.54	-1.09	-0.84	-0.76	-0.64	-0.51	-0.64	-1.07
13	280.6	-1.15	-0.87	-0.72	-0.59	-0.54	-1.39	-1.03	-0.92	-0.76	-0.58	-0.75	-1.33
14	297.1	-1.33	-0.99	-0.81	-0.65	-0.56	-1.70	-1.17	-1.02	-0.83	-0.63	-0.81	-1.53
15	316.3	-1.69	-1.21	-0.97	-0.74	-0.62	-1.89	-1.39	-1.18	-0.95	-0.69	-0.89	-1.81
16	338.3	-2.06	-1.45	-1.13	-0.84	-0.72	-2.32	-1.68	-1.39	-1.08	-0.76	-0.99	-2.14
17	357.6	-2.31	-1.60	-1.24	-0.91	-0.74	-2.62	-1.86	-1.53	-1.18	-0.81	-1.08	-2.41
18	377.3	-2.56	-1.75	-1.34	-0.98	-0.82	-3.10	-2.14	-1.72	-1.31	-0.88	-1.16	-2.69
19	398.3	-2.95	-1.98	-1.49	-1.06	-0.82	-3.37	-2.48	-1.95	-1.45	-0.94	-1.26	-3.04
20	436.1	-3.64	-2.40	-1.75	-1.21	-0.94	-4.15	-3.08	-2.36	-1.70	-1.05	-1.43	-3.68
21	477.6	-4.57	-2.97	-2.11	-1.40	-1.44	-4.74	-3.78	-2.84	-1.98	-1.14	-1.62	-4.49
22	517.1	-5.03	-3.25	-2.30	-1.51	-1.44	-5.57	-4.42	-3.28	-2.24	-1.24	-1.77	-5.09
23	559.5	-5.94	-3.79	-2.63	-1.68	-1.44	-6.29	-5.18	-3.82	-2.55	-1.35	-1.94	-5.88
24	603.7	-6.53	-4.26	-2.93	-1.86	-1.44	-6.96	-5.49	-4.06	-2.71	-1.40	-2.17	-7.03
25	637.3	-6.95	-4.67	-3.18	-1.97	-1.44	-7.60	-6.13	-4.53	-2.98	-1.51	-2.28	-7.52
26	680.8	-7.75	-5.13	-3.48	-2.06	-1.44	-8.36	-6.91	-5.08	-3.32	-1.64	-2.41	-8.20
27	711.8	-9.02	-6.08	-4.20	-2.29	-1.44	-9.30	-7.57	-5.54	-3.64	-1.73	-2.66	-9.91
28	759.3	-8.76	-6.05	-4.19	-2.29	-1.75	-11.70	-9.01	-6.43	-4.21	-1.92	-2.70	-10.25
29	790.5	-11.30	-7.46	-5.11	-2.29	-1.74	-11.39	-9.81	-6.88	-4.52	-1.97	-2.79	-11.00
30	804.5	-12.77	-8.12	-5.55	-2.32	-1.73	-11.28	-10.55	-7.34	-4.83	-2.04	-2.80	-11.34
31	816.6	-14.04	-8.81	-5.99	-2.43	-1.73	-11.26	-11.53	-7.93	-5.19	-2.15	-2.83	-11.59
32	829.4	-16.03	-9.85	-6.67	-2.48	-1.73	-11.23	-12.28	-8.32	-5.46	-2.18	-2.92	-12.54
33	831.6	-17.08	-10.41	-6.90	-2.48	-1.71	-11.27	-13.13	-8.76	-5.72	-2.25	-2.90	-12.60
34	832.5	-17.98	-10.88	-7.21	-2.48	-1.71	-11.34	-13.91	-9.11	-5.93	-2.29	-2.89	-12.73
35	827.1	-19.09	-11.68	-7.62	-2.48	-1.74	-11.68	-15.32	-9.72	-6.44	-2.36	-2.89	-13.05
36	609.1	-23.37	-16.20	-8.95	-2.48	-1.62	-14.29	-19.20	-13.27	-7.96	-2.08	-2.35	-16.33
37	541.1	-24.93	-18.16	-9.35	-2.48	-1.50	-16.09	-20.95	-15.08	-8.08	-1.99	-2.23	-17.90
38	475.8	-26.61	-20.40	-9.53	-2.43	-1.33	-18.31	-23.17	-17.18	-7.94	-1.89	-2.09	-19.49
39	462.8	-28.08	-22.12	-7.41	-2.43	-1.30	-20.38	-25.14	-18.78	-7.99	-1.89	-2.09	-21.13
40	466.8	-29.36	-23.64	-6.72	-2.43	-1.30	-22.28	-26.83	-19.82	-7.88	-1.93	-2.14	-22.77
41	464.5	-30.38	-25.09	-6.50	-2.43	-1.34	-24.45	-28.52	-20.79	-7.85	-1.96	-2.14	-24.61
42	460.9	-31.56	-26.55	-6.50	-2.43	-1.36	-26.22	-30.12	-21.01	-8.02	-2.00	-2.19	-26.26
43	432.5	-33.27	-28.60	-6.50	-2.43	-1.38	-28.19	-32.19	-15.98	-9.32	-2.17	-2.31	-28.20
44	443.1	-34.87	-30.35	-6.55	-2.43	-1.43	-29.72	-33.97	-16.68	-10.25	-2.33	-2.47	-29.78
45	457.4	-36.44	-31.76	-7.50	-2.49	-1.41	-30.06	-35.41	-17.37	-11.05	-2.47	-2.63	-31.00

