



**COMPORTAMENTO À PUNÇÃO DE LAJES DE
CONCRETO ARMADO TIPO *BUBBLEDECK***

WANDERLEY GUSTAVO NICÁCIO

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

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**COMPORTAMENTO À PUNÇÃO DE LAJES DE
CONCRETO ARMADO TIPO *BUBBLEDECK***

WANDERLEY GUSTAVO NICÁCIO

ORIENTADOR: GUILHERME SALES S. A. MELO (UnB)

COORIENTADOR: JOAQUIM A. O. BARROS (UMinho)

**TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO
CIVIL**

PUBLICAÇÃO: E.TD - 2A/18

BRASÍLIA/DF: MARÇO – 2018

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

**COMPORTAMENTO À PUNÇÃO DE LAJES DE CONCRETO
ARMADO TIPO *BUBBLEDECK***

WANDERLEY GUSTAVO NICÁCIO

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

APROVADA POR:

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

**Prof. Joaquim António de Oliveira Barros, PhD (UMinho)
(Co-orientador)**

**Prof. Américo Campos Filho, D.Sc (UFRGS)
(Examinador externo)**

**Prof. Yosiaki Nagato, D.Sc
(Examinador externo)**

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

BRASÍLIA/DF, 22 DE MARÇO DE 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

NICÁCIO, WANDERLEY GUSTAVO

Comportamento à punção de lajes de concreto armado tipo *BubbleDeck* [Distrito Federal] 2018.

xxii, 175p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2018). Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Punção

3. *BubbleDeck*

I. ENC/FT/UnB

2. Lajes lisas

4. Lajes aliviadas

II. Título (Doutor)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NICACIO, W. G. (2018). Comportamento à punção de lajes de concreto armado tipo *BubbleDeck*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD - 2A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 200p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Wanderley Gustavo Nicácio.

TÍTULO: Comportamento à punção de lajes de concreto armado tipo *BubbleDeck*.

GRAU: Doutorado

ANO: 2018

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

Wanderley Gustavo Nicácio

DEDICATÓRIA

Dedico esta conquista aos meus pais, José e Maria (em memória), e aos meus irmãos: Luis Gustavo, Luiza, Miguel, Valéria e Wanderson. Estes são a minha vida.

Existe uma tendência humana natural em querer repetir o que anteriormente se realizou com sucesso. No entanto, os velhos hábitos não devem permitir que a voz do avanço da engenharia seja silenciada.

(William L. Gamble).

AGRADECIMENTOS

Ao professor Guilherme Sales pela orientação objetiva, acompanhamento, cobranças e confiança depositada desde o início da pesquisa, sou muito grato.

Ao meu co-orientador Joaquim Barros por ter me recebido como um rei durante o estágio em Portugal. Faço das suas as minhas palavras, o senhor é um ser humano extraordinário.

Ao professor Yosiaki Nagato que mesmo aposentado me deu a honra de sua participação em minha defesa. Obrigado grande Mestre, me espelho no senhor pessoal e profissionalmente.

Ao professor/colega Honorato pelas orientações, sugestões e contribuições durante todo processo.

Agradeço em especial aos colegas Henrique e Wellington, reconheço o quão difícil e desafiador é trabalhar em um laboratório, obrigado de verdade. Aos amigos Maurício e Eduardo, posso dizer que meu nome não ficará em uma placa pelo meio do caminho, agora me junto a vocês, grandes amigos, no topo do Everest.

Aos amigos de agora e sempre: Aílin, Agno, Alejandro, Caio, Carlyne Mendes, Camilla, Didi, Elisandra, Elaine, Fabiano, Jerfson, Galileu, Maria Cláudia, Marcus, Marília, Nilcio, Nívea Gaby, Ramon, Rosane, Sebas, Uchôa, Wallison e Wilson.

Eduardo e Gelsão, vocês são mais do que amigos agora, obrigado irmãos e vou dizer viu: Cabra da roça é humilhado demais.

Um agradecimento especial ao meu melhor amigo de sempre Admilson Cândido de Oliveira e aos parceiros Lucas Dresch e Diego de Paula.

Agradeço também aos professores que no decorrer da minha vida incentivaram e contribuíram em minha formação, especialmente: Iraci, Anderson Nicácio, Valdete, Benvinda, Cláudia, Guilherme, Nagato, Barros, Luciano, Valdirene e Paulo Chaves.

Aos técnicos de laboratório Júlio, Leandro, Magno, Patrícia, Washington e aos grandes Severino e Pedrão pelo auxílio essencial na realização dos ensaios.

Agradeço imensamente à minha família pela incentivo e amor incondicional, em especial: ao meu pai José, tia Teresinha, meus irmãos Ana Luiza, Luiz Gustavo, Miguel,

Wanderson e Valéria (Mulher maravilhosa), meus primos Miguel, Crislayne e Léo, tios Manoel, Cícero, Paulo, Beta e Nicácio.

À Alejandra, minha linda namorada que mais do que ninguém esteve ao meu lado em todos os momentos e me ajudou a ser o que sou agora. Minha eterna gratidão por fazer parte desta caminhada.

À CAPES (Programa PDSE/Processo número 88881.134825/2016-01) pelo apoio financeiro durante o período de estágio em Portugal.

À *BubbleDeck* Brasil e toda sua equipe, representada pela figura do senhor Wlicio, por viabilizar esta pesquisa com seu apoio técnico e financeiro.

RESUMO

COMPORTAMENTO À PUNÇÃO DE LAJES DE CONCRETO ARMADO TIPO *BUBBLEDECK*

Autor: Wanderley Gustavo Nicácio

Orientador: Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo

Co-orientador: Joaquim António de Oliveira Barros

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, 22 de março de 2018

Ao longo dos anos foram desenvolvidos novos sistemas de lajes com vazios moldados a partir de formas de plástico, com destaque para as lajes *BubbleDeck* (BD). Nestes sistemas, o conceito consiste em colocar formas de plástico reciclado oco entre duas malhas de armadura, no centro de uma laje de concreto. A laje BD é comumente associada ao sistema de lajes lisas, que tem como uma de suas preocupações do ponto de vista de dimensionamento a ruptura localizada por punção na ligação laje-pilar.

Esta pesquisa avalia experimentalmente o comportamento à punção, num sistema de lajes lisas de concreto armado dos tipos BD e maciça, localizadas internamente à edificação e submetidas a carregamento simétrico. No total foram ensaiados 11 modelos com dimensões de 2500 x 2500 mm de comprimento base, altura nominal de 280 mm, pilares circulares centrados com dimensão de 300 mm de diâmetro e mesma taxa da armadura de flexão, variando-se: a utilização de pré-laje, a distribuição das armaduras de cisalhamento e sua respectiva forma de ancoragem.

Os resultados obtidos com os ensaios possibilitaram avaliar comparativamente o comportamento dos modelos quanto aos deslocamentos verticais, deformação específica no concreto, no aço e na armadura de cisalhamento, carga última, fissuração, superfície e modo de ruptura. São apresentadas as previsões da capacidade última das ligações ensaiadas conforme as prescrições adaptadas das normas ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2004) e ABNT NBR 6118 (2014), incluindo também as recomendações do *fib* Model Code 2010 (2012). De posse de todos resultados, foi proposta uma adequação da NBR 6118 (2014) para o caso de punção em lajes BD, de forma a apresentar previsões mais próximas dos resultados experimentais. Por fim, foi verificada a viabilidade da utilização do software FEMIX 4.0 para representar o comportamento de lajes *BubbleDeck*.

Palavras chave: Punção, Lajes lisas, *BubbleDeck*, Lajes aliviadas.

ABSTRACT

PUNCHING BEHAVIOUR OF BUBBLEDECK TYPE REINFORCED CONCRETE FLAT PLATES

Author: Wanderley Gustavo Nicácio
Supervisor: Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo
Co-advisor: Joaquim António de Oliveira Barros
Post-graduation Program in Structures and Civil Construction
Brasilia, March of 2018

Various types of voided concrete slabs have been used throughout the years, especially the BubbleDeck slabs (BD). In these systems, the concept consists of placing forms of hollow plastic balls between the tensile and compressive reinforcement meshes, in the middle of the concrete slab. The BD slab is commonly associated with the flat slab system, which warns the designer about a punching shear failure at slab-column connections.

This research experimentally evaluates the behavior in punching shear in systems of BD type flat slabs and solid slabs, simulating an inner slab-column connection of a building and submitted to symmetrical loading. In total, 11 models measuring 2500 x 2500 mm in length, nominal height of 280 mm, supported on centered circular column with a 300 mm diameter and the same flexural reinforcement ratio, varying the use of precast panel, the distribution of shear reinforcement and its anchorage.

The results obtained from the experimental tests are comparatively shown with respect to the slabs vertical displacement, the concrete, flexural and shear reinforcement strains, ultimate loads, cracking patterns, surface and failure modes. Predictions of ultimate capacity of the tested connections are calculated according to the requirements of the ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2004) and ABNT NBR 6118 (2014) standards, and the fib Model Code 2010 (2012). With these results, it was proposed an amendment to of NBR 6118 (2014) for the case of punching in BD slabs, in order to match the experimental results. Finally, the feasibility of the FEMIX 4.0 software to numerically simulate the behavior of BubbleDeck slab was verified.

Keywords: Punching, Flat Slab, *BubbleDeck*, Voided slabs.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 1 |
| 1.2. JUSTIFICATIVA | 4 |
| 1.3. OBJETIVOS | 5 |
| 1.4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL | 5 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 2.1. LAJES LISAS BIDIRECIONAIS COM VAZIOS | 6 |
| 2.1.1. <i>BubbleDeck</i> | 8 |
| 2.1.2. Cobiax..... | 10 |
| 2.1.3. U-Boot | 12 |
| 2.1.4. AirDeck | 14 |
| 2.2. PESQUISAS EXPERIMENTAIS E TEÓRICAS REALIZADAS COM LAJES BUBBLEDECK | 15 |
| 2.2.1. HELD e PFEFFER (2002)..... | 17 |
| 2.2.2. CEBALLOS (2017)..... | 20 |
| 2.2.3. VALIVONIS <i>et al</i> (2017)..... | 23 |
| 2.3. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO DE LAJES MACIÇAS | 26 |
| 2.3.1. ACI 318 (2014)..... | 27 |
| 2.3.2. EUROCODE 2 (2004)..... | 28 |
| 2.3.3. ABNT NBR 6118 (2014) | 30 |
| 2.3.4. <i>fib</i> Model Code 2010 (2012) | 32 |
| 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL | 37 |
| 3.1. CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIADAS..... | 37 |
| 3.1.1. Sequência de instalação das lajes | 44 |
| 3.1.2. Armaduras de flexão negativa das lajes | 46 |
| 3.1.3. Armação das telas inferiores e superiores das lajes..... | 50 |
| 3.1.4. Armaduras de cisalhamento das lajes..... | 52 |
| 3.1.5. Armaduras dos pilares | 58 |
| 3.1.6. Elementos característicos do sistema <i>BubbleDeck</i> | 59 |

| | |
|--|------------|
| 3.2. INSTRUMENTAÇÃO | 62 |
| 3.2.1. Deslocamentos verticais | 62 |
| 3.2.2. Deformações nas armaduras de flexão | 62 |
| 3.2.3. Deformações nas armaduras de cisalhamento | 64 |
| 3.2.4. Deformações no concreto | 65 |
| 3.3. PROCESSO CONSTRUTIVO DOS MODELOS | 66 |
| 3.4. ENSAIOS DE MATERIAIS | 69 |
| 3.4.1. Concreto | 69 |
| 3.4.2. Aço | 70 |
| 3.5. SISTEMA DE ENSAIO | 71 |
| 3.6. RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS LAJES | 74 |
| 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS | 76 |
| 4.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS | 76 |
| 4.1.1. Concreto | 76 |
| 4.1.2. Aço | 76 |
| 4.2. COMPORTAMENTO DAS LAJES | 77 |
| 4.2.1. Carga de ruptura | 79 |
| 4.2.2. Deslocamentos verticais | 80 |
| 4.2.3. Deformações na superfície do concreto..... | 86 |
| 4.2.4. Deformações nas armaduras de flexão | 93 |
| 4.2.5. Deformações nas armaduras de cisalhamento | 102 |
| 4.2.6. Mapa de fissuração | 107 |
| 4.2.7. Superfície de ruptura | 112 |
| 4.2.8. Modo de ruptura | 118 |
| 5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS MODELOS DE ENSAIO | 120 |
| 5.1. PROGRAMA FEMIX 4.0 | 120 |
| 5.2. MODELOS CONSTITUTIVOS..... | 121 |
| 5.2.1. Concreto | 121 |
| 5.2.2. Aço | 123 |
| 5.2.3. Elementos pontuais de mola (<i>Point Spring</i>)..... | 124 |
| 5.3. DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO..... | 125 |
| 5.4. PARÂMETROS DOS MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS | 127 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5.5. | COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS | 129 |
| 5.5.1. | Comportamento carga deslocamento - FEMIX..... | 129 |
| 5.5.2. | Comportamento carga deformação nas armaduras principais - FEMIX..... | 131 |
| 5.5.3. | Comportamento carga deformação dos estribos - FEMIX..... | 133 |
| 5.5.4. | Comportamento carga deformação do concreto - FEMIX | 135 |
| 5.5.5. | Padrão de fissuração - FEMIX | 137 |
| 5.6. | ANÁLISE DETALHADA DAS LAJES DA 1ªSÉRIE | 141 |
| 6. | ANÁLISE DAS EXPRESSÕES NORMATIVAS ADAPTADAS..... | 143 |
| 6.1. | CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 143 |
| 6.2. | VERIFICAÇÃO COMO LAJE MACIÇA | 145 |
| 6.3. | PROPOSTA DE CÁLCULO DA <i>BUBBLEDECK</i> | 147 |
| 6.4. | PROPOSTA DE SUBTRAÇÃO DE ÁREAS | 150 |
| 6.5. | PROPOSTAS PARA ADEQUAÇÃO DA NBR 6118:2014..... | 159 |
| 6.5.1. | Verificação adicional do cisalhamento nas nervuras..... | 159 |
| 6.5.2. | Proposta de verificação à punção de acordo com a NBR 6118..... | 161 |
| 7. | CONCLUSÕES..... | 165 |
| 7.1. | PROGRAMA EXPERIMENTAL | 165 |
| 7.2. | ANÁLISE NUMÉRICA | 167 |
| 7.3. | MÉTODOS TEÓRICOS DE CÁLCULO | 168 |
| 7.4. | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 169 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 170 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Sistemas construtivos de lajes | 2 |
| Figura 1.2 – Sistemas construtivos de lajes <i>BubbleDeck</i> | 2 |
| Figura 1.3 – Seção de ruptura de uma ligação laje-pilar sem armadura de cisalhamento [adaptado de CEB-FIP/MC90 (1993)] | 3 |
| Figura 1.4 – Distribuição de esferas em lajes <i>BubbleDeck</i> | 4 |
| Figura 2.1 – Laje com vazios (Sistema <i>BubbleDeck</i>)..... | 6 |
| Figura 2.2 – Exemplos de lajes bidirecionais com vazios formados com moldes plásticos. | 7 |
| Figura 2.3 – <i>Millenium Tower</i> em Rotterdam, Holanda - Disponível em: < http://millennium-tower.nl/en/ > | 8 |
| Figura 2.4 – Obras da <i>BubbleDeck</i> no Brasil | 9 |
| Figura 2.5 – Tipos construtivos de lajes <i>BubbleDeck</i> | 10 |
| Figura 2.6 – Execução de lajes Cobiax..... | 11 |
| Figura 2.7 – Execução de lajes Cobiax..... | 12 |
| Figura 2.8 – Lajes U-Boot (Página Web U-Boot)..... | 13 |
| Figura 2.9 – Lajes AirDeck (Página Web AirDeck) | 15 |
| Figura 2.10 – Lajes ensaiadas [adaptado de HELD e PFEFFER (2002)] | 18 |
| Figura 2.11 – Resultados das simulações computacionais [HELD e PFEFFER (2002)] | 19 |
| Figura 2.12 – Proposta à norma (adaptado de [HELD e PFEFFER, 2002]) | 19 |
| Figura 2.13 – Formas das lajes, CEBALLOS (2017) (continuação)..... | 22 |
| Figura 2.14 – Armação das lajes, CEBALLOS (2017) | 22 |
| Figura 2.15 – Formas e armação da lajes de VALIVONIS <i>et al.</i> (2017). | 24 |
| Figura 2.16 – Definição do perímetro de controle de acordo com ACI 318 (2014) | 28 |
| Figura 2.17 – Perímetro de controle típico ao redor de áreas carregadas..... | 29 |
| Figura 2.18 – Definição do perímetro de controle de acordo com Eurocode 2 (2004) para lajes com armadura de cisalhamento | 30 |
| Figura 2.19 – Perímetro de controle em pilares internos de acordo com ABNT NBR 6118 (2014) | 31 |
| Figura 2.20 – Definição do perímetro de controle de acordo com ABNT NBR 6118 (2014) | 32 |
| Figura 2.21 – Perímetro de controle de acordo com <i>fib</i> Model Code 2010 (2012)..... | 32 |
| Figura 2.22 – Altura útil da laje de acordo com <i>fib</i> Model Code 2010 (2012) | 33 |
| Figura 2.23 – Rotação ψ da laje de acordo com <i>fib</i> Model Code 2010 (2012)..... | 33 |
| Figura 2.24 – Armadura de cisalhamento ativada na ruptura de acordo com <i>fib</i> Model Code 2010 (2012) | 35 |
| Figura 2.25 – Perímetro de controle de acordo com <i>fib</i> Model Code 2010 (2012) para lajes com armadura de cisalhamento. | 36 |
| Figura 2.26 – Regras de detalhamento para armadura de cisalhamento de acordo com <i>fib</i> Model Code 2010 (2012) | 36 |
| Figura 3.1 – Dimensões das lajes ensaiadas. | 38 |
| Figura 3.2 – 1ª Série de concretagem | 40 |
| Figura 3.3 – 2ª Série de concretagem | 41 |
| Figura 3.4 – 3ª Série de concretagem | 42 |
| Figura 3.5 – Detalhe genérico das pré-lajes | 42 |
| Figura 3.6 – Distribuição dos modelos por grupos nas séries ensaiadas..... | 43 |
| Figura 3.7 – Vista explodida das lajes Maciças..... | 44 |
| Figura 3.8 – Vista explodida das lajes <i>BubbleDeck</i> | 45 |
| Figura 3.9 – Armaduras de flexão das lajes sem pré-laje..... | 47 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.10 – Detalhes dos ganchos das armaduras de flexão das lajes sem pré-laje.... | 47 |
| Figura 3.11 – Armaduras de flexão das lajes com pré-laje | 48 |
| Figura 3.12 – Detalhes dos ganchos das armaduras de flexão das lajes com pré-laje.... | 48 |
| Figura 3.13 – Perspectiva da armação das lajes <i>BubbleDeck</i> | 49 |
| Figura 3.14 – Perspectiva da armação das lajes maciças | 49 |
| Figura 3.15 – Tela inferior e superior para lajes sem pré laje | 50 |
| Figura 3.16 – Tela inferior e superior para lajes com pré laje..... | 51 |
| Figura 3.17 – Representação tela inferior e superior para lajes sem pré laje | 51 |
| Figura 3.18 – Representação da tela inferior e superior para lajes com pré laje..... | 52 |
| Figura 3.19 – Detalhe genérico da ancoragem das armaduras de cisalhamento – sem escala | 53 |
| Figura 3.20 – Detalhe dos estribos da laje BD28-P3..... | 54 |
| Figura 3.21 – Detalhe dos estribos da laje BD1 | 54 |
| Figura 3.22 – Detalhe dos estribos da laje BD2 | 55 |
| Figura 3.23 – Detalhe dos estribos da laje SS1 | 55 |
| Figura 3.24 – Detalhe dos estribos da laje SS2 | 56 |
| Figura 3.25 – Detalhe dos estribos da laje BD3 | 57 |
| Figura 3.26 – Detalhe dos estribos da laje BD4 | 58 |
| Figura 3.27 – Detalhamento das armaduras dos pilares | 58 |
| Figura 3.28 – Barras de ligação das pré-lajes..... | 59 |
| Figura 3.29 – Treliças do sistema <i>BubbleDeck</i> | 60 |
| Figura 3.30 – Treliças do sistema <i>BubbleDeck</i> | 61 |
| Figura 3.31 – Esferas <i>BubbleDeck</i> | 61 |
| Figura 3.32 – Posição dos LVDT's nas lajes – vista em planta | 62 |
| Figura 3.33 – Posição dos extensômetros das armaduras de flexão (EF) – vista em planta | 63 |
| Figura 3.34 – Processo de colagem dos extensômetros..... | 64 |
| Figura 3.35 – Barras instrumentadas | 64 |
| Figura 3.36 – Posição dos extensômetros dos estribos (EE) – vista em planta..... | 65 |
| Figura 3.37 – Posicionamentos dos extensômetros do concreto. | 66 |
| Figura 3.38 – Extensômetros do concreto colados | 66 |
| Figura 3.39 – Primeira etapa do sistema construtivo | 67 |
| Figura 3.40 – Segunda etapa do sistema construtivo | 68 |
| Figura 3.41 – Terceira etapa do sistema construtivo | 69 |
| Figura 3.42 – Ensaios realizados nos corpos de prova de concreto | 70 |
| Figura 3.43 – Ensaios realizados nos corpos de prova de aço..... | 71 |
| Figura 3.44 – Pontos de carregamento das lajes..... | 72 |
| Figura 3.45 – Equipamentos..... | 73 |
| Figura 3.46 – Esquema 3D de ensaio | 73 |
| Figura 3.47 – Esquema de ensaio | 74 |
| Figura 3.48 – Mecanismo de colapso | 75 |
| Figura 4.1 – Resumo das características das lajes ensaiadas..... | 78 |
| Figura 4.2 – Deslocamentos verticais da laje RSP28 | 80 |
| Figura 4.3 – Deslocamentos verticais da laje BD28-P1 | 81 |
| Figura 4.4 – Deslocamentos verticais da laje BD28-P2..... | 81 |
| Figura 4.5 – Deslocamentos verticais da laje BD28-P3..... | 81 |
| Figura 4.6 – Deslocamentos verticais da laje BD1..... | 82 |
| Figura 4.7 – Deslocamentos verticais da laje BD2..... | 82 |
| Figura 4.8 – Deslocamentos verticais da laje SS1..... | 82 |
| Figura 4.9 – Deslocamentos verticais da laje SS2..... | 83 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.10 – Deslocamentos verticais da laje BD3..... | 83 |
| Figura 4.11 – Deslocamentos verticais da laje BD4..... | 83 |
| Figura 4.12 – Deslocamentos verticais da laje SS1 3ª Série. | 84 |
| Figura 4.13 – Deslocamentos verticais médios de todas lajes..... | 85 |
| Figura 4.14 – Deformações na superfície do concreto da laje RSP28 | 86 |
| Figura 4.15 – Deformações na superfície do concreto da laje BD28-P1. | 87 |
| Figura 4.16 – Deformações na superfície do concreto da laje BD28-P2. | 87 |
| Figura 4.17 – Deformações na superfície do concreto da laje BD28-P3. | 88 |
| Figura 4.18 – Deformações na superfície do concreto da laje BD1..... | 88 |
| Figura 4.19 – Deformações na superfície do concreto da laje BD2..... | 89 |
| Figura 4.20 – Deformações na superfície do concreto da laje SS1 | 89 |
| Figura 4.21 – Deformações na superfície do concreto da laje SS2..... | 90 |
| Figura 4.22 – Deformações na superfície do concreto da laje BD3..... | 90 |
| Figura 4.23 – Deformações na superfície do concreto da laje BD4..... | 91 |
| Figura 4.24 – Deformações na superfície do concreto da laje SS1 3ª Série..... | 91 |
| Figura 4.25 – Modelo de bielas e tirantes para ruptura por punção (MUTTONI, 2008) | 92 |
| Figura 4.26 – Deformações na superfície do concreto dos grupos de análise..... | 93 |
| Figura 4.27 – Deformações nas armaduras de flexão da laje RSP28..... | 94 |
| Figura 4.28 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28-P1 | 95 |
| Figura 4.29 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28-P2..... | 96 |
| Figura 4.30 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28-P3 | 97 |
| Figura 4.31 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD1..... | 98 |
| Figura 4.32 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD2..... | 98 |
| Figura 4.33 – Deformações nas armaduras de flexão da laje SS1..... | 98 |
| Figura 4.34 – Deformações nas armaduras de flexão da laje SS2..... | 99 |
| Figura 4.35 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD3..... | 99 |
| Figura 4.36 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD4..... | 99 |
| Figura 4.37 – Deformações nas armaduras de flexão da laje SS1 3ªSérie | 100 |
| Figura 4.38 – Deformações nas armaduras de flexão dos grupos de análise | 101 |
| Figura 4.39 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da laje BD28-P3..... | 102 |
| Figura 4.40 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da laje BD1 | 102 |
| Figura 4.41 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da laje BD2 | 103 |
| Figura 4.42 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da laje SS1..... | 103 |
| Figura 4.43 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da laje SS2..... | 104 |
| Figura 4.44 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da laje BD3 | 104 |
| Figura 4.45 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da laje BD4 | 105 |
| Figura 4.46 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da laje SS1 3ªSérie | 105 |
| Figura 4.47 – Deformações nas armaduras de cisalhamento de todas as lajes..... | 106 |
| Figura 4.48 – Mapa de fissuração da laje RSP28..... | 108 |
| Figura 4.49 – Mapa de fissuração da laje BD28P1 | 108 |
| Figura 4.50 – Mapa de fissuração da laje BD28-P2 | 108 |
| Figura 4.51 – Mapa de fissuração da laje BD28-P3 | 109 |
| Figura 4.52 – Mapa de fissuração da laje BD1..... | 109 |
| Figura 4.53 – Mapa de fissuração da laje BD2..... | 109 |
| Figura 4.54 – Mapa de fissuração da laje SS1 | 110 |
| Figura 4.55 – Mapa de fissuração da laje SS2..... | 110 |
| Figura 4.56 – Mapa de fissuração da laje BD3..... | 110 |
| Figura 4.57 – Mapa de fissuração da laje BD4..... | 111 |
| Figura 4.58 – Mapa de fissuração da laje SS1 3ª Série | 111 |
| Figura 4.59 – Posição de corte das lajes..... | 112 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.60 – Serviço especializado de corte | 113 |
| Figura 4.61 – Secção de corte da laje BD28-P2..... | 113 |
| Figura 4.62 – Secção de corte da laje BD1. | 114 |
| Figura 4.63 – Secção de corte da laje BD3. | 114 |
| Figura 4.64 – Secção de corte da laje SS1 3ª Série. | 115 |
| Figura 4.65 – Secção de corte da laje BD4 | 115 |
| Figura 4.66 – Detalhe da secção de corte da laje BD4..... | 118 |
| Figura 5.1 – Componentes de tensão, deslocamento e sistema de coordenadas local na fissura (para simplificar a representação, foi assumida somente uma fissura no IP)... | 122 |
| Figura 5.2 – Diagrama para simular o processo de fissuração. | 123 |
| Figura 5.3 – Modelo constitutivo uniaxial para barras de aço..... | 124 |
| Figura 5.4 – Diagrama bilinear-exponencial força deslocamento. | 124 |
| Figura 5.5 – Modelagem dos vazios..... | 125 |
| Figura 5.6 – Modelo das lajes <i>BubbleDeck</i> | 126 |
| Figura 5.7 – Detalhe do modelo de uma região com esfera | 126 |
| Figura 5.8 – Modelo das lajes maciças..... | 127 |
| Figura 5.9 – Comparativo da relação carga vs deslocamento (Lajes RSP28, BD28-P1, BD28-P2 e BD28-P3)..... | 129 |
| Figura 5.10 – Comparativo da relação carga vs deslocamento (Lajes BD1, BD2, SS1 3ª Série, BD3 e BD4)..... | 130 |
| Figura 5.11 – Comparativo da relação carga vs deformação das armaduras principais (Lajes RSP28 e BD28-P1)..... | 131 |
| Figura 5.12 – Comparativo da relação carga vs deformação das armaduras principais (Lajes BD28-P2, BD28-P3, BD1, BD2, SS1 3ª Série e SS2)..... | 132 |
| Figura 5.13 – Comparativo da relação carga vs deformação das armaduras principais (Lajes BD3 e BD4)..... | 133 |
| Figura 5.14 – Comparativo da relação carga vs deformação das armaduras principais (BD28-P3, BD1, BD2, SS1 3ª Série, SS2 e BD3)..... | 134 |
| Figura 5.15 – Comparativo da relação carga vs deformação das armaduras principais (BD4)..... | 135 |
| Figura 5.16 – Comparativo da relação carga vs deformação no concreto (RSP28 e BD28-P1)..... | 135 |
| Figura 5.17 – Comparativo da relação carga vs deformação no concreto (BD28-P2, BD28-P3, BD1, BD2, SS1 3ª Série e SS2)..... | 136 |
| Figura 5.18 – Comparativo da relação carga vs deformação no concreto (BD3 e BD4) | 137 |
| Figura 5.19 – Comparativo do padrão de fissuração para laje RSP28 | 138 |
| Figura 5.20 – Comparativo do padrão de fissuração para laje BD28-P1 | 138 |
| Figura 5.21 – Comparativo do padrão de fissuração para laje BD28-P2 | 138 |
| Figura 5.22 – Comparativo do padrão de fissuração para laje BD28-P3 | 139 |
| Figura 5.23 – Comparativo do padrão de fissuração para laje BD1 | 139 |
| Figura 5.24 – Comparativo do padrão de fissuração para laje BD2..... | 139 |
| Figura 5.25 – Comparativo do padrão de fissuração para laje SS1 3ª Série..... | 140 |
| Figura 5.26 – Comparativo do padrão de fissuração para laje SS2..... | 140 |
| Figura 5.27 – Comparativo do padrão de fissuração para laje BD3..... | 140 |
| Figura 5.28 – Comparativo do padrão de fissuração para laje BD4..... | 141 |
| Figura 5.29 – Detalhe dos gráficos carga-deformação das armaduras principais. | 142 |
| Figura 6.1 – Esquema da proposta de subtração de áreas. | 151 |
| Figura 6.2 – Detalhe da área que deve ser deduzida. | 151 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.3 – Perímetro de controle $u_{out,ef}$ da laje BD3 de acordo com o Eurocode 2 (2004). | 155 |
| Figura 6.4 – Variação da Resistência à punção de acordo com o afastamento do pilar para Laje BD28-P1 | 156 |
| Figura 6.5 – Variação da Resistência à punção de acordo com o afastamento do pilar para Laje BD1..... | 157 |
| Figura 6.6 – Variação da Resistência à punção de acordo com o afastamento do pilar para Laje BD3..... | 158 |
| Figura 6.7 – Quantidade de nervuras por laje..... | 160 |
| Figura 6.8 – Representação do perímetro de controle adicional para NBR 6118 | 163 |
| Figura 6.9 – Previsão do modo de ruptura para as diferentes propostas | 164 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 2.1 – Dados das lajes e resultados normativos, HELD e PFEFFER (2002)..... | 20 |
| Tabela 2.2 – Dados das lajes, CEBALLOS (2017)..... | 21 |
| Tabela 2.3 – Dados das lajes, VALIVONIS <i>et al.</i> (2017)..... | 25 |
| Tabela 3.1 – Resumo das características das lajes ensaiadas | 39 |
| Tabela 3.2 – Características das armaduras de cisalhamento | 53 |
| Tabela 3.3 – Quantitativos para produção de 1 m ³ de concreto | 70 |
| Tabela 3.4 – Resistência a flexão das lajes..... | 75 |
| Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do concreto | 76 |
| Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas do aço | 77 |
| Tabela 4.3 – Lajes e seus parâmetros analisados..... | 77 |
| Tabela 4.4 – Cargas de Ruptura..... | 79 |
| Tabela 4.5 – Deformação máxima das armaduras..... | 100 |
| Tabela 4.6 – Inclinação das fissuras após o serviço de corte | 116 |
| Tabela 4.7 – Classificação do modo de ruptura das lajes..... | 119 |
| Tabela 5.1 – Valores adotados para o modelo constitutivo do concreto | 128 |
| Tabela 5.2 – Valores adotados para o modelo constitutivo das molas..... | 128 |
| Tabela 5.3 – Valores de carga última corrigidas. | 142 |
| Tabela 6.1 – Resumo das características das lajes ensaiadas | 144 |
| Tabela 6.2 – Resumo das características das lajes ensaiadas (continuação) | 145 |
| Tabela 6.3 – Cargas de ruptura previstas como laje maciça [ACI 318 (2014)] | 145 |
| Tabela 6.4 – Cargas de ruptura previstas como laje maciça [<i>fib</i> MC2010 (2012)]..... | 146 |
| Tabela 6.5 – Cargas de ruptura previstas como laje maciça [Eurocode 2 (2004)]..... | 146 |
| Tabela 6.6 – Cargas de ruptura previstas como laje maciça [NBR 6118 (2014)]..... | 146 |
| Tabela 6.7 – Resumo das previsões para lajes maciças..... | 146 |
| Tabela 6.8 – Cargas de ruptura previstas pela proposta da BD [ACI 318 (2014)]..... | 147 |
| Tabela 6.9 – Cargas de ruptura previstas pela proposta da BD [MC2010 (2012)] | 148 |
| Tabela 6.10 – Cargas de ruptura previstas pela proposta da BD [Eurocode 2 (2004)] | 148 |
| Tabela 6.11 – Cargas de ruptura previstas pela proposta da BD [NBR 6118 (2014)] . | 149 |
| Tabela 6.12 – Resumo das previsões para proposta BD..... | 149 |
| Tabela 6.13 – Cargas de ruptura previstas pela proposta de subtração de áreas [ACI318 (2014)] | 152 |
| Tabela 6.14 – Cargas de ruptura previstas pela proposta de subtração de áreas [<i>fib</i> MC2010 (2012)]..... | 152 |
| Tabela 6.15 – Cargas de ruptura previstas pela proposta de subtração de áreas [Eurocode 2 (2004)] | 153 |
| Tabela 6.16 – Cargas de ruptura previstas pela proposta de subtração de áreas [NBR 6118 (2014)] | 153 |
| Tabela 6.17 – Resumo das previsões para proposta de subtração de áreas | 154 |
| Tabela 6.18 – Verificação do cisalhamento nas nervuras | 161 |
| Tabela 6.19 – Cargas de ruptura previstas pela proposta da presente pesquisa para NBR 6118 (2014) | 163 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|--------------|---|
| A | Área efetiva de concreto na seção do perímetro crítico descontando os vazios; |
| A_s | Área de aço da armadura de flexão; |
| $A_{s, sup}$ | Área de aço da armadura de flexão superior; |
| A_{sw} | Área de aço de uma camada de armadura de cisalhamento; |
| b_i | Largura do molde de plástico; |
| b_w | Largura da nervura entre esferas; |
| b_o | Comprimento do perímetro crítico afastado da face do pilar, <i>fib Model Code 2010 (2012)</i> ; |
| B | Comprimento do modelo de laje para o cálculo de V_{flex} ; |
| c | Diâmetro do pilar; |
| 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; |
| d_g | Diâmetro máximo do agregado; |
| d_k | Diâmetro de interceptação da esfera, Held (2002); |
| d_m | Altura total da laje, Held (2002); |
| d_v | Altura efetiva da laje, <i>fib Model Code 2010 (2012)</i> ; |
| D | Diâmetro do pilar circular; |
| E_c | Módulo de elasticidade secante do concreto; |
| E_s | Módulo de elasticidade do aço; |
| f_{bd} | Tensão de aderência ao concreto, <i>fib Model Code 2010 (2012)</i> ; |
| f_c | Resistência à compressão média do concreto; |
| $f_{c,150}$ | Resistência à compressão especificada do concreto em corpos de prova cilíndricos com 150 mm de diâmetro, Held (2002); |
| f_{ck} | Resistência característica à compressão do concreto; |
| f_{cd} | Resistência de cálculo à compressão do concreto; |
| $f_{t,D}$ | Resistência à tração por ensaio de compressão diametral; |
| f_y | Tensão de escoamento do aço; |
| f_{yw} | Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento, <i>fib Model Code 2010 (2012)</i> ; |
| $f_{ys,w}$ | Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento, ACI 318 (2014); |