## A.2 – DEFORMAÇÕES NA SUPERFÍCIE COMPRIMIDA DO CONCRETO

### Laje Maciça (SS1)

Passo de Carga	Carga Total (KN)	EC1 (‰)	EC2 (‰)	EC3 (‰)	EC4 (‰)
1	66.9	0.00965	-0.0005	0.00023	-0.0005
2	68.9	0.00689	-0.0016	-0.0011	-0.0025
3	91.8	-0.0002	-0.0064	-0.0048	-0.0055
4	110.2	-0.014	-0.0172	-0.011	-0.0124
5	130.3	-0.0172	-0.0241	-0.0161	-0.0172
6	149.3	-0.026	-0.0319	-0.0216	-0.0225
7	170.8	-0.0299	-0.0411	-0.0266	-0.0278
8	189.7	-0.0448	-0.0494	-0.0319	-0.0326
9	209.4	-0.0531	-0.0583	-0.0351	-0.0354
10	230.0	-0.065	-0.0682	-0.0411	-0.04
11	250.2	-0.0719	-0.0799	-0.0475	-0.0464
12	269.6	-0.0891	-0.0926	-0.0572	-0.0551
13	289.8	-0.1066	-0.1031	-0.0673	-0.0632
14	309.8	-0.1279	-0.1171	-0.0785	-0.0728
15	330.2	-0.1415	-0.1316	-0.093	-0.0868
16	349.8	-0.1688	-0.1461	-0.1033	-0.1017
17	369.4	-0.2005	-0.232	-0.1286	-0.1277
18	407.3	-0.2866	-0.3344	-0.1447	-0.1387
19	448.1	-0.4058	-0.3994	-0.1867	-0.1571
20	486.3	-0.4873	-0.4543	-0.2069	-0.1775
21	529.9	-0.5898	-0.5376	-0.2386	-0.2104
22	570.7	-0.6711	-0.61	-0.2676	-0.2228
23	608.4	-0.7487	-0.6647	-0.2924	-0.2398
24	648.5	-0.8479	-0.7379	-0.3087	-0.2641
25	691.0	-0.9267	-0.8096	-0.3224	-0.2614
26	728.4	-1.0085	-0.8686	-0.327	-0.2625
27	769.6	-1.1249	-0.9437	-0.3126	-0.2508
28	827.4	-1.2301	-1.0211	-0.31	-0.2506
29	868.9	-1.3881	-1.1185	-0.3041	-0.2428
30	905.6	-1.4928	-1.1791	-0.302	-0.2425
31	955.4	-1.6327	-1.2958	-0.2935	-0.2441
32	968.3	-1.7505	-1.4214	-0.2708	-0.2409
33	1027.7	-1.8741	-1.6249	-0.2168	-0.2274
34	1040.8	-1.9159	-1.8376	-0.1231	-0.1817
35	1022.2	-1.9232	-1.7861	-0.1451	-0.4591
36	1013.7	-1.8633	-1.742	-0.172	-0.4727
37	972.3	-1.646	-1.6377	-0.2085	-0.4561
38	870.7	-1.4735	-1.4451	-0.2003	-0.4194
39	783.8	-1.4163	-1.3913	-0.1989	-0.4081
40	739.9	-1.3739	-1.3327	-0.198	-0.3943
41	714.1	-1.1763	-1.129	-0.1672	-0.3289
42	633.7	-1.093	-1.0406	-0.1578	-0.3114
43	608.5	-1.0032	-0.9205	-0.1463	-0.2825
44	470.8	-0.9315	-0.8208	-0.1389	-0.2577
45	545.5	-0.847	-0.737	-0.13	-0.2368

### Laje Maciça (SS2)

Passo de Carga	Carga Total (KN)	EC1 (%)	EC2 (%)	EC3 (%)	EC4 (%)
1	56.9	-2E-16	4.4E-18	-0.0002	1.4E-17
2	70.7	-2E-16	-0.0044	-0.0025	-0.0023
3	90.8	-2E-16	-0.0099	-0.0071	-0.0071
4	113.5	-2E-16	-0.0163	-0.0101	-0.0094
5	130.0	-2E-16	-0.023	-0.0129	-0.0124
6	149.7	-2E-16	-0.0301	-0.0179	-0.017
7	171.0	-2E-16	-0.0381	-0.0214	-0.0207
8	189.5	-2E-16	-0.0452	-0.0271	-0.0248
9	207.9	-2E-16	-0.0556	-0.0305	-0.0282
10	230.0	-2E-16	-0.0652	-0.0349	-0.0322
11	250.7	-2E-16	-0.0792	-0.04	-0.0358
12	268.3	-2E-16	-0.1013	-0.0448	-0.0427
13	288.3	-2E-16	-0.1203	-0.0576	-0.0588
14	308.9	-2E-16	-0.1578	-0.0673	-0.0616
15	328.8	-2E-16	-0.2251	-0.0705	-0.0616
16	350.2	-2E-16	-0.2607	-0.0746	-0.0588
17	374.3	-2E-16	-0.31	-0.0838	-0.0632
18	409.7	-2E-16	-0.3631	-0.1004	-0.0682
19	450.3	-2E-16	-0.4249	-0.1318	-0.0795
20	491.2	-2E-16	-0.5101	-0.1488	-0.0893
21	537.0	-2E-16	-0.6235	-0.1865	-0.1373
22	571.2	-2E-16	-0.7032	-0.189	-0.1571
23	607.8	-2E-16	-0.7712	-0.2239	-0.1883
24	654.2	-2E-16	-0.8442	-0.2389	-0.2033
25	687.5	-2E-16	-0.9138	-0.2354	-0.2115
26	731.8	-2E-16	-0.9903	-0.2407	-0.2225
27	767.5	-2E-16	-1.0682	-0.2253	-0.2232
28	813.8	-2E-16	-1.1362	-0.184	-0.1987
29	838.6	-2E-16	-1.0673	-0.1667	-0.234
30	893.1	-2E-16	-1.1575	-0.1656	-0.2389
31	922.4	-2E-16	-1.2018	-0.1383	-0.2338
32	924.1	-2E-16	-1.2432	-0.116	-0.2069
33	925.0	-2E-16	-1.2632	-0.1017	-0.169
34	967.6	-2E-16	-1.2962	-0.0335	-0.1116
35	972.0	-2E-16	-1.3096	0.00184	-0.079
36	986.8	-2E-16	-1.3748	0.09256	0.05466
37	968.1	-2E-16	-1.6743	0.15135	0.08452
38	904.0	-2E-16	-1.3592	-0.0916	0.0147
39	562.1	-2E-16	-1.1927	-0.136	-0.1222
40	484.3	-2E-16	-0.2209	-0.0845	-0.1364
41	467.2	-2E-16	-0.178	-0.0237	-0.1316
42	456.3	-2E-16	-0.1569	0.01171	-0.141
43	458.9	-2E-16	-0.1447	-0.0657	-0.1488
44	458.9	-2E-16	-0.122	-0.1376	-0.1518
45	458.7	-2E-16	-0.1121	-0.1417	-0.1419