| | |
|--------------|--|
| $f_{yw,ef}$ | Tensão efetiva da armadura de cisalhamento, EUROCODE 2 (2004) e NBR 6118 (2014); |
| G_f^I | Energia da fratura do concreto; |
| G_{f0} | Valor de referência para energia de fratura, dado em função do diâmetro máximo do agregado; |
| G_c | Módulo de cisalhamento elástico concreto; |
| h | Altura total da laje; |
| h_b | Altura do molde de plástico |
| h_m | Altura útil, HELD (2002); |
| k | <i>Size effect (Efeito de tamanho)</i> EUROCODE 2 (2004); |
| k_{sys} | Coeficiente que leva em conta o desempenho das armaduras de cisalhamento, <i>fib</i> Model Code 2010 (2012); |
| l_{arc} | Comprimento da corda correspondente ao arco gerado pela interseção entre o perímetro de controle e a esfera; |
| m_u | Momento último; |
| p | Parâmetro que define a forma do último braço da curva do gráfico uniaxial para o modelo numérico; |
| r_q | Distância do centro do pilar ao ponto de aplicação da carga; |
| r_s | Posição em que o momento fletor radial é zero, <i>fib</i> Model Code 2010 (2012); |
| s_0 | Distância entre o pilar e primeira linha de estribos; |
| s_r | Distância entre as camadas de armaduras de cisalhamento; |
| u | Perímetro de controle na seção de análise; |
| u_{out} | Comprimento do perímetro crítico afastado da última camada da armadura de cisalhamento; |
| u_0 | Comprimento do perímetro de controle na face do pilar, EUROCODE 2 (2004); |
| u_1 | Comprimento do perímetro de controle afastado $2d$ da face do pilar, EUROCODE 2 (2004); |
| u_0 | Comprimento do perímetro de controle efetivo; |
| V_C | Parcela de resistência correspondente ao concreto; |
| V_{EC} | Carga solicitante, <i>fib</i> Model Code 2010 (2012); |
| V_{flex} | Carga estimada de ruptura por flexão da laje; |
| V_R | Capacidade de carga estimada pela norma; |
| $V_{R,bw}^*$ | Capacidade de carga estimada como viga; |
| V_{ref} | Capacidade de carga experimental do modelo de referência; |
| $V_{R,c}$ | A capacidade de carga à punção de projeto de lajes lisas sem reforço de cisalhamento; |
| $V_{R,c}$ | Parcela de resistência correspondente ao concreto; |
| $V_{R,máx}$ | Força resistente do concreto na diagonal comprimida; |

| | |
|---------------|---|
| $V_{R,s}$ | Parcela de resistência correspondente ao aço de reforço transversal; |
| $V_{R,cs}$ | Força resistente do concreto na diagonal tracionada dentro da região reforçada a punção; |
| $V_{R,out}$ | Força resistente do concreto na diagonal tracionada fora da região reforçada a punção; |
| $V_{R,out}^2$ | Força resistente do concreto na diagonal tracionada fora da região reforçada a punção, adaptada para o caso da NBR 6118 (2014); |
| V_u | Carga de ruptura experimental da laje; |

LETRAS GREGAS

| Símbolo | Significado |
|-----------------------|---|
| α_s | Constante que leva em consideração se o pilar é interior, de borda ou de canto. Com valores de 40, 30 e 20 respectivamente, ACI 318 (2014); |
| βc | Razão entre a maior e a menor dimensão do pilar, ACI 318 (2014); |
| β | Fator de retenção de cisalhamento; |
| γ_c | Coefficiente de segurança parcial; |
| $\gamma_{t,p}^{cr}$ | Deformação de cisalhamento na fissura; |
| $\gamma_{t,u}^{cr}$ | Deformação de cisalhamento última; |
| ϵ_{ys} | Deformação de escoamento do aço; |
| ϵ_n^{cr} | deformação normal à fissura; |
| $\epsilon_{n,u}^{cr}$ | deformação última normal a fissura; |
| θ_{th} | <i>Threshold angle</i> ; |
| ρ | Taxa de armadura de flexão tracionada média da laje; |
| ρ_x | Taxa de armadura de flexão tracionada da laje na direção x; |
| ρ_y | Taxa de armadura de flexão tracionada da laje na direção y; |
| σ_{sy} | Tensão do aço para o modelo numérico; |
| σ_{sw} | Tensão que é ativada nas armaduras de cisalhamento, <i>fib Model Code 2010 (2012)</i> ; |
| $\tau_{t,p}^{cr}$ | Tensão última de cisalhamento; |
| v | Tensão nominal de cisalhamento da ligação laje-pilar; |
| \emptyset | Coefficiente de segurança aplicado por cada norma; |
| \emptyset_w | Diâmetro da armadura de cisalhamento; |
| ψ | Rotação da laje, <i>fib Model Code 2010 (2012)</i> ; |

ABREVIACÕES

| | |
|-----------------------|---|
| <i>COV</i> | Coeficiente de variao |
| <i>DT</i> | Ruptura passando dentro da região armada ao cisalhamento |
| <i>DT/FR</i> | Ruptura assimétrica e passa por ambas as regiões |
| <i>EC</i> | Extensmetro colado na superfície do concreto; |
| <i>EE</i> | Extensmetro dos estribos; |
| <i>EF</i> | Extensmetro das armaduras de flexão; |
| <i>FR</i> | Ruptura fora da região armada ao cisalhamento |
| <i>FR²</i> | Ruptura fora da região armada ao cisalhamento, em uma região \grave{a} $d/2$ do maciço |
| <i>NI</i> | Superfície de ruptura não identificada |
| <i>NV</i> | Ruptura ocorrendo na região nervurada das lajes BD, caso das lajes sem armadura de cisalhamento ou sem região maciça |
| <i>PEAD</i> | Polietilenos de alta densidade |

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Desde a introdução de lajes de concreto armado uma larga variedade de técnicas vem sendo desenvolvida. Fatores como economia, concepção de novos métodos construtivos, adequação das lajes a requisitos de projeto e os avanços nos métodos de análise colaboraram para moldar práticas atuais e futuras dos tipos de lajes que são construídas.