**Laje BubbleDeck (BD1)**

<b>Passo de Carga</b>	<b>Carga Total (KN)</b>	<b>EC1 (%)</b>	<b>EC2 (%)</b>	<b>EC3 (%)</b>	<b>EC4 (%)</b>
1	49.0	-2E-16	0.00092	0.00069	0.00092
2	57.7	-2E-16	0.00023	0.00184	0.00138
3	77.9	-2E-16	-0.0136	-0.0073	-0.0073
4	98.9	-2E-16	-0.0305	-0.0214	-0.0202
5	115.8	-2E-16	-0.0443	-0.0322	-0.0294
6	137.1	-2E-16	-0.057	-0.0379	-0.0356
7	157.3	-2E-16	-0.062	-0.0372	-0.0349
8	176.7	-2E-16	-0.0678	-0.0377	-0.0349
9	197.2	-2E-16	-0.0818	-0.0455	-0.0432
10	217.9	-2E-16	-0.1052	-0.0595	-0.0567
11	236.6	-2E-16	-0.1316	-0.0703	-0.0698
12	261.3	-2E-16	-0.1741	-0.0903	-0.0914
13	277.9	-2E-16	-0.2338	-0.0905	-0.0804
14	300.3	-2E-16	-0.2825	-0.096	-0.0905
15	317.4	-2E-16	-0.3376	-0.1224	-0.1073
16	337.6	-2E-16	-0.3842	-0.15	-0.122
17	357.6	-2E-16	-0.4063	-0.1651	-0.1355
18	399.1	-2E-16	-0.466	-0.1826	-0.1447
19	439.6	-2E-16	-0.5418	-0.2069	-0.1619
20	475.3	-2E-16	-0.6189	-0.2389	-0.1817
21	518.9	-2E-16	-0.6947	-0.2676	-0.2065
22	557.0	-2E-16	-0.7758	-0.2866	-0.2292
23	598.3	-2E-16	-0.8456	-0.2967	-0.2446
24	635.2	-2E-16	-0.9265	-0.2811	-0.26
25	674.9	-2E-16	-1.031	-0.2905	-0.325
26	718.9	-2E-16	-1.1247	-0.2625	-0.2719
27	761.8	-2E-16	-1.2214	-0.2271	-0.2561
28	797.1	-2E-16	-1.2935	-0.203	-0.2196
29	817.2	-2E-16	-1.3167	-0.2051	-0.2333
30	788.9	-2E-16	-1.2551	-0.3202	-0.3241
31	784.1	-2E-16	-1.2609	-0.362	-0.3463
32	792.4	-2E-16	-1.2517	-0.3851	-0.3718
33	789.9	-2E-16	-1.214	-0.3769	-0.3328
34	687.4	-2E-16	-1.1697	-0.3238	-0.2421
35	643.4	-2E-16	-1.0464	-0.1569	-0.065
36	535.7	-2E-16	-0.977	-0.0916	0.00781
37	511.4	-2E-16	-0.9315	-0.07	0.0418
38	511.5	-2E-16	-0.9184	-0.0707	0.04846
39	517.1	-2E-16	-0.9097	-0.0593	0.05788
40	516.0	-2E-16	-0.9021	-0.0574	0.06477
41	518.9	-2E-16	-0.8943	-0.059	0.05948
42	525.2	-2E-16	-0.8847	-0.057	0.05833
43	531.2	-2E-16	-0.8394	-0.0156	0.0503
44	522.6	-2E-16	-0.8144	-0.0131	0.0712

**Laje BubbleDeck (BD2)**

<b>Passo de Carga</b>	<b>Carga Total (KN)</b>	<b>EC1 (%)</b>	<b>EC2 (%)</b>	<b>EC3 (%)</b>	<b>EC4 (%)</b>
1	50.6	-0.0002	-0.0002	0.00023	-0.0002
2	59.1	-0.0028	-0.0046	-0.0018	-0.0018
3	80.4	-0.0106	-0.0152	-0.0071	-0.0071
4	98.1	-0.0179	-0.0264	-0.0122	-0.0122
5	119.5	-0.0234	-0.0354	-0.0163	-0.0163
6	141.0	-0.0289	-0.0455	-0.023	-0.0207
7	158.7	-0.0397	-0.0602	-0.0285	-0.0278
8	178.8	-0.0469	-0.0707	-0.0322	-0.0322
9	199.2	-0.0572	-0.085	-0.0393	-0.0384
10	217.6	-0.0673	-0.1006	-0.0441	-0.0457
11	239.2	-0.0804	-0.1249	-0.0498	-0.0565
12	255.4	-0.1194	-0.1491	-0.0595	-0.068
13	280.6	-0.1534	-0.1727	-0.0726	-0.0785
14	297.1	-0.1787	-0.1844	-0.0818	-0.0866
15	316.3	-0.2127	-0.1954	-0.0935	-0.1054
16	338.3	-0.2382	-0.2581	-0.1304	-0.1224
17	357.6	-0.26	-0.3071	-0.1424	-0.1295
18	377.3	-0.2878	-0.3645	-0.1509	-0.1412
19	398.3	-0.328	-0.4217	-0.1422	-0.1559
20	436.1	-0.3744	-0.5103	-0.1608	-0.186
21	477.6	-0.4309	-0.6194	-0.1686	-0.2253
22	517.1	-0.4933	-0.714	-0.1842	-0.2219
23	559.5	-0.568	-0.7999	-0.1964	-0.2042
24	603.7	-0.6633	-0.8865	-0.2067	-0.1869
25	637.3	-0.7239	-0.9393	-0.2168	-0.1782
26	680.8	-0.8022	-1.0128	-0.2292	-0.1748
27	711.8	-0.9506	-1.1819	-0.2095	-0.1362
28	759.3	-1.0737	-1.2983	-0.2097	-0.1029
29	790.5	-1.158	-1.4409	-0.1821	-0.0671
30	804.5	-1.2067	-1.5328	-0.1674	-0.0379
31	816.6	-1.2395	-1.6334	-0.1438	-0.0122
32	829.4	-1.2836	-1.855	-0.0625	0.04639
33	831.6	-1.2149	-1.8355	-0.0347	-0.025
34	832.5	-1.1793	-1.841	-0.0067	-0.0802
35	827.1	-1.0427	-1.6286	0.05604	-0.1488
36	609.1	-0.4936	-0.8027	-0.1116	-0.0903
37	541.1	-0.4113	-0.7069	-0.1369	-0.0714
38	475.8	-0.3509	-0.6396	-0.1254	-0.0558
39	462.8	-0.3119	-0.6157	-0.1468	-0.0721
40	466.8	-0.2981	-0.6088	-0.1553	-0.0772
41	464.5	-0.2508	-0.55	-0.1564	-0.0742
42	460.9	-0.2372	-0.5308	-0.1557	-0.0714
43	432.5	-0.2136	-0.4908	-0.1461	-0.0657
44	443.1	-0.2072	-0.4839	-0.1424	-0.0632
45	457.4	-0.2166	-0.4793	-0.1369	-0.0616

### A.3 – DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO

#### Laje Maciça (SS1)

Passo de Carga	Carga Total (KN)	EF1 (‰)	EF2 (‰)	EF3 (‰)	EF4 (‰)	EF5 (‰)	EF6 (‰)
1	66.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
2	68.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
3	91.8	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
4	110.2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
5	130.3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
6	149.3	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
7	170.8	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
8	189.7	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02
9	209.4	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03
10	230.0	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04
11	250.2	0.10	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04
12	269.6	0.09	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05
13	289.8	0.10	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06
14	309.8	0.13	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
15	330.2	0.20	0.08	0.08	0.07	0.07	0.08
16	349.8	0.28	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08
17	369.4	0.63	0.64	0.66	0.69	0.66	0.67
18	407.3	1.00	0.96	0.94	0.95	0.90	0.92
19	448.1	1.24	1.14	1.08	1.08	1.01	1.03
20	486.3	1.45	1.30	1.21	1.19	1.10	1.12
21	529.9	1.77	1.38	1.44	1.30	1.23	1.24
22	570.7	2.04	1.52	1.63	1.44	1.35	1.36
23	608.4	2.22	1.65	1.75	1.52	1.42	1.44
24	648.5	2.45	1.88	1.86	1.62	1.49	1.52
25	691.0	2.65	2.09	1.99	1.75	1.58	1.64
26	728.4	2.81	2.28	2.11	1.88	1.67	1.74
27	769.6	3.05	2.65	2.31	2.06	1.80	1.88
28	827.4	3.28	3.35	2.48	2.21	1.90	1.99
29	868.9	3.65	5.10	2.71	2.40	2.04	2.15
30	905.6	4.22	0.00	2.94	2.59	2.18	2.28
31	955.4	5.46	0.00	3.28	2.89	2.40	2.48
32	968.3	-8.00	0.00	3.59	3.17	2.58	2.63
33	1027.7	-8.00	0.00	4.78	3.92	2.95	2.95
34	1040.8	-8.00	0.00	5.99	5.44	3.27	3.14
35	1022.2	-8.00	0.00	6.64	6.52	3.66	3.44
36	1013.7	-8.00	0.00	6.64	-7.43	3.83	3.65
37	972.3	-8.00	0.00	6.66	-7.43	4.10	4.16
38	870.7	-8.00	0.00	6.45	-7.43	3.64	3.66
39	783.8	-8.00	0.00	6.33	6.46	3.47	3.46
40	739.9	-8.00	0.00	6.23	6.22	3.31	3.28
41	714.1	-8.00	0.00	4.04	5.76	2.91	2.84
42	633.7	-8.00	0.00	3.84	5.85	2.76	2.68
43	608.5	-8.00	0.00	3.77	5.60	2.54	2.48
44	470.8	-8.00	0.00	3.79	5.66	2.38	2.32
45	545.5	-8.00	0.00	3.67	5.60	2.22	2.16

### Laje Maciça (SS2)

Passo de Carga	Carga Total (KN)	EF1 (%)	EF2 (%)	EF3 (%)	EF4 (%)	EF5 (%)	EF6 (%)
1	56.9	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
2	70.7	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
3	90.8	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
4	113.5	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01
5	130.0	0.03	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02
6	149.7	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.02
7	171.0	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03
8	189.5	0.06	0.06	0.04	0.04	0.03	0.03
9	207.9	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.03
10	230.0	0.09	0.07	0.06	0.06	0.04	0.04
11	250.7	0.13	0.09	0.07	0.07	0.05	0.05
12	268.3	0.23	0.13	0.10	0.08	0.07	0.06
13	288.3	0.36	0.26	0.20	0.22	0.15	0.09
14	308.9	0.50	0.43	0.34	0.36	0.35	0.30
15	328.8	0.71	0.64	0.58	0.58	0.57	0.54
16	350.2	0.92	0.79	0.71	0.70	0.68	0.66
17	374.3	1.06	0.96	0.83	0.82	0.80	0.80
18	409.7	1.23	1.14	0.97	0.95	0.90	0.90
19	450.3	1.45	1.36	1.16	1.15	1.04	1.03
20	491.2	1.73	1.57	1.35	1.26	1.17	1.13
21	537.0	2.09	1.80	1.48	1.30	1.22	1.18
22	571.2	2.36	2.03	1.62	1.36	1.29	1.24
23	607.8	2.58	2.23	1.72	1.64	1.35	1.30
24	654.2	2.79	2.47	1.88	1.67	1.46	1.39
25	687.5	2.95	2.67	2.06	1.79	1.57	1.49
26	731.8	3.07	2.87	2.24	1.91	1.67	1.59
27	767.5	3.27	3.16	2.41	2.04	1.78	1.69
28	813.8	3.54	3.53	2.57	2.41	1.92	1.82
29	838.6	4.06	4.86	3.02	2.79	2.13	1.75
30	893.1	4.78	6.58	3.45	3.10	2.39	1.95
31	922.4	5.25	-7.34	3.84	3.38	2.58	2.06
32	924.1	5.69	-7.34	4.20	3.61	2.73	2.17
33	925.0	3.75	-7.34	4.77	4.04	2.90	2.29
34	967.6	5.66	-7.34	-8.16	6.45	3.74	2.87
35	972.0	-7.53	-7.34	-8.16	-7.50	4.06	3.11
36	986.8	-7.53	-7.34	-8.16	-7.50	4.43	3.42
37	968.1	-7.53	-7.34	-8.16	-7.50	4.94	3.44
38	904.0	-7.53	-7.34	-8.16	-7.50	4.65	3.31
39	562.1	-7.53	-7.34	-8.16	-7.50	5.05	3.07
40	484.3	-7.53	-7.34	-8.16	-7.50	4.90	4.63
41	467.2	-7.53	-7.34	-8.16	-7.50	4.85	4.57
42	456.3	-7.53	-7.34	-8.16	-7.50	4.79	4.50
43	458.9	-7.53	-7.34	-8.16	-7.50	4.80	4.50
44	458.9	-7.53	-7.34	-8.16	-7.50	4.82	4.51
45	458.7	-7.53	-7.34	-8.16	-7.50	4.87	4.55

**Laje BubbleDeck (BD1)**

<b>Passo de Carga</b>	<b>Carga Total (KN)</b>	<b>EF1 (%)</b>	<b>EF2 (%)</b>	<b>EF3 (%)</b>	<b>EF4 (%)</b>	<b>EF5 (%)</b>	<b>EF6 (%)</b>
1	49.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	57.7	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
3	77.9	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
4	98.9	0.00	0.00	0.03	-0.01	-0.01	-0.02
5	115.8	-0.01	-0.01	0.04	-0.02	-0.03	-0.04
6	137.1	0.02	0.00	0.05	-0.01	-0.02	-0.03
7	157.3	0.06	0.03	0.05	0.02	0.02	0.01
8	176.7	0.11	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04
9	197.2	0.14	0.07	0.06	0.05	0.06	0.05
10	217.9	0.17	0.07	0.08	0.04	0.04	0.03
11	236.6	0.19	0.14	0.10	0.03	0.03	0.01
12	261.3	0.32	0.38	0.31	0.13	0.04	0.04
13	277.9	0.57	0.69	0.63	0.41	0.18	0.15
14	300.3	0.71	0.77	0.81	0.54	0.23	0.21
15	317.4	0.78	0.93	0.92	0.61	0.28	0.30
16	337.6	0.84	0.96	0.99	0.65	0.30	0.32
17	357.6	0.94	1.02	1.05	0.73	0.36	0.38
18	399.1	1.19	1.19	1.20	0.91	0.56	0.58
19	439.6	1.44	1.35	1.33	1.05	0.71	0.70
20	475.3	1.61	1.47	1.47	1.17	0.76	0.70
21	518.9	1.77	1.61	1.62	1.29	0.86	0.77
22	557.0	1.98	1.80	1.78	1.43	0.99	0.87
23	598.3	2.15	1.98	1.94	1.59	1.16	1.00
24	635.2	2.30	2.17	2.09	1.74	1.29	1.12
25	674.9	2.42	2.38	2.14	1.88	1.39	1.20
26	718.9	2.52	2.53	2.30	2.03	1.50	1.28
27	761.8	2.64	2.72	2.43	2.17	1.61	1.35
28	797.1	2.75	2.86	2.56	2.34	1.75	1.46
29	817.2	2.73	2.86	2.63	2.43	1.90	1.60
30	788.9	2.49	2.65	2.43	2.31	1.85	1.65
31	784.1	2.48	2.64	2.42	2.32	1.90	1.72
32	792.4	2.47	2.64	2.41	2.32	1.96	1.78
33	789.9	2.37	2.56	2.33	2.23	1.95	1.80
34	687.4	2.26	2.44	2.21	2.10	1.85	1.73
35	643.4	2.05	2.22	2.03	1.91	1.67	1.56
36	535.7	1.95	2.11	1.94	1.82	1.60	1.49
37	511.4	1.90	2.05	1.89	1.76	1.55	1.45
38	511.5	1.91	2.05	1.88	1.75	1.54	1.44
39	517.1	1.92	2.06	1.88	1.75	1.54	1.43
40	516.0	1.94	2.07	1.89	1.75	1.54	1.42
41	518.9	1.94	2.08	1.89	1.75	1.53	1.41
42	525.2	1.95	2.09	1.90	1.76	1.54	1.41
43	531.2	1.95	2.10	1.90	1.76	1.51	1.38
44	522.6	1.91	2.07	1.88	1.73	1.48	1.35