De acordo com PARK e GAMBLE (2000) a escolha do tipo de laje para determinada aplicação está relacionada aos custos envolvidos, cargas de projeto, valores de vãos e requerimentos de estados limites de serviço e último.

Para pequenos vãos, em estruturas residenciais e comerciais onde a carga não é elevada, MACGREGOR e WIGHT (2009) sugerem a utilização de lajes lisas. Este sistema de lajes é simples em conceito e construção, consistindo de uma laje de espessura uniforme apoiada diretamente em pilares (Figura 1.1a). As lajes lisas são recomendadas para vãos de 4,5 a 6,0 m e ao adotar esta solução se obtém uma série de vantagens em relação aos sistemas convencionais de lajes apoiadas em vigas (Figura 1.1b), destacando-se: diminuição do tempo de execução, simplificação das formas, maior flexibilidade ao leiaute do imóvel, redução da altura total do edifício e, em algumas situações, redução do custo da estrutura.

Em vãos de 6,0 a 9,0 m, MACGREGOR e WIGHT (2009) recomendam a utilização de lajes cogumelo. Neste sistema a resistência na ligação laje-pilar é incrementada pelo engrossamento da laje em torno do pilar (ábaco) e/ou o espessamento superior do pilar (*capitel*), e são uma boa alternativa para lajes com elevada sobrecarga. A forma básica de lajes cogumelo está ilustrada na Figura 1.1c.

Em situações que demandam grandes vãos, a altura da laje requerida para transferência de esforços verticais aos pilares excede a altura requerida para resistência à flexão. Como resultado, o concreto no meio do vão não é utilizado de forma eficiente. Para aliviar o peso da laje, reduzir os momentos e economizar material, AL-BAYATI e CLARK (2015) indicam o uso de lajes nervuradas como uma boa alternativa (Figura 1.1d). Além destes sistemas, tem se tornado comum a utilização de sistemas alternativos de lajes aliviadas que cumpram estes mesmos requisitos, porém com vazios de plásticos posicionados em

seu interior. Nestes novos sistemas, em contraste com a maioria dos sistemas de lajes nervuradas, as formas de plástico não são recuperadas e a face inferior da laje tem uma aparência de laje lisa após executada.

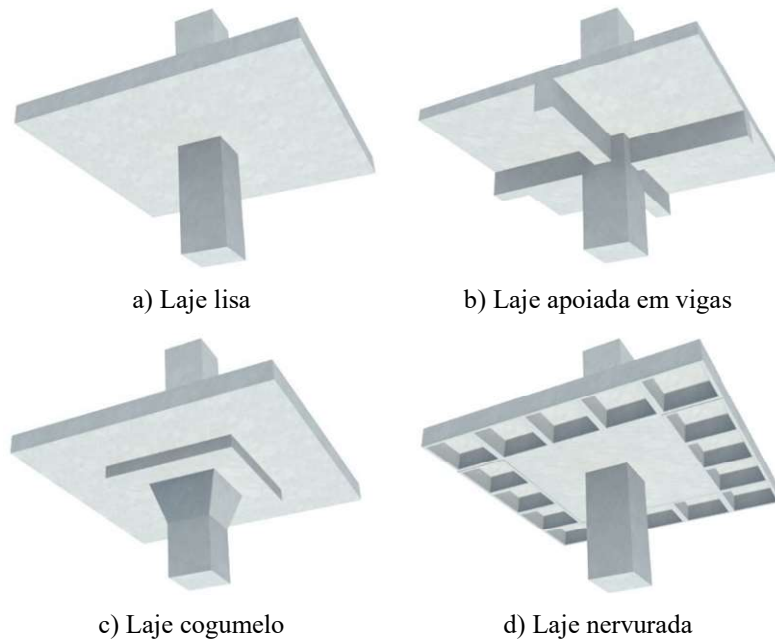


Figura 1.1 – Sistemas construtivos de lajes

Dentre a variedade de técnicas desenvolvidas de lajes com vazios ao longo dos anos, a laje *BubbleDeck* (BD) tem obtido destaque. Este sistema é composto por moldes de plásticos ocos com formato esférico, que são colocados entre duas telas de aço e inseridos na parte central da laje. Ver representação na Figura 1.2.

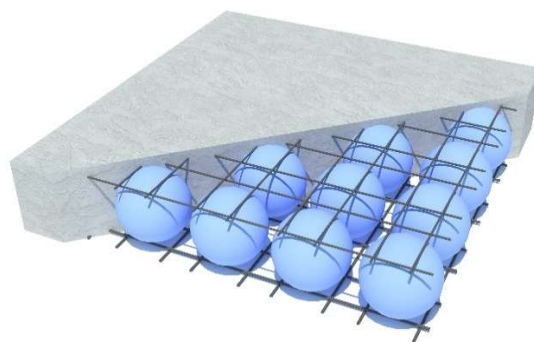


Figura 1.2 – Sistemas construtivos de lajes *BubbleDeck*

A laje *BubbleDeck* pode ser considerada uma laje lisa e possui as vantagens anteriormente citadas para este sistema associadas às vantagens específicas do sistema BD, como por exemplo: redução do peso da laje em até 35% quando comparada a uma laje maciça de mesma espessura e dispensa de forma ao serem adotadas pré-lajes, dentre outras.

Apesar dos pontos positivos, a laje BD traz consigo as inerentes desvantagens do sistema construtivo de lajes lisas, das quais se destacam: os deslocamentos transversais das lajes, os problemas relacionados à estabilidade global de edifícios e a ruptura localizada por punção na ligação laje-pilar, que pode se propagar e levar a estrutura à ruína parcial ou total, por colapso progressivo.

A punção é um tipo de ruína que pode ocorrer de forma brusca quando forças concentradas, ou atuando em pequenas áreas, são aplicadas diretamente nas lajes, causando a sua perfuração. Nas lajes lisas, esta situação é típica na região da ligação laje-pilar. A punção está associada a esforços de cisalhamento e provoca uma separação completa entre a laje e o pilar (Figura 1.3).

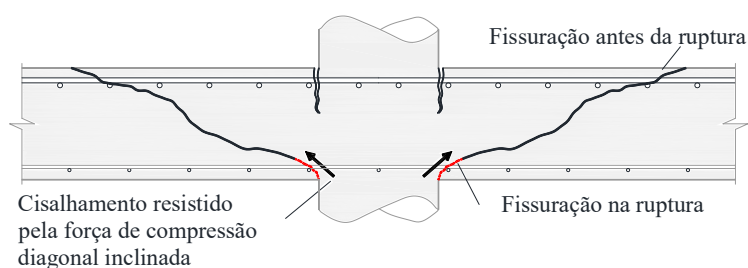
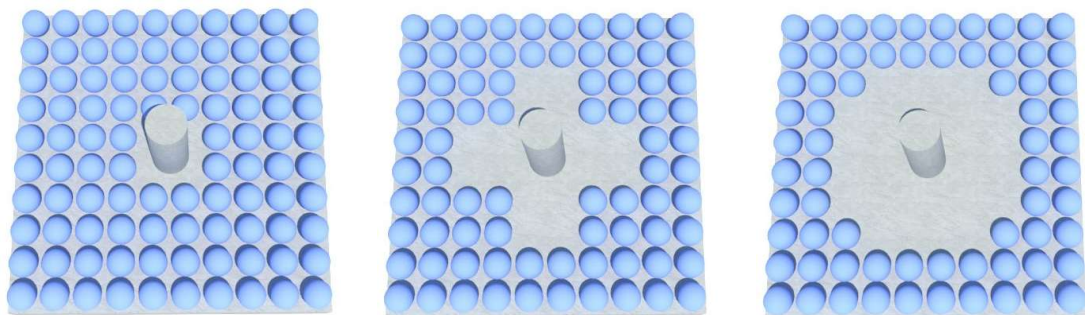


Figura 1.3 – Seção de ruptura de uma ligação laje-pilar sem armadura de cisalhamento
[adaptado de CEB-FIP/MC90 (1993)]

Ao projetar lajes com vazios, para garantir a capacidade à punção, tais como nas regiões próximas aos pilares ou paredes, geralmente os moldes são removidos deixando uma região maciça, cuja área é determinada em função da carga e do vão da laje. Os mesmos métodos de cálculo utilizados para a resistência à punção de lajes maciças, com uma seção transversal contínua, podem ser aplicados em lajes com vazios que tenham uma seção transversal sólida na zona de punção.

O comportamento à punção de lajes lisas maciças já foi analisado por diversos pesquisadores. Estudos de ABDALLA *et al* (1996), EDER *et al* (2010); NGUYEN *et al* (2017), RICKER *et al* (2017) e TEIXEIRA *et al* (2015) mostram que a capacidade à punção destas lajes pode ser incrementada com a utilização de diversas estratégias, tais como: utilização de armadura de cisalhamento, aumento da resistência à compressão do concreto, uso de capitéis, uso de fibras de aço, dentre outros.

Em lajes com vãos reduzidos ou baixa sobrecarga, os moldes de vazios podem ser dispostos até a borda do pilar (Figura 1.4a). Nestes casos, a resistência ao cisalhamento da laje BD diminui devido à remoção do concreto da zona central da laje. Em uma situação intermediária, de vãos e carregamentos, a resistência à punção de uma laje aliviada pode ser incrementada através da organização racional dos moldes e região sólida entorno da zona de ligação da laje-pilar (Figura 1.4b e Figura 1.4c). Nestas situações, os métodos de cálculo para lajes maciças não podem ser diretamente aplicados, uma vez que o perímetro de controle definido pelas principais normas intercepta as zonas com vazios.



a) Esferas por toda laje b) Distribuição intermediária c) Região maciça em torno do pilar

Figura 1.4 – Distribuição de esferas em lajes *BubbleDeck*

1.2. JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa refere-se à análise do comportamento à punção de lajes *BubbleDeck* com pilar interno e carregamento simétrico. Trata-se de um tema pouco explorado. Pesquisas internacionais realizadas sobre o sistema BD foram focadas principalmente na resistência à flexão e cisalhamento em uma direção, sendo notada uma lacuna no estudo de resistência à punção para este tipo de laje.

No Brasil, se nota uma tendência natural dos construtores, projetistas e usuários em utilizar sistemas construtivos que anteriormente tenham sido realizados com sucesso, como consequência, o sistema de lajes *BubbleDeck* ainda encontra resistência em sua implementação. Estas dificuldades são ainda acentuadas pela falta de prescrições normativas e ensaios nacionais que comprovem seu bom funcionamento. Esta pesquisa, desenvolvida de forma pioneira, tem como principal motivação estudar e apresentar à comunidade técnico-científica as principais análises sobre este sistema, consolidadas com dados experimentais.

1.3. OBJETIVOS

A pesquisa tem como objetivo geral verificar experimentalmente o comportamento à punção da ligação laje pilar para o sistema estrutural de lajes tipo *BubbleDeck*, com pilar interno à edificação e carregamento simétrico. Em específico os objetivos podem ser citados como:

- Avaliar a influência do uso da pré-laje no comportamento à punção das lajes *BubbleDeck*;
- Avaliar a influência da distribuição das armaduras de cisalhamento das lajes *BubbleDeck* (uma direção e duas direções) em comparação com as armaduras das lajes maciças com distribuição em cruz;
- Avaliar a influência da ancoragem das armaduras de cisalhamento das lajes *BubbleDeck* (sem ancoragem, ancoragem parcial e total) em comparação com as armaduras das lajes maciças;
- Análise comparativa entre os resultados determinados segundo os critérios do ACI 318 (2014), EUROCODE 2 (2004), NBR 6118 (2014) e *fib* Model Code 2010 (2012), adaptados ao problema de lajes com vazios;
- Proposição de uma adaptação para aplicação da norma Brasileira - NBR 6118 (2014) - para o caso em estudo.
- Verificar a viabilidade na utilização do software FEMIX 4.0 para representar o comportamento de lajes *BubbleDeck*.

1.4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para a realização deste trabalho foram ensaiadas 11 ligações laje-pilar interno no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília (LABEST – UnB). Sete desses modelos foram construídos com a técnica *BubbleDeck* e comparados com quatro lajes maciças de referência. Todas as lajes possuem as mesmas dimensões e taxa da armadura, variando-se: a utilização de pré-laje, a distribuição das armaduras de cisalhamento e sua respectiva forma de ancoragem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. LAJES LISAS BIDIRECIONAIS COM VAZIOS

A aplicação de lajes com vazios é um conceito muito antigo, o sistema é investigado desde o início dos anos 1900 (DAVID *et al*, 2009). Engenheiros e fabricantes de novos sistemas construtivos diminuíram o peso das lajes, criando vazios através de uma variedade de técnicas ao longo do tempo. A maioria das tentativas consistiu em colocar blocos de um material inerte, como poliestireno expandido, entre a armadura inferior e superior. Mas, tradicionalmente, outros tipos de lajes com vazios são utilizadas pelo mundo, como por exemplo as lajes nervuradas e alveolares. No entanto, existem desvantagens para estes tipos de lajes vazadas que levaram ao desenvolvimento dos novos sistemas de lajes com vazios moldados de formas ocas de plástico.

Nestes sistemas, assim como em outros sistemas de lajes nervuradas, o conceito consiste em colocar formas de plástico entre duas camadas de armadura, no meio de uma laje de concreto. Devido à substituição do concreto por estas formas, a laje terá uma carga permanente menor e, conseqüentemente, será possível vencer um maior vão entre apoios assim como diminuir a carga transmitida a pilares e fundações. Na Figura 2.1 pode ser visualizado um destes sistemas construtivos.



Figura 2.1 – Laje com vazios¹ (Sistema *BubbleDeck*)

¹Cortesia da *BubbleDeck* Brasil: Construção edifício garagem no Aeroporto do Galeão, Rio de Janeiro, Brasil.

Dependendo do fabricante, os sistemas de lajes com vazios moldados de formas plásticas são construídos por dois métodos principais: um método em que parte do sistema é pré-moldado fora do local e outro em que todo o sistema é construído *in loco*.

Os moldes têm frequentemente formatos esféricos, elípticos ou cúbicos, são ocios e feitos de plástico reciclado. O espaço deixado pelos moldes permite que as lajes sejam mais leves do que as lajes de concreto tradicionais. A armadura, composta por uma malha superior e outra inferior é usada para manter os moldes no lugar, mantendo-os no centro da laje, além de ser utilizada como armadura de flexão. Por fim, o concreto envolve os moldes ocios e forma a laje. Na Figura 2.2 é possível visualizar alguns sistemas desenvolvidos com este princípio.



a) Sistema *Cuerpos Huecos*
Disponível em: < www.cuerposhuecos.com/>



b) Sistema *BeePlate*
Disponível em: < www.beeplate.com/>



c) Sistema *New Nautilus*
Disponível em: < www.geoplast.it/en/products/slabs/new-nautilus>



d) Sistema *BubbleDeck*
Disponível em: < www.bubbledeck.com.ar/>

Figura 2.2 – Exemplos de lajes bidirecionais com vazios formados com moldes plásticos.

Várias empresas patentearam sistemas de lajes com vazios com moldes de plástico usando métodos semelhantes, mas com ligeiras diferenças, dos quais podemos destacar os sistemas *AirDeck*, *Cobix*, *U-Boot* e *BubbleDeck*.

Todos esses sistemas, de acordo com seus fabricantes, possuem características similares e benefícios em comum, como: (1) Liberdade de projeto - leiaute flexível que se adapta

aos formatos irregulares e curvos; (2) Redução da carga permanente em comparação com lajes maciças; (3) Maior vão entre apoios - até 50% mais do que as estruturas tradicionais; (4) Eliminação de vigas - montagem mais rápida e mais barata; (5) Uso reduzido de concreto - 1 kg de plástico reciclado pode substituir de 60 a 100 kg de concreto, dependendo do sistema; (6) Construção Sustentável - redução de emissões de energia e carbono. Cerca de 8% das emissões globais de CO₂ são devidas à produção de cimento (BUBBLEDECK, 2016).

2.1.1. *BubbleDeck*

BubbleDeck é um sistema de laje que se tornou conhecido na Europa e em todo o mundo no início do século 21. O sistema foi desenvolvido na década de 1980 pelo engenheiro Jørgen Breuning na Dinamarca depois que uma competição patrocinada pelo governo procurou novas técnicas construtivas de edifícios, e em particular novas maneiras para aumentar a flexibilidade e a eficiência do projeto usando peças pré-moldadas. Jørgen Breuning ganhou a competição e a laje *BubbleDeck* foi introduzida com sucesso comercialmente em larga escala a partir de 1999 na construção da *Millenium Tower* em Rotterdam, Holanda (Figura 2.3) (BUBBLEDECK, 2008).

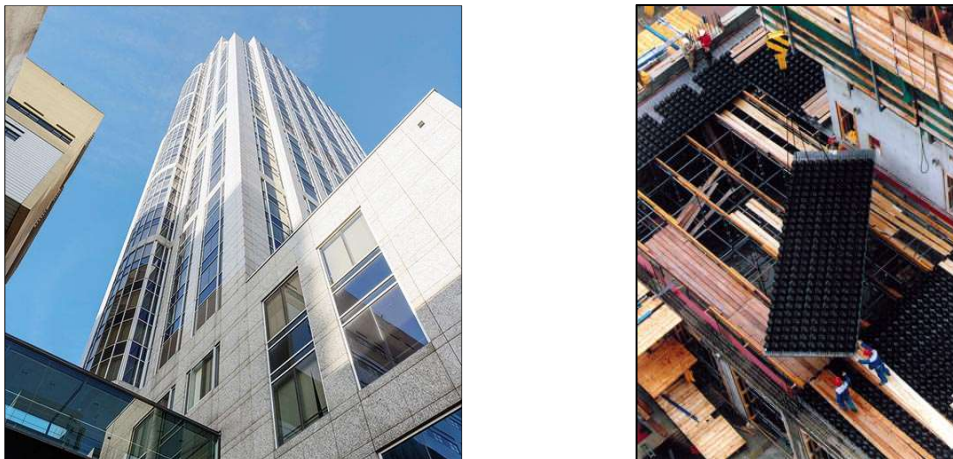


Figura 2.3 – *Millenium Tower* em Rotterdam, Holanda - Disponível em:

< <http://millennium-tower.nl/en/>>

No Brasil este sistema foi implantado na sede da construtora Odebrecht em Salvador, nos Edifícios do Centro Administrativo do Distrito Federal (CADF) e BRS em Brasília, na ampliação do edifício garagem do Aeroporto do Galeão, Rio de Janeiro, em uma parte na reforma do estádio da Arena da Baixada, Paraná, dentre outros.



a) Sede da Odebrecht



b) CADF



c) Edifício BRS



d) Edifício Garagem do Aeroporto do Galeão

Figura 2.4 – Obras da *BubbleDeck* no Brasil²

O sistema de lajes *BubbleDeck* é composto por vazios formados com moldes de plástico oco, com formato esférico, que são colocados entre duas telas de aço e inseridos na parte central da laje. Este sistema dispensa o uso de vigas e pode gerar uma redução de até 35% no peso da laje o que gera alívio de carga nos pilares e fundações. De acordo com HARDING (2004) a redução do consumo de concreto, com suas vantagens associadas, pode gerar uma economia de 2,5% a 10% no custo total da obra.

Para sua utilização, existem três alternativas construtivas, dependendo do tipo de aplicação. No primeiro caso, o sistema é denominado módulo reforçado, nos quais os moldes esféricos estão presos entre duas telas de aço, como mostrado na Figura 2.5a. Neste sistema é necessária a utilização de formas para posicionar os módulos e a concretagem é realizada em duas fases para evitar que as esferas flutuem. Na primeira fase é lançada uma camada de aproximadamente 60 mm, e após sua perda de fluidez o restante do concreto é lançado até o acabamento da laje.

No segundo caso, o sistema compreende módulos reforçados inseridos em uma laje pré-moldada de concreto, servindo como forma permanente (Figura 2.5b). Estes painéis

² Imagens de cortesia da *BubbleDeck* Brasil

podem diminuir significativamente a necessidade de recursos materiais, tempo e custos relacionados aos sistemas de forma e escoramento. O içamento, armazenamento e o transporte dos painéis pré-moldados não deve dar a possibilidade de danificar os elementos, que podem ser armazenados sobrepostos. Para o içamento devem ser utilizadas as treliças que são próprias para esta função.

O terceiro caso de produção de lajes do tipo BD está representada na Figura 2.5c, onde os módulos são fornecidos acabados, e a continuidade entre os painéis consecutivos é garantida pela superposição da armadura de flexão e preenchimento de concreto nas zonas de conexão.

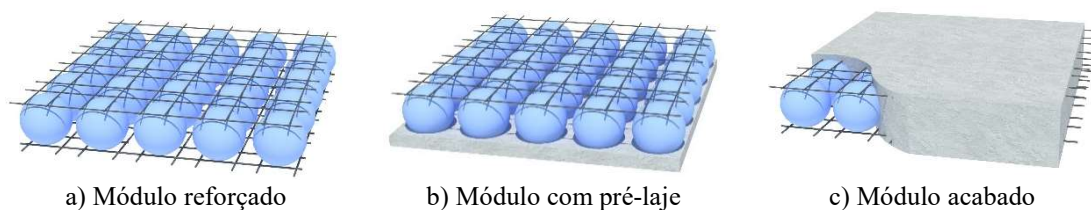


Figura 2.5 – Tipos construtivos de lajes *BubbleDeck*

Para as duas primeiras alternativas construtivas, os módulos reforçados e painéis pré-moldados, são feitas ligações entre os elementos com barras de emenda.

Para garantir a capacidade de cisalhamento, tais como nas regiões próximas aos pilares ou paredes, as esferas são removidas deixando uma região maciça. A área desta região é determinada em função da carga e da espessura da laje.

As esferas são fabricadas de polietilenos de alta densidade (PEAD) que não é poroso e não reage quimicamente com o concreto ou com as barras de aço. As esferas têm resistência e rigidez suficientes para suportar com segurança as cargas aplicadas nas fases construtivas até que seja realizada a concretagem.

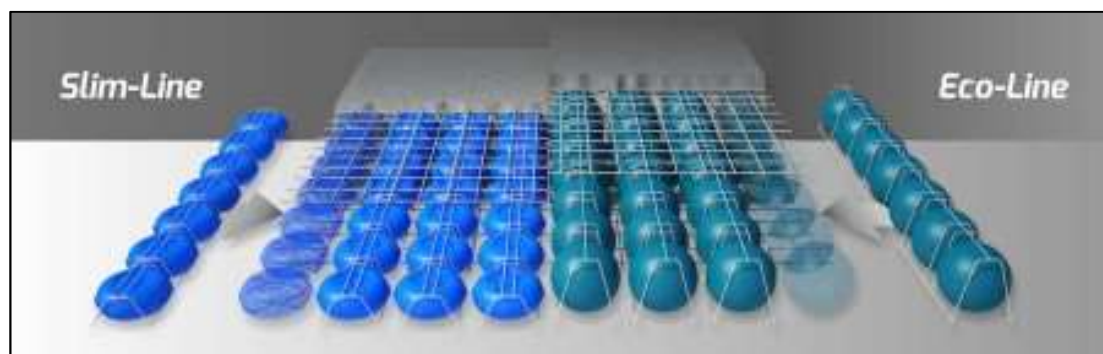
Dependendo do diâmetro da esfera, que varia entre 180 mm e 360 mm, a altura da laje pode estar entre 230 mm e 450 mm e pode cobrir vãos internos em concreto armado de 5 a 17 m (BUBBLEDECK UK, 2008). A distância entre as esferas deve ser maior que 1/9 do seu diâmetro e a espessura da laje pré-moldada deve ser superior a 60 mm.

2.1.2. Cobiax

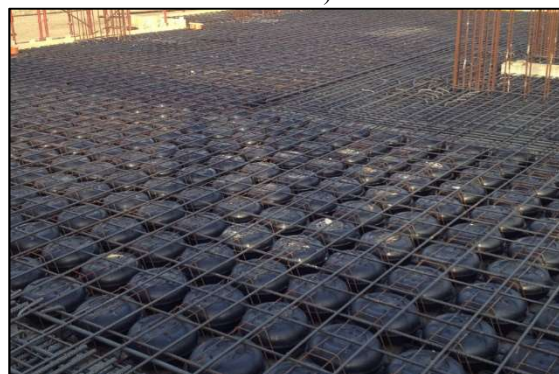
Criado em 1997, na Suíça, o sistema de lajes Cobiax consiste em moldes de plástico reciclado fixos por uma armação eletrosoldada e posicionados no interior da laje. Estes

módulos são posicionados entre as camadas de armadura inferior e superior na seção transversal da laje, onde também servem como apoio.

Os moldes podem ser encontrados no formato elipsoidal (*Slim-Line*) para lajes com alturas de 180 a 350 mm acabadas, e em formato esférico (*Eco-Line*) para lajes de 300 a 600 mm de altura (COBIAX, 2006). Seu armazenamento é facilitado pois os moldes podem ir para a obra desmontados e encaixados, economizando assim espaço.



a) Formatos dos moldes (página web Cobiax³)



b) Laje Cobiax pronta para concretagem (página web Cobiax⁴)



c) Armazenamento dos moldes (página web Cobiax⁵)

Figura 2.6 – Execução de lajes Cobiax

As lajes Cobiax podem ser executadas *in loco* (Figura 2.7a), necessitando que a concretagem seja feita em duas fases, para evitar a flutuação dos moldes, ou podem ser utilizados painéis de lajes pré-moldadas, com os moldes fixos aos painéis, e sendo concretada em uma única fase de concretagem, ver Figura 2.7b.

³ Disponível em: < <http://www.cobiax.com/produkte> > Acesso em: 13/11/2016

⁴ Disponível em: < <http://www.cobiax.it/wp-content/uploads/2016/06/FOT-CER-PIERINI-GUBBIO-025-900x600.jpg> > Acesso em: 13/11/2016

⁵ Disponível em: < <http://www.cobiax.cl/wp-content/uploads/2014/03/pallets-Recovered.jpg> > Acesso em: 13/11/2016



a) Concretagem em duas fases (página web Cobiax⁶)

b) Concretagem em uma fase (página web Cobiax⁷)

Figura 2.7 – Execução de lajes Cobiax

Como desvantagens do sistema destacam-se as possíveis falhas no processo de concretagem dos sistemas *Slim-Line* (moldes com formato achatado), pois quando o concreto não é devidamente lançado ou adensado podem surgir vazios ou nichos de concretagem embaixo dos moldes. Além de um problema estético os vazios podem afetar a durabilidade e resistência das estruturas.

2.1.3. U-Boot

O sistema U-Boot Beton, desenvolvido em 2001, é uma tecnologia do grupo *Daliform*, empresa com sede na Itália e com diversas obras espalhadas pela Europa. É um sistema de laje bidirecional que utiliza moldes de plástico em formato cúbico, cujo posicionamento forma uma grelha de vigas “I” perpendiculares e após concretada tem a aparência de uma laje lisa, ver Figura 2.8a e Figura 2.8b.

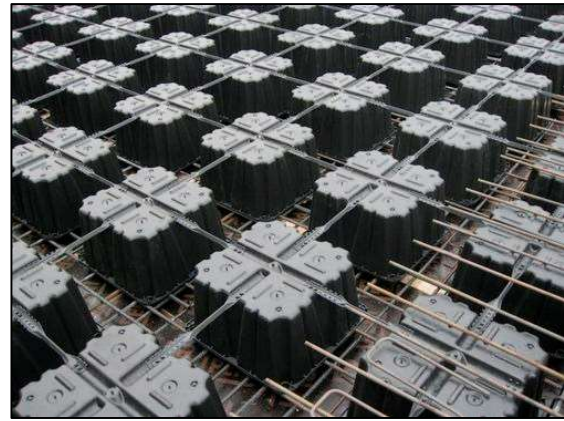
Os moldes deste sistema são fabricados com polipropileno reciclado e podem ser utilizados com formato simples e duplo, dependendo da altura desejada da laje. Seu correto posicionamento é assegurado por um distanciador com escala graduada, através do qual se determina a largura desejada das nervuras, ver Figura 2.8c. Os módulos possuem “pés” em forma de cone para mantê-las elevadas durante a concretagem. Para seu armazenamento podem ser empilhadas ocupando pouco espaço, o que é uma grande vantagem do sistema (Figura 2.8d).