**Laje BubbleDeck (BD2)**

<b>Passo de Carga</b>	<b>Carga Total (KN)</b>	<b>EF1 (%)</b>	<b>EF2 (%)</b>	<b>EF3 (%)</b>	<b>EF4 (%)</b>	<b>EF5 (%)</b>	<b>EF6 (%)</b>
1	50.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	59.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	80.4	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
4	98.1	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
5	119.5	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
6	141.0	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
7	158.7	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
8	178.8	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03
9	199.2	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03
10	217.6	0.10	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04
11	239.2	0.14	0.08	0.06	0.05	0.05	0.04
12	255.4	0.44	0.48	0.51	0.48	0.38	0.32
13	280.6	0.68	0.73	0.76	0.73	0.63	0.54
14	297.1	0.78	0.87	0.89	0.85	0.75	0.65
15	316.3	0.91	1.04	1.04	1.00	0.85	0.73
16	338.3	0.94	1.08	1.08	1.03	0.89	0.77
17	357.6	1.02	1.15	1.15	1.10	0.94	0.81
18	377.3	1.11	1.26	1.24	1.17	1.00	0.86
19	398.3	1.25	1.40	1.34	1.24	1.05	0.90
20	436.1	1.51	1.58	1.46	1.36	1.13	0.97
21	477.6	1.79	1.90	1.74	1.36	1.26	1.07
22	517.1	1.99	2.12	1.90	1.46	1.29	1.12
23	559.5	2.22	2.36	2.10	1.63	1.39	1.22
24	603.7	2.36	2.58	2.29	1.79	1.49	1.31
25	637.3	2.40	2.75	2.42	1.91	1.55	1.37
26	680.8	2.61	3.00	2.62	2.05	1.66	1.48
27	711.8	2.91	3.31	2.86	2.25	1.81	1.62
28	759.3	3.22	3.58	3.11	2.41	1.93	1.74
29	790.5	3.43	3.76	3.26	2.52	2.02	1.83
30	804.5	3.60	3.91	3.39	2.58	2.07	1.90
31	816.6	4.02	4.33	3.71	2.72	2.17	1.98
32	829.4	4.61	5.22	4.25	2.89	2.28	2.06
33	831.6	4.89	5.59	4.50	2.93	2.31	2.08
34	832.5	5.18	5.94	5.50	2.99	2.36	2.12
35	827.1	5.35	-7.55	4.55	3.00	2.43	2.20
36	609.1	4.49	5.74	3.65	2.21	2.00	1.71
37	541.1	4.32	5.51	5.44	2.04	1.86	1.48
38	475.8	4.11	5.30	5.27	1.90	1.89	1.23
39	462.8	4.11	5.30	5.28	1.90	1.79	1.17
40	466.8	4.16	5.38	5.36	1.75	1.56	1.12
41	464.5	4.19	5.44	5.44	1.77	1.48	1.05
42	460.9	4.27	5.53	5.55	1.83	1.46	1.06
43	432.5	4.31	5.58	3.48	1.85	1.08	1.11
44	443.1	4.38	5.70	3.60	1.92	1.21	1.21
45	457.4	4.46	-7.55	3.68	1.94	1.31	1.33

## A.4 – DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE CISALHAMENTO

### Laje Maciça (SS1)

Passo de Carga	Carga Total (KN)	EE1 (%)	EE2 (%)	EE3 (%)	EE4 (%)	EE5 (%)	EE6 (%)
1	66.9	0.00482	0.00046	0.00069	0.00023	0.00253	0.00138
2	68.9	0.00574	0.00046	0.00046	0.00023	0.0023	0.00115
3	91.8	0.00322	-0.0007	-0.0007	-0.0025	-0.0002	-0.0007
4	110.2	0.0023	-0.0011	-0.0018	-0.0034	-0.0002	-0.0009
5	130.3	0.00367	7.4E-19	-0.0009	-0.0039	-0.0002	-0.0005
6	149.3	0.00207	-0.0016	-0.0023	-0.0069	-0.0028	-0.0021
7	170.8	0.00092	-0.0016	-0.0025	-0.0073	-0.0039	-0.0028
8	189.7	-0.0007	-0.0023	-0.0032	-0.0051	-0.0064	-0.0041
9	209.4	0.00023	-0.0018	-0.003	-0.0023	-0.0071	-0.0039
10	230.0	-0.0028	-0.0037	-0.0039	0.02136	0.00758	-0.0002
11	250.2	-0.0016	-0.0044	-0.0044	0.03767	0.01677	0.01952
12	269.6	-0.0094	-0.0119	-0.0085	0.05122	0.03376	0.07923
13	289.8	-0.0113	-0.0142	-0.0103	0.06086	0.05213	0.11437
14	309.8	-0.008	-0.0209	-0.0147	0.07234	0.06614	0.13298
15	330.2	-0.0028	-0.0257	-0.017	0.09508	0.08337	0.14515
16	349.8	-0.0005	-0.0294	-0.0191	0.12057	0.09301	0.15388
17	369.4	0.04249	-0.0092	0.00161	0.20302	0.09233	0.16375
18	407.3	0.11667	0.0085	0.0124	0.30132	0.10496	0.17638
19	448.1	0.16743	0.02182	0.02159	0.28685	0.11322	0.18235
20	486.3	0.22048	0.04111	0.03353	0.2919	0.14101	0.19889
21	529.9	0.3027	0.08567	0.06798	0.29604	0.23977	0.22094
22	570.7	0.3902	0.13757	0.11185	0.31005	0.28042	0.23127
23	608.4	0.45657	0.19774	0.14331	0.33233	0.33347	0.2609
24	648.5	0.53167	0.31648	0.17569	0.36769	0.39319	0.29144
25	691.0	0.6054	0.39824	0.23035	0.42006	0.44463	0.3275
26	728.4	0.67177	0.46622	0.27123	0.47954	0.48115	0.36356
27	769.6	0.75904	0.56383	0.32727	0.57853	0.52777	0.42258
28	827.4	0.83966	0.63227	0.36792	0.65156	0.55671	0.45956
29	868.9	0.95081	0.70346	0.41569	0.7347	0.59322	0.50228
30	905.6	1.02362	0.76295	0.4568	0.79786	0.62584	0.55303
31	955.4	1.14281	0.83713	0.51698	0.86101	0.64214	0.55671
32	968.3	1.24387	0.87456	0.56911	0.88421	0.66924	0.60838
33	1027.7	1.43954	0.95311	0.66098	0.92325	0.703	0.67085
34	1040.8	1.59916	1.04084	0.76088	1.11502	0.82863	0.78454
35	1022.2	1.81206	2.849	1.7048	0.96804	3.16938	2.58833
36	1013.7	1.937	3.71414	2.50496	1.05233	4.26304	-7.7482
37	972.3	1.98798	-7.4986	-8.2523	1.80723	-7.7287	-7.7482
38	870.7	1.968	-7.4986	-8.2523	1.96639	-7.7287	-7.7482
39	783.8	1.97053	-7.4986	-8.2523	2.01761	-7.7287	-7.7482
40	739.9	1.96341	-7.4986	-8.2523	2.02358	-7.7287	-7.7482
41	714.1	1.94228	-7.4986	-8.2523	1.95927	-7.7287	-7.7482
42	633.7	1.89014	-7.4986	-8.2523	1.96341	-7.7287	-7.7482
43	608.5	1.78955	-7.4986	-8.2523	2.04448	-7.7287	-7.7482
44	470.8	1.77416	-7.4986	-8.2523	2.00452	-7.7287	-7.7482
45	545.5	1.80287	-7.4986	-8.2523	1.94159	-7.7287	-7.7482