⁶ Disponível em: < <http://www.cobiax.cl/wp-content/uploads/2014/03/pallets-Recovered.jpg> > Acesso em: 13/11/2016

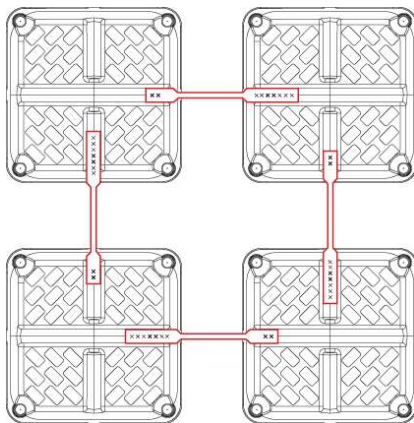
⁷ Disponível em: < http://www.cobiax.com/dynamo/files/modules/content/Bild3_LsCuWnkR_f.jpg > Acesso em: 13/11/2016



a) Esquema da laje U-Boot



b) Laje pronta para concretagem



c) Distanciador de formas



d) Armazenamento dos moldes

Figura 2.8 – Lajes U-Boot (Página Web U-Boot⁸)

O U-Boot permite realizar lajes de concreto armado com vão de até 20 m entre pilares (U-BOOT, 2016). No seu principal processo construtivo a concretagem da laje é feita *in loco*, com o concreto sendo lançado em duas fases para evitar a possível flutuação dos moldes. Na primeira fase deve-se concretar uma camada que forme uma espessura igual à altura do pé elevador (espaçador) e na segunda fase se conclui a concretagem após o concreto da primeira fase começar a perder fluidez.

É possível utilizar as formas U-Boot juntamente com painéis de lajes pré-moldados, bastando posicioná-las apoiadas sobre eles. Neste sistema os moldes não são fixos aos painéis, necessitando que a concretagem também seja realizada em duas etapas, o que acaba sendo uma desvantagem em relação a outros sistemas equivalentes que utilizam pré-moldados.

⁸ Disponível em: < <http://www.daliform.com/pb/forma-perdida-para-pisos-leves-de-concreto/u-boot-beton-galeria-fotografica/> Acesso em: 20/11/2016

2.1.4. AirDeck

A laje AirDeck, patenteada em 2003, compreende um sistema no qual caixas plásticas ocas, denominadas *airboxes*, são inseridas em painéis pré-moldados durante o processo de concretagem, conforme visualizado nas Figura 2.9a e Figura 2.9b (AIRDECK, 2016).

As caixas plásticas são fabricadas a partir de materiais recicláveis resistentes e suportam uma carga de até 180 kg. De acordo com o fabricante, os vazios deixados pelas *airboxes* propiciam uma economia de até 30% no custo das lajes e 5% de economia no custo total da obra. As alturas totais das lajes para este sistema variam de 280 a 450 mm. Com isso, podem ser alcançados vãos de 7,5 m a 12 m em concreto armado e vãos de até 20 m em concreto protendido.

As *airboxes* são montadas com espaçamento padrão de 300 mm entre os eixos das formas. As quatro alturas das caixas têm as mesmas dimensões da base e do lado superior. Os painéis pré-moldados deste sistema são confeccionados num ambiente de fábrica totalmente controlado por computador onde as caixas plásticas são colocadas e vibradas no concreto por braços mecânicos, ver Figura 2.9c e Figura 2.9d. Nesta etapa também são adicionadas as armaduras de flexão inferiores e as treliças para içamento.

Para o transporte os painéis pré-moldados são colocados diretamente nos caminhões. Uma vez no local, as lajes AirDeck podem ser movidas para a posição graças aos pontos de elevação fornecidos pelas treliças. Por fim, são posicionadas as armações complementares e é concretada a segunda camada. Neste sistema não há necessidade de usar malha superior para manter o molde fixo durante a concretagem, sendo esta uma vantagem em relação a outros sistemas similares.

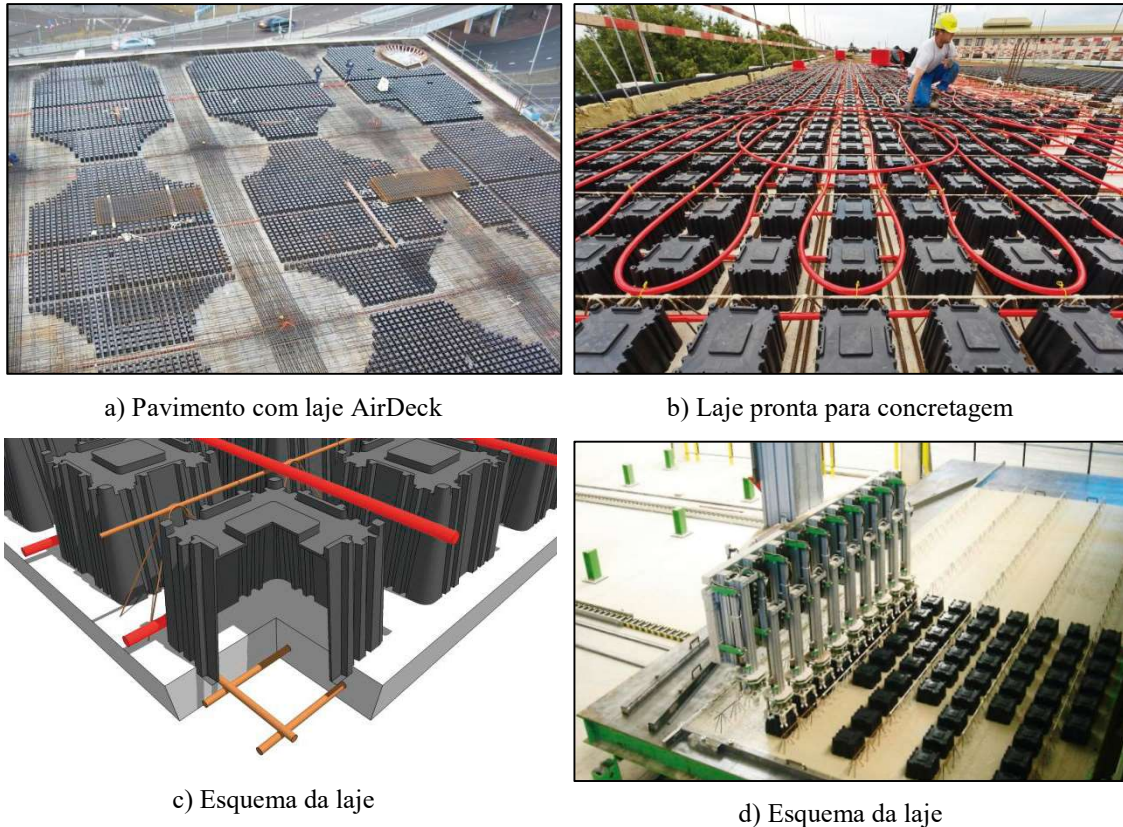


Figura 2.9 – Lajes AirDeck (Página Web AirDeck⁹)

Como ponto negativo das lajes AirDeck se destacam as dificuldades encontradas no transporte, armazenamento e içamento das placas pré-moldadas, e limitações relacionadas ao sistema mecanizado de posicionamento dos moldes, que pode inviabilizar a fabricação em locais que por não possuem a tecnologia ou por ter custo elevado de implementação.

2.2. PESQUISAS EXPERIMENTAIS E TEÓRICAS REALIZADAS COM LAJES BUBBLEDECK

Baseado em estudos teóricos e experimentais [NIELSEN (1993), KLEINMANN (1999), HELD *et al.*, (1999), HELD (2002a) e ANDERS BRØNDEN *et al* (2002)] a *BubbleDeck* internacional indica que este sistema de lajes se comporta como uma laje maciça, e podem seguir as mesmas regras/regulamentos de dimensionamento. Neste sentido essa laje deve ser tratada como uma laje lisa apoiada em pilares. Na Alemanha¹⁰, Dinamarca¹¹,

⁹ Disponível em: < <http://www.airdeck.be/en/?n=141> > Acesso em: 18/11/2016

¹⁰ Deutsches Institut für Bautechnik, 1994.

¹¹ Directorate of Building and Housing, Municipality of Copenhagen, 1996.

Holanda¹² e Reino Unido¹³, comitês técnicos já ratificaram estas conclusões. Ainda segundo *BubbleDeck UK* (2008), mesmo com equivalência de comportamento, deve-se notar que as lajes *BubbleDeck* possuem particularidades, devido aos vazios deixados pelas esferas, que devem ser consideradas no dimensionamento.

Ensaio realizado por KLEINMANN (1999) e HELD *et al.* (1999) mostram que a rigidez à flexão das lajes *BubbleDeck* está entre 87% e 93% de uma laje maciça de mesma espessura, sendo adotado o valor de 90% para projeto. Para o momento de fissuração é recomendado que seja adotado 80% do valor encontrado para uma laje maciça (KLEINMANN, 1999). Esta redução de rigidez e consequente maior deslocamento é compensada pela redução de um terço do peso da laje *BubbleDeck* em relação à maciça..

Ensaio de comportamento acústico realizado por empresas especializadas [ASSOCIES B.V. (2004); ASSOCIES B.V. (1997); LEIPZIG (2001) e SHARLAND (2005)], revelaram que lajes *BubbleDeck* possuem resultados equivalentes aos de lajes alveolares ou maciças.

HASHEMI *et al* (2017) estudaram a capacidade de estruturas de concreto armado construídas com lajes BD resistir a deformações inelásticas sem colapsar, quantificada pelo fator de ductilidade. Pela aplicação de modelos numéricos e análises estáticas não-lineares os autores propuseram, de forma mais conservadora, novos valores para este fator.

Para os estudos de fluência [BAWENS (1999); HELD (1999)], ancoragem de armadura [LEVELT e RILL (1998)], incêndio [BERG e LEUR (1999); FELLINGER e BOTH (1997); LEIPZIG (2001)] e análise dinâmica [LAI (2010)] os resultados demonstraram que não existem diferenças significativas no comportamento entre lajes *BubbleDeck* e lajes maciças.

Com relação aos cálculos estáticos entre diferentes sistemas de lajes com vazios, os sistemas *BubbleDeck* e *Cobiax*, devem ser dimensionados como uma laje maciça. Já os sistemas de lajes U-Boot e AirDeck, que consistem em uma grade de nervuras "I" ortogonais, devem ser calculados como vigas.

¹² CUR – Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving) under CUR Recommendation 86 – BubbleDeck slabs, 2001.

¹³ CRIC (Concrete Research & Innovation Centre under the Imperial College of Science, Technology & Medicine),1997.

Outra particularidade das lajes *BubbleDeck* diz respeito à resistência ao cisalhamento, pois a incorporação de vazios pelas esferas de plástico afeta significativamente sua resistência. Em regiões com tensões de cisalhamento elevadas as esferas são removidas e o cálculo da resistência deverá ser realizado de acordo com as recomendações para lajes maciças. Em áreas com esferas, para projeto deve ser utilizada um valor de 60% na resistência de cisalhamento em comparação a uma laje maciça de mesma espessura. Porém, pesquisas experimentais de [NIELSEN (1993); KLEINMANN (1999); HELD (2002a)] mostram que a resistência ao cisalhamento das lajes *BubbleDeck* é superior a 67% de sua equivalente maciça de mesma espessura.

Embora existam significativos estudos realizados sobre cisalhamento em lajes com vazios esféricos, poucos estudos experimentais analisam especificamente o fenômeno de punção. Com intuito de corroborar com seu entendimento, será apresentado a seguir exclusivamente o histórico de trabalhos mais significativos e com enfoque acadêmico.

2.2.1. HELD e PFEFFER (2002)

Para investigar a influência das esferas no comportamento à punção de lajes *BubbleDeck*, HELD e PFEFFER (2002) realizaram estudos experimentais, cálculos não-lineares utilizando o método dos elementos finitos e sugeriu as modificações necessárias de projeto de acordo com a norma alemã DIN 1045 (1988)¹⁴.

HELD e PFEFFER (2002) ensaiaram seis modelos de laje *BubbleDeck* no Instituto de Estruturas de Concreto de Darmstadt. Três modelos possuíam dimensões de 2500x2500 mm com altura de 240 mm e outros três com dimensões de 2900x2900 mm e altura de 450 mm, ver detalhes dos modelos na Figura 2.10. O concreto especificado tinha resistência à compressão média de 30 MPa e 40 MPa para as lajes de 240 mm e 450 mm respectivamente. A dimensão máxima do agregado foi de 16 mm.

Durante os ensaios cada modelo foi fixado em oito pontos, igualmente espaçados, dispostos em um círculo com raio de 1125 mm. A carga foi aplicada por um cilindro hidráulico situado embaixo do pilar. Durante o ensaio foram acompanhados a abertura de fissuras e medidos os deslocamentos, deformações no aço e concreto.

¹⁴ DIN 1045. Beton und Stahlbeton. 1988.

A taxa de armadura de flexão dos modelos foi propositalmente alta para certificar que a ruptura ocorresse por punção. As dimensões dos modelos são mostradas na Figura 2.10. As propriedades do material e os resultados do teste estão resumidos na Tabela 2.1.

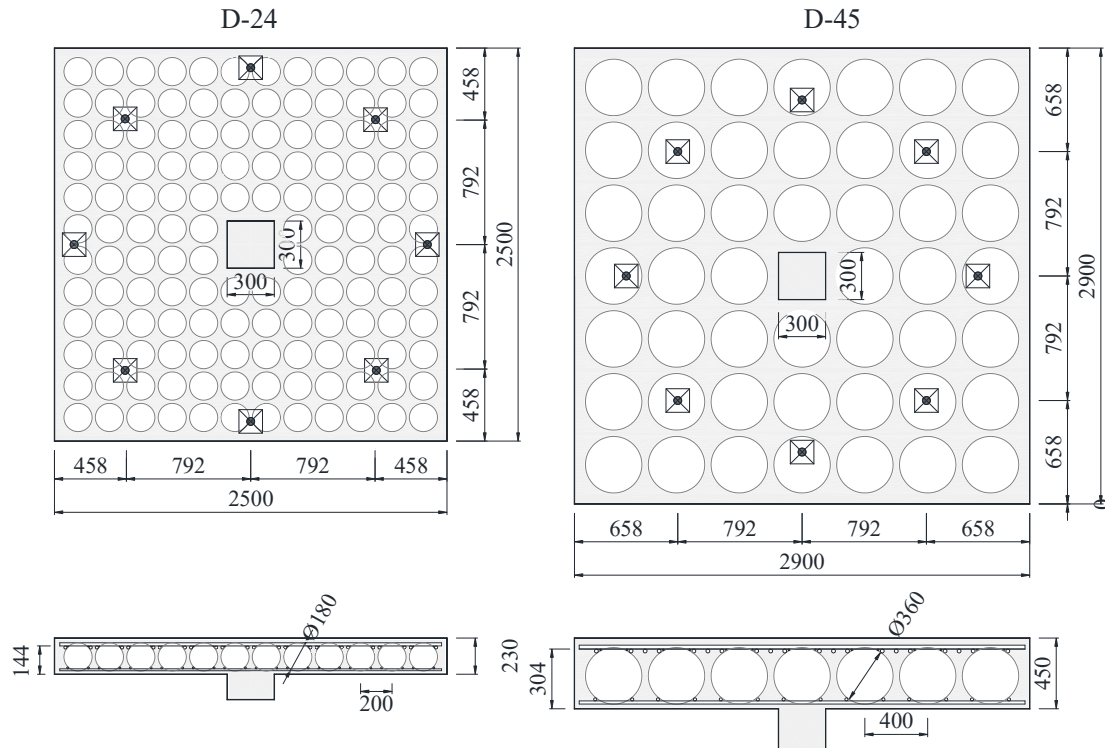


Figura 2.10 – Lajes ensaiadas [adaptado de HELD e PFEFFER (2002)]

Os resultados experimentais mostraram que os vazios nas lajes não influenciaram o padrão de fissura em comparação com o de uma laje maciça. A inclinação da fissura interna variou entre 30° e 40° , sendo que normas como o Eurocode 2 e ACI 318 consideram que a fissura para lajes maciças sem armadura de cisalhamento é $26,6^\circ$ e 45° , respectivamente. Como esperado o valor da resistência à punção foi menor, cerca de 62%, do valor da resistência estimada pelo DIN 1045 (1988) para uma laje maciça de mesma espessura, os autores não ensaiaram lajes maciças de referência.

Já as simulações numéricas, com auxílio do software TNO DIANA representaram bem o comportamento das lajes, tanto para deslocamentos, quanto para as deformações, ver Figura 2.11. Adicionalmente, os cálculos permitiram estudos paramétricos que dão uma melhor compreensão do comportamento estrutural sem a necessidade de realizar mais estudos experimentais.

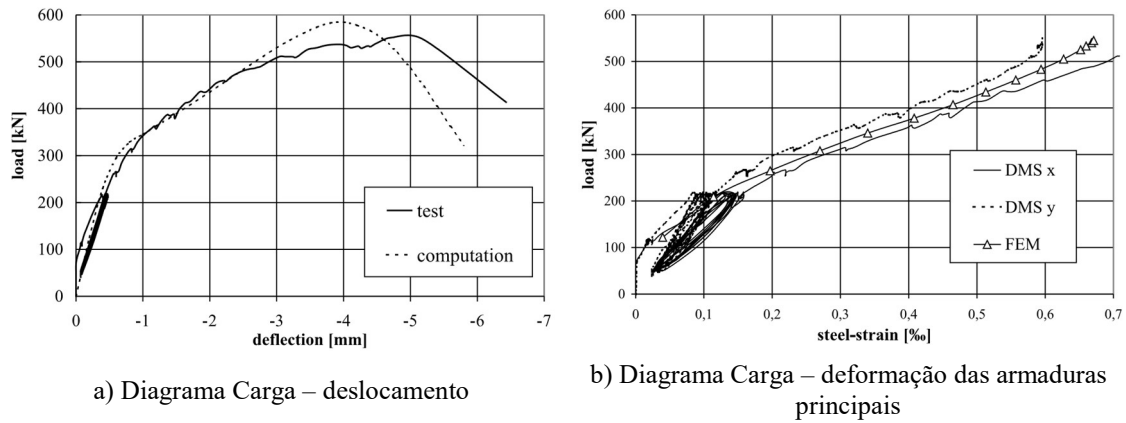


Figura 2.11 – Resultados das simulações computacionais [HELD e PFEFFER (2002)]

Finalmente, foram desenvolvidas as modificações necessárias de projeto para o código alemão DIN 1045 (1988). Nela, assim como em outros códigos, a resistência à punção é tratada como uma resistência ao cisalhamento que atua em uma seção, o chamado perímetro de controle. Os autores propõem que na hipótese deste perímetro ser interceptado pelas esferas (Figura 2.12) deve-se reduzir da parcela que multiplica o perímetro “u” pela altura útil “ h_m ” a área equivalente que é interceptada pelas esferas ($\sum d_k^2 \pi / 4$), conforme apresentado na Equação 2.1.

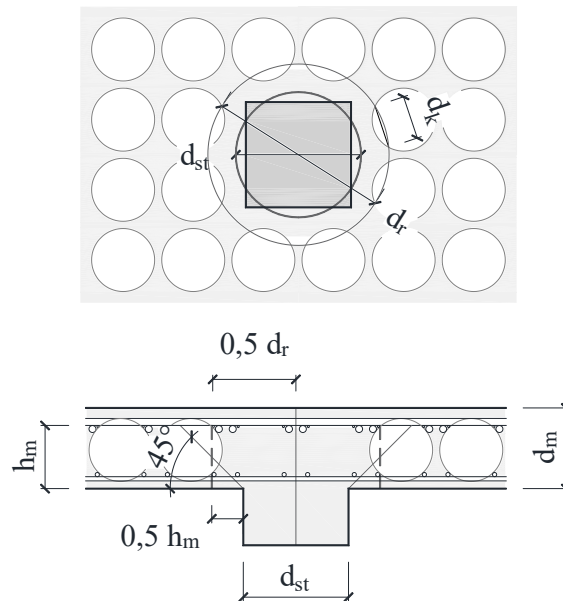


Figura 2.12 – Proposta à norma (adaptado de [HELD e PFEFFER, 2002])

$$A = u \cdot h_m - \sum d_k^2 \cdot \pi / 4 \quad \text{Equação 2.1}$$

Os autores mesmo propondo uma adequação da norma através da Equação 2.1, não apresenta os resultados, sendo assim os cálculos foram refeitos de acordo com o DIN 1045 (1988), Tabela 2.1. Esta adaptação, realizada com as normas em vigor àquela época,

geraram valores que representam bem os resultados experimentais, porém as formulações de punção passaram por grandes mudanças com as revisões ao longo dos anos, refletindo a necessidade da revisão destas estimativas de acordo com as normas atuais.

Tabela 2.1 – Dados das lajes e resultados normativos, HELD e PFEFFER (2002).

| Modelo | d_m (mm) | $A_{s, sup}$ (cm^2/m) | $f_{c,150}$ (MPa) | Carga última experimental (kN) | Carga última (proposta) (kN)* | Carga última como maciça (kN) |
|--------|---------------|------------------------------|----------------------|--|---|---|
| D1-24 | 190 | 34,35 | 44,4 | 520 | 541 | 840 |
| D2-24 | 190 | 34,35 | 50,8 | 580 | 604 | 945 |
| D3-24 | 190 | 34,35 | 46,7 | 525 | 572 | 893 |
| D4-45 | 380 | 40,29 | 29,6 | 935 | 892 | 1503 |
| D5-45 | 380 | 40,29 | 37,9 | 990 | 1053 | 1701 |
| D6-45 | 380 | 40,29 | 40,5 | 1180 | 1101 | 1795 |

* Cálculos refeitos na presente pesquisa de acordo com o DIN 1045 (1988), uma vez que não são apresentados no artigo original.

2.2.2. CEBALLOS (2017)

Na Universidade de Brasília, CEBALLOS (2017) avaliou o comportamento experimental à punção de lajes *BubbleDeck* reforçadas ao cisalhamento com utilização de pinos (*Studs*) e treliças entre as nervuras. No total foram ensaiadas seis lajes, cinco lajes *BubbleDeck* e uma laje maciça, todas com dimensões de 2500 x 2500 mm de comprimento, altura de 280 mm e pilar de seção circular com 300 mm de diâmetro. O concreto foi especificado com resistência à compressão de 33 MPa e a armadura de flexão principal consistiu de barras 16 mm de diâmetro nas duas direções principais, espaçadas em intervalos intercalados de 100 e 150 mm. Para as armaduras de cisalhamento e treliças foram utilizadas barras de 8 mm. A carga foi aplicada, por meio de atuadores hidráulicos, em oito pontos igualmente espaçados, dispostos em um círculo com raio de 1131 mm.

Os dados dos modelos, das formas e dos arranjos das armaduras de flexão e cisalhamento podem ser vistos nas Tabela 2.2, Figura 2.13 e Figura 2.14.

Tabela 2.2 – Dados das lajes, CEBALLOS (2017)

| Laje | f_c (MPa) | Tipo | Armadura de cisalhamento | | V_u (kN) |
|---------|-------------|-------------------|------------------------------|-------------------------------|------------|
| RSP-A01 | 37 | Maciça | Pino (<i>Stud</i>) em cruz | | 943 |
| BD-A01 | 29 | <i>BubbleDeck</i> | Pino (<i>Stud</i>) em cruz | - | 742 |
| BD-A02 | 37 | <i>BubbleDeck</i> | Pino (<i>Stud</i>) em cruz | Treliça com inclinação de 60° | 967 |
| BD-A03 | 37 | <i>BubbleDeck</i> | Pino (<i>Stud</i>) em cruz | Treliça com inclinação de 45° | 871 |
| BD-A04 | 29 | <i>BubbleDeck</i> | - | Treliça com inclinação de 60° | 762 |
| BD-A05 | 37 | <i>BubbleDeck</i> | - | Treliça com inclinação de 45° | 902 |

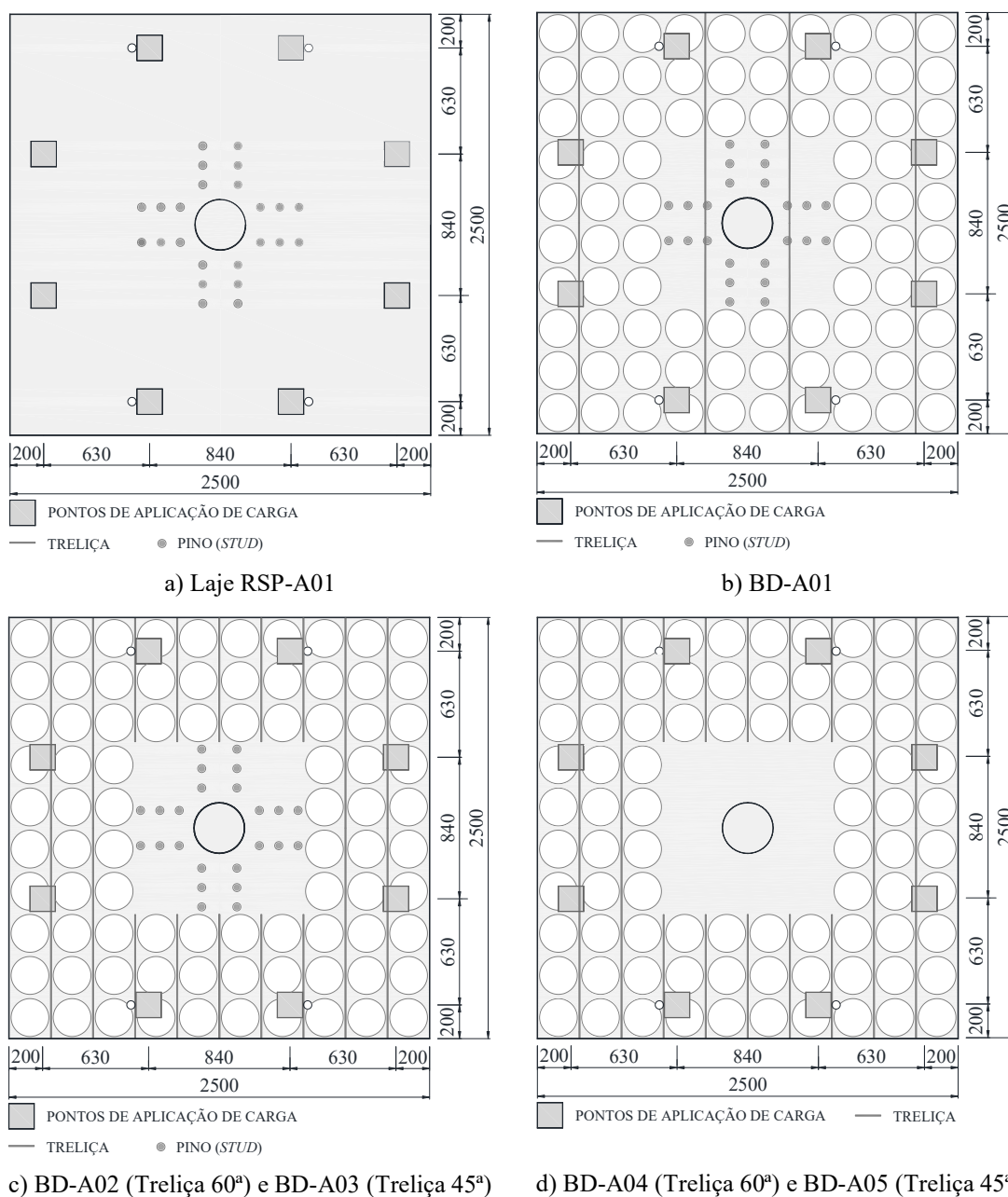
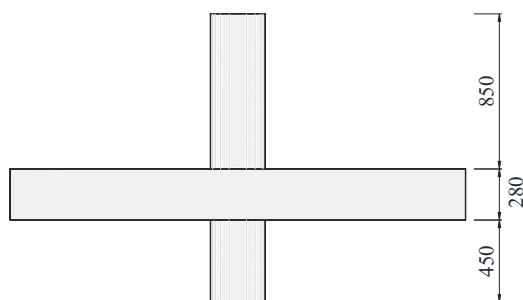