### Laje Maciça (SS2)

Passo de Carga	Carga Total (KN)	EE1 (%)	EE2 (%)	EE3 (%)	EE4 (%)	EE5 (%)	EE6 (%)
1	56.9	-0.0002	-0.0002	-0.003	-0.0002	2.8E-18	0.00023
2	70.7	-0.0002	-0.0011	-0.0062	-0.0014	-0.0005	-0.0009
3	90.8	-0.0014	-0.0025	-0.0067	-0.003	-0.0009	-0.0011
4	113.5	-0.0021	-0.0032	-0.0078	-0.0055	-0.0018	-0.0023
5	130.0	-0.0023	-0.0039	-0.0177	-0.0064	-0.0023	-0.0025
6	149.7	-0.0025	-0.0053	-0.0158	-0.008	-0.0028	-0.0032
7	171.0	-0.0041	-0.0064	-0.0149	-0.0101	-0.0037	-0.0046
8	189.5	-0.0039	-0.0076	-0.0163	-0.0113	-0.0041	-0.0051
9	207.9	-0.0041	-0.0099	-0.0177	-0.0106	-0.0051	-0.0062
10	230.0	-0.0009	-0.0126	-0.0397	0.02021	0.00712	-0.008
11	250.7	0.00758	-0.0152	-0.0464	0.04249	0.03491	0.02021
12	268.3	0.02366	-0.0257	-0.0549	0.05856	0.05144	0.04501
13	288.3	0.03169	-0.0331	-0.0556	0.0921	0.07763	0.07855
14	308.9	0.02618	-0.0326	-0.0645	0.12195	0.09876	0.0999
15	328.8	0.03353	-0.0296	-0.0547	0.14033	0.12815	0.12861
16	350.2	0.04226	-0.0271	-0.0475	0.15571	0.14492	0.14836
17	374.3	0.05122	-0.0287	-0.0429	0.17179	0.14974	0.15411
18	409.7	0.06545	-0.0299	-0.0301	0.1959	0.15089	0.16031
19	450.3	0.11483	-0.0202	-0.0009	0.22967	0.15158	0.16811
20	491.2	0.1479	-0.0177	-0.0131	0.27835	0.1711	0.1773
21	537.0	0.19108	-0.0172	0.03721	0.36379	0.19016	0.18649
22	571.2	0.22829	-0.0158	0.04134	0.44394	0.20922	0.19659
23	607.8	0.27583	-0.0133	-0.0214	0.51514	0.22255	0.20555
24	654.2	0.32176	-0.0048	-0.0356	0.624	0.24138	0.22232
25	687.5	0.36976	0.01837	-0.0025	0.74756	0.26228	0.23931
26	731.8	0.40237	0.03904	0.00413	0.85137	0.2857	0.26618
27	767.5	0.43016	0.06936	0.11024	1.00662	0.31349	0.29879
28	813.8	0.55923	0.18281	0.21221	1.19104	0.35047	0.33439
29	838.6	0.40536	0.3213	0.22071	1.46595	0.42856	0.36402
30	893.1	0.50963	0.44371	0.22484	1.56034	0.449	0.38997
31	922.4	0.56612	0.50411	0.08199	1.54679	0.46553	0.42787
32	924.1	0.56383	0.52616	0.24207	1.55231	0.47633	0.43889
33	925.0	0.545	0.58794	2.02381	1.54358	0.49539	0.45405
34	967.6	0.50526	0.87778	2.51322	1.50293	0.76272	0.64421
35	972.0	0.50159	0.94576	2.61313	1.48203	0.80934	0.67407
36	986.8	0.47954	1.30817	2.79824	1.16968	0.80727	1.32103
37	968.1	0.44509	1.74545	3.10806	1.01971	0.77397	1.27946
38	904.0	0.48896	2.10189	1.70664	0.94622	0.6782	0.77076
39	562.1	0.50228	2.047	3.30603	0.9747	0.66947	0.72505
40	484.3	0.48965	1.99648	3.29294	0.97033	0.66098	0.68647
41	467.2	0.48505	1.97581	3.30029	0.96988	0.65707	0.67407
42	456.3	0.47541	1.95537	3.2601	0.96781	0.65386	0.66052
43	458.9	0.47196	1.94963	3.2307	0.96643	0.655	0.65248
44	458.9	0.47104	1.95652	3.26515	0.97033	0.66006	0.65707
45	458.7	0.47587	1.96754	3.26722	0.97562	0.6596	0.63824



**Laje BubbleDeck (BD1)**

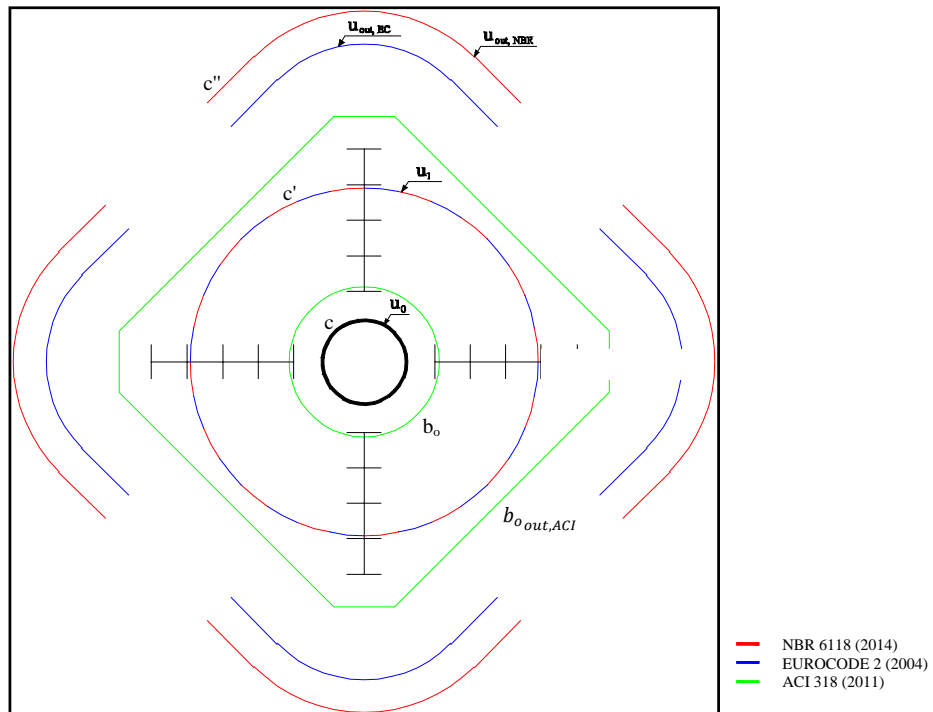
<b>Passo de Carga</b>	<b>Carga Total (KN)</b>	<b>EE1 (%)</b>	<b>EE2 (%)</b>	<b>EE3 (%)</b>	<b>EE4 (%)</b>	<b>EE5 (%)</b>	<b>EE6 (%)</b>
1	49.0	0.00367	0.00299	0.00138	0.00413	0.00367	0.00253
2	57.7	0.017	0.01355	0.00643	0.01883	0.01493	0.01194
3	77.9	0.00276	0.00184	0.00092	0.00138	1.1E-17	-0.0002
4	98.9	-0.0209	-0.0186	-0.0096	-0.0276	-0.0246	-0.0209
5	115.8	-0.0377	-0.0328	-0.0168	-0.0478	-0.0409	-0.0349
6	137.1	-0.037	-0.0331	-0.0165	-0.0469	-0.0402	-0.0354
7	157.3	-0.011	-0.0117	-0.006	-0.0163	-0.0152	-0.0156
8	176.7	0.01125	0.00712	0.00367	0.01056	0.00597	0.00115
9	197.2	0.01125	0.00781	0.00413	0.01033	0.0039	-0.0014
10	217.9	-0.0136	-0.0119	-0.0055	-0.0195	-0.022	-0.023
11	236.6	-0.0379	-0.0319	-0.0154	-0.051	-0.0471	-0.0443
12	261.3	-0.0384	-0.0402	-0.0181	-0.0576	-0.0514	-0.0489
13	277.9	0.00322	-0.0057	-0.0018	0.01355	-0.022	-0.0322
14	300.3	0.017	0.00873	0.00413	0.0333	-0.0071	-0.0301
15	317.4	-0.0188	0.00299	-0.0218	0.0039	-0.0211	-0.0521
16	337.6	-0.0521	-0.0126	-0.0441	-0.031	-0.037	-0.0774
17	357.6	-0.0365	0.00666	-0.0395	-0.0014	-0.0069	-0.0643
18	399.1	0.00253	0.07418	-0.02	0.05581	0.07763	-0.0331
19	439.6	0.01952	0.13183	0.00988	0.08681	0.14078	-0.0237
20	475.3	0.01447	0.15043	0.01906	0.07074	0.17317	-0.0377
21	518.9	0.04616	0.17753	0.02457	0.06339	0.20371	-0.0475
22	557.0	0.1525	0.21726	0.04364	0.10289	0.24344	-0.0356
23	598.3	0.26343	0.26687	0.0774	0.17018	0.30729	-0.0099
24	635.2	0.36034	0.28731	0.113	0.24	0.31487	0.0209
25	674.9	0.41064	0.28846	0.15388	0.27032	0.3236	0.03284
26	718.9	0.43338	0.29558	0.18235	0.28616	0.32107	0.04111
27	761.8	0.44739	0.31372	0.21382	0.28915	0.31005	0.08015
28	797.1	0.45336	0.3445	0.22071	0.29833	0.31051	0.16237
29	817.2	0.47839	0.38262	0.22691	0.3151	0.33738	0.26802
30	788.9	0.44004	0.38813	0.25056	0.31189	0.3546	0.28456
31	784.1	0.44831	0.40605	0.27767	0.31625	0.36769	0.48276
32	792.4	0.46323	0.4405	0.3337	0.32406	0.49814	1.30013
33	789.9	0.45566	0.45657	0.35713	0.32796	0.67039	1.98913
34	687.4	0.44188	0.44808	0.35024	0.31074	0.62377	2.00107
35	643.4	0.43108	0.45083	0.33393	0.29994	0.47311	1.19219
36	535.7	0.42488	0.45611	0.33003	0.28318	0.44279	1.04291
37	511.4	0.42534	0.46232	0.32842	0.28226	0.43154	0.96528
38	511.5	0.42465	0.46484	0.32957	0.28065	0.43131	0.98411
39	517.1	0.42787	0.46898	0.3321	0.27744	0.42534	0.95196
40	516.0	0.43292	0.47449	0.33485	0.27055	0.37803	0.73056
41	518.9	0.43292	0.47334	0.33508	0.26343	0.37183	0.73102
42	525.2	0.4343	0.47678	0.33967	0.26572	0.37619	0.77627
43	531.2	0.43544	0.47564	0.34082	0.26756	0.35782	0.82427
44	522.6	0.43292	0.47104	0.33738	0.24276	0.2942	0.81807

**Laje BubbleDeck (BD2)**

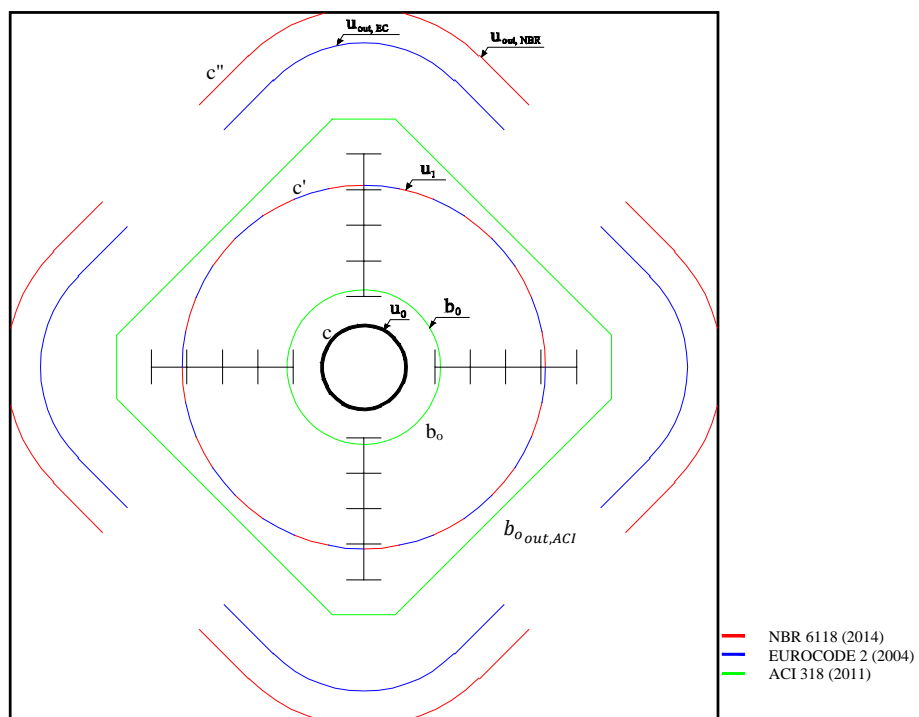
<b>Passo de Carga</b>	<b>Carga Total (KN)</b>	<b>EE1 (%)</b>	<b>EE2 (%)</b>	<b>EE3 (%)</b>	<b>EE4 (%)</b>	<b>EE5 (%)</b>	<b>EE6 (%)</b>
1	50.6	-0.0002	0.00023	-1E-17	-2E-16	0.00023	-9E-17
2	59.1	0.00092	0.00046	0.00023	-2E-16	3E-18	-9E-17
3	80.4	0.00207	0.00184	0.00092	-2E-16	-0.0002	-0.0009
4	98.1	0.00276	0.00344	0.00161	-2E-16	-0.0005	-0.0011
5	119.5	0.00367	0.00551	0.00253	-2E-16	-0.0007	-0.0016
6	141.0	0.00482	0.00758	0.00367	-2E-16	-0.0007	-0.0018
7	158.7	0.00689	0.00965	0.00505	7.62167	-0.0002	-0.0011
8	178.8	0.0085	0.01125	0.00597	7.62075	-0.0005	-0.0018
9	199.2	0.00988	0.01263	0.00712	7.61983	-0.0007	-0.0023
10	217.6	0.01033	0.01401	0.00804	7.6173	-0.0016	-0.0032
11	239.2	0.01378	0.01125	0.0085	7.60398	-0.0032	-0.0067
12	255.4	0.00574	0.00505	0.00367	7.59824	-0.0076	-0.0119
13	280.6	0.00781	0.00758	0.00551	7.61523	-0.0087	-0.0129
14	297.1	0.01148	0.01102	0.00666	7.6049	-0.0152	-0.0147
15	316.3	0.01125	0.0147	0.00643	7.60789	0.00069	-0.0207
16	338.3	0.00023	0.01539	-0.0021	7.59709	0.00161	0.00436
17	357.6	-0.0009	0.03789	0.00436	7.59985	0.01286	0.01722
18	377.3	-0.0009	0.08038	0.00896	7.5987	0.02549	0.02871
19	398.3	-0.0025	0.10289	0.00804	7.60054	0.04249	0.03698
20	436.1	-0.0046	0.13803	0.00873	7.60145	0.08934	0.05971
21	477.6	-0.0039	0.15502	0.00781	7.60375	0.13367	0.07832
22	517.1	0.0023	0.18144	0.00712	7.6359	0.18167	0.09439
23	559.5	0.10312	0.1943	0.00689	7.7071	0.20762	0.09439
24	603.7	0.13022	0.21382	0.01079	7.78059	0.20877	0.10702
25	637.3	0.16237	0.22392	0.02044	7.78633	0.20486	0.12149
26	680.8	0.20073	0.24758	0.03261	7.80011	0.19705	0.13895
27	711.8	0.54614	0.3112	0.07097	7.82216	0.17845	0.175
28	759.3	0.83966	0.56498	0.20073	7.83479	0.18258	0.18649
29	790.5	1.08563	0.68762	0.27422	7.85133	0.18924	0.20417
30	804.5	1.22251	0.83185	0.36953	7.86993	0.19246	0.21566
31	816.6	1.28061	1.01236	0.39456	7.88762	0.19682	0.23196
32	829.4	1.40601	1.25925	0.45106	7.9161	0.19889	0.25998
33	831.6	1.45791	1.37363	0.48253	7.93814	0.20096	0.26894
34	832.5	1.50362	1.47376	0.50664	7.95146	0.20256	0.27583
35	827.1	1.4903	1.51878	0.55303	7.96616	0.20922	0.28088
36	609.1	-8.1579	1.46825	1.20505	7.99234	0.17983	0.20509
37	541.1	-8.1579	1.46021	1.16647	7.98936	0.17133	0.19613
38	475.8	-8.1579	1.45011	1.10951	7.96777	0.15594	0.18052
39	462.8	-8.1579	1.44482	1.0978	7.94871	0.15181	0.17891
40	466.8	-8.1579	1.43885	1.09642	7.9432	0.14928	0.17983
41	464.5	-8.1579	1.41497	1.09298	7.94159	0.14744	0.17799
42	460.9	-8.1579	1.39682	1.07736	7.93424	0.14193	0.17478
43	432.5	-8.1579	1.37661	1.04061	7.92758	0.13481	0.1672
44	443.1	-8.1579	1.38029	1.03487	7.94297	0.13321	0.16582
45	457.4	-8.1579	1.38327	1.03326	7.94228	0.13367	0.16559

# APÊNDICE B – PERÍMETROS CRÍTICOS

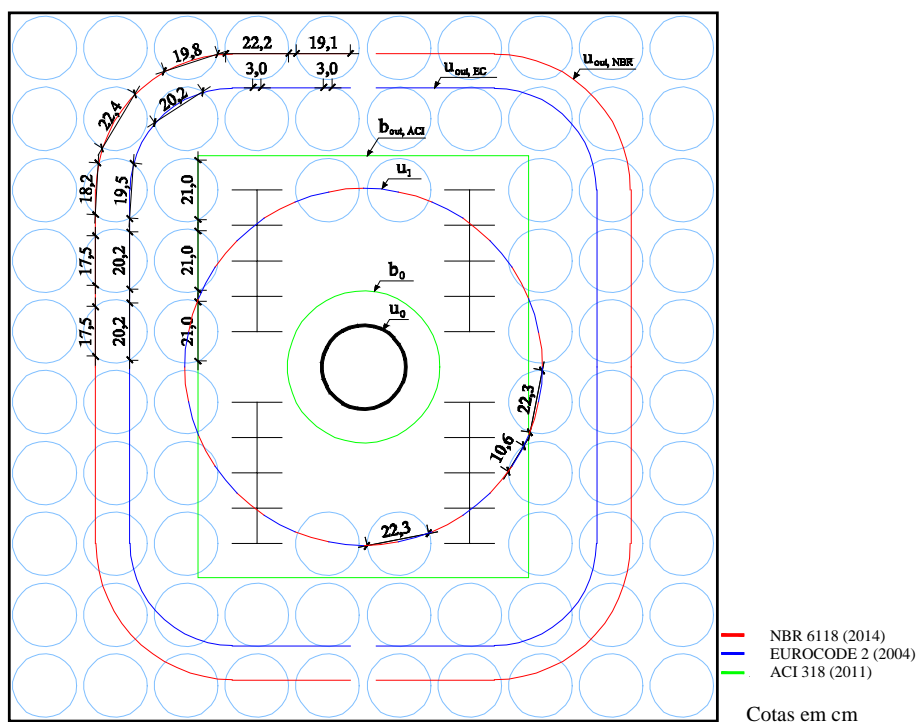
## B.1 – PERÍMETROS CRÍTICOS (LAJE SS1)



## B.2 – PERÍMETROS CRÍTICOS (LAJE SS2)



### B.3 – PERÍMETROS CRÍTICOS (LAJE BD1)



### B.4 – PERÍMETROS CRÍTICOS (LAJE BD2)