Figura 2.13 – Formas das lajes, CEBALLOS (2017)



e) Seção transversal das lajes

Figura 2.13 – Formas das lajes, CEBALLOS (2017) (continuação)

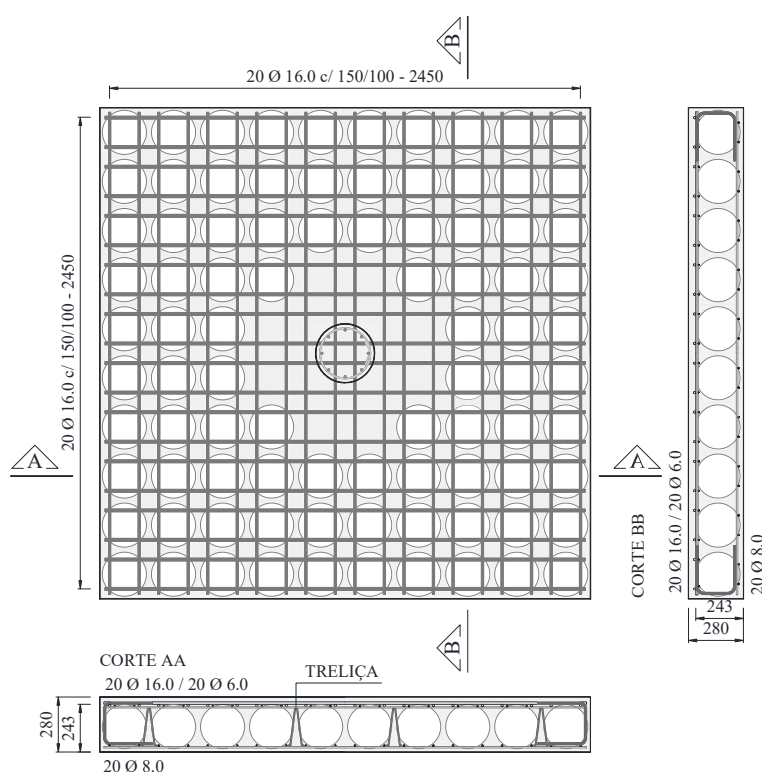


Figura 2.14 – Armadura das lajes, CEBALLOS (2017)

Para estes modelos, Ceballos (2017) concluiu que a utilização de *studs* não contribuiu efetivamente para aumento da capacidade de carga das lajes, já que apresentou pequenos valores de deformação, cerca de 7% da deformação de escoamento do aço. O reforço com treliças em todas nervuras próximas ao pilar, incrementou a resistência das lajes *BubbleDeck* em até até 30% para laje BD-A02, quando comparadas com a laje de referência BD-A01.

Apesar de fornecer importantes dados para comparação, a quantidade de ensaios realizados não permite conclusões absolutas com relação à efetividade das armaduras de

cisalhamento do tipo *stud* e a inclinação de armadura de cisalhamento que seja mais efetiva.

A resistência à punção calculada por CEBALLOS (2017) a partir das adaptações propostas por HELD e PFEFFER (2002) geraram resultados superestimados, a ponto de não serem considerados confiáveis, refletindo a necessidade de desenvolvimento de uma melhor forma de adaptação destas normativas.

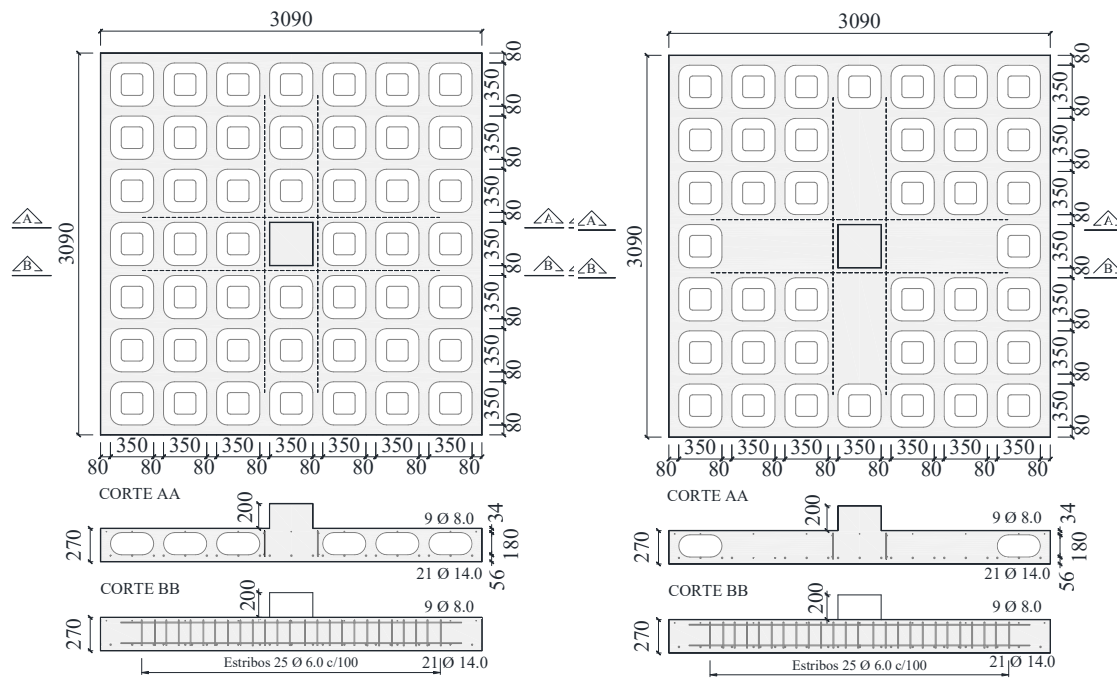
2.2.3. VALIVONIS *et al* (2017)

Este artigo discute os resultados de um estudo experimental e teórico que investigou a capacidade à punção de lajes de concreto armado com vazios de plástico. Foram realizados ensaios de seis lajes no total, duas lajes com vazios em toda extensão da laje, denominada BPR1, duas lajes com região maciça em formato de cruz, denominada BPR2 e lajes com maciço em formato quadrado em torno do pilar, laje BPR3, ver Figura 2.15.

As lajes foram confeccionadas com concreto normal de resistência à compressão especificada de 26 MPa. As dimensões em planta de todos modelos foram de 3090 x 3090 mm, com altura de 270 mm para as lajes BPR1 e BPR2 e 170mm para laje BPR3. Um segmento de pilar foi moldado com seção transversal de 350 x 350 mm e altura de 200 mm, posicionado no centro da laje.

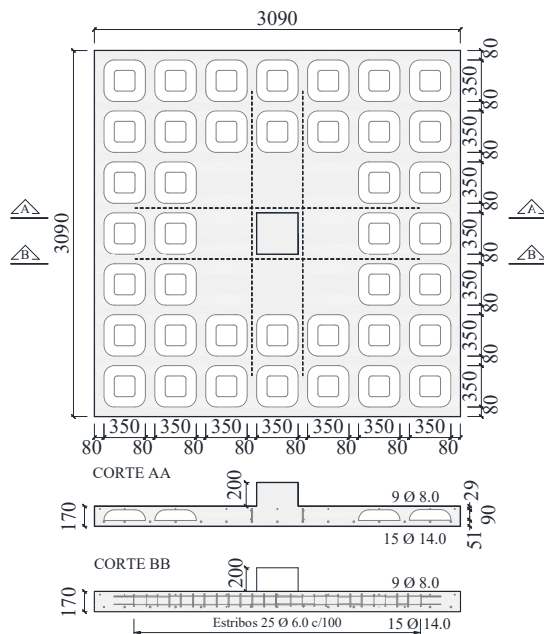
Os moldes de plástico têm dimensões em planta de 350x 350 mm com altura de 180 mm para as lajes BPR1 e BPR2 e altura de 90 mm para lajes BPR3. Nenhuma informação adicional foi dada sobre os moldes neste artigo.

As lajes foram reforçadas, na região tracionada, com 21 barras longitudinais de 14 mm de diâmetro, e na região comprimida foram utilizadas 15 barras longitudinais de 8 mm, ambas nas duas direções. As barras foram posicionadas conforme o Corte AA da Figura 2.15. Para incremento da resistência à punção, foram reforçadas quatro nervuras com armadura de cisalhamento de 6 mm de diâmetro, espaçadas a cada 100 mm, ver Corte BB da Figura 2.15. Durante os ensaios cada modelo foi apoiado continuamente em vigas nos quatro bordos e a carga foi aplicada no pilar, de cima para baixo, por um cilindro hidráulico.



a) Lajes BPR1-1 e BPR1-2

b) Lajes BPR2-1 e BPR2-2



c) Lajes BPR3-1 e BPR3-2

Figura 2.15 – Formas e armação da lajes de VALIVONIS *et al.* (2017).

Os resultados experimentais de VALIVONIS *et al.* (2017) mostram que a resistência à punção das lajes com maciços em formato de cruz, lajes BPR2, é em torno de 18% maior quando comparadas a lajes sem maciço, lajes BPR1. Para as lajes BPR3 não é possível uma comparação direta de resultados, uma vez que sua altura difere das demais.

Para as análises normativas, VALIVONIS *et al.* (2017) propôs que o perímetro de controle u_1 utilizado nas formulações do Eurocode 2 (2004) fosse adaptado e denominado de u_{eff} , ver Equação 2.2, quando este interceptasse a região com vazios.

$$u_{eff} = u_1 - \sum b_i \left(\frac{d}{h_b} \right) \quad \text{Equação 2.2}$$

onde d é a altura útil da laje; b_i é a largura do molde de plástico e h_b sua altura.

Analisando as estimativas de cálculo, a capacidade à punção das lajes, ficou entre 10 e 30% abaixo dos resultados obtidos de acordo com as formulações do Eurocode 2 (2004) sem adaptação. Já com a metodologia adaptada estes resultados ficam no máximo 18% abaixo, ver Tabela 2.3.

Dos resultados apresentados vemos que esta adaptação não é efetiva para o caso das lajes BPR3, uma vez que a superfície de controle não intercepta a região com vazios e a proposta não é aplicável para estes casos. O autor também não apresenta as verificações que devem ser realizadas em um perímetro de controle afastado da última linha de armaduras, o que seria fundamental para uma melhor análise.

Tabela 2.3 – Dados das lajes, VALIVONIS *et al.* (2017).

| Laje | d (mm) | ρ (%) | f_c (MPa) | E_c (GPa) | Carga última experimental (kN) | Carga última Eurocode 2 (kN) | Carga última Eurocode 2* (kN) |
|--------|-------------|---------------|----------------|----------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| BPR1-1 | 234,6 | 0,487 | 26,51 | 27,17 | 600,16 | 850,40 | 558,15 |
| BPR1-2 | 234,8 | 0,486 | 26,51 | 27,17 | 600,12 | 815,90 | 548,82 |
| BPR2-1 | 232,9 | 0,493 | 28,95 | 25,57 | 776,33 | 856,50 | 703,26 |
| BPR2-2 | 235,0 | 0,485 | 28,95 | 25,57 | 704,46 | 862,60 | 710,73 |
| BPR3-1 | 152,9 | 0,403 | 27,96 | 24,20 | 385,43 | 456,40 | 456,44 |
| BPR3-2 | 150,0 | 0,416 | 27,96 | 24,20 | 428,13 | 447,50 | 447,55 |

* Carga última prevista com formulações adaptadas pelo autor.

onde ρ é a taxa de armadura de flexão; f_c é a resistência à compressão do concreto e E_c é o módulo de elasticidade do concreto

Apesar do artigo fornecer importantes dados experimentais faltam informações sobre ancoragem da armadura de cisalhamento; resultados da estimativa da carga de flexão das lajes; e detalhes sobre a posição da superfície de ruptura na laje, se intercepta ou não a região com vazios. Com estas informações, a análise do trabalho poderia ser aperfeiçoada.

2.3. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO DE LAJES MACIÇAS

Esta seção apresenta o cálculo da resistência ao cisalhamento para ligações laje-pilar interiores com e sem armadura de cisalhamento segundo três diferentes normas – ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2004), NBR 6118 (2014) – e o código modelo *fib* Model Code 2010 (2012). A expressão geral para o cálculo da capacidade das lajes lisas, sem armadura de cisalhamento, consiste no produto da tensão de cisalhamento nominal, perímetro de controle e altura útil para todas as normas. No entanto, cada norma varia na definição da posição do perímetro de controle e da tensão de cisalhamento nominal. A capacidade de carga de projeto $V_{R,c}$ de lajes lisas sem qualquer reforço de cisalhamento é definida conforme Equação 2.3.

$$V_{R,c} = v \cdot u \cdot d \quad \text{Equação 2.3}$$

onde v é a tensão de cisalhamento nominal de ligação laje-pilar; u é o perímetro de controle definido para lajes sem armadura de cisalhamento, e d é a altura útil da laje no perímetro de controle.

Para lajes lisas de concreto armado com armaduras de cisalhamento estas normas recomendam a verificação de dois possíveis modos de ruptura: superfície de ruptura dentro da região das armaduras de cisalhamento ($V_{R,cs}$); superfície de ruptura fora da região das armaduras de cisalhamento ($V_{R,out}$).

A capacidade de cisalhamento fora da região reforçada é verificada com a Equação 2.3, e a definição do perímetro de controle u , no entanto, muda de acordo com o arranjo de reforço ao cisalhamento. A capacidade ao cisalhamento dentro da região reforçada é calculada conforme Equação 2.4 para todas as normas.

$$V_{R,cs} = \phi V_{R,c} + V_{R,s} \quad \text{Equação 2.4}$$

onde $V_{R,c}$ e $V_{R,s}$ são as contribuições de resistência concreto e armadura de cisalhamento da laje, respectivamente. Cada norma tem definições diferentes para cada um deles. O coeficiente de segurança ϕ será considerado unitário para estudos em laboratório.

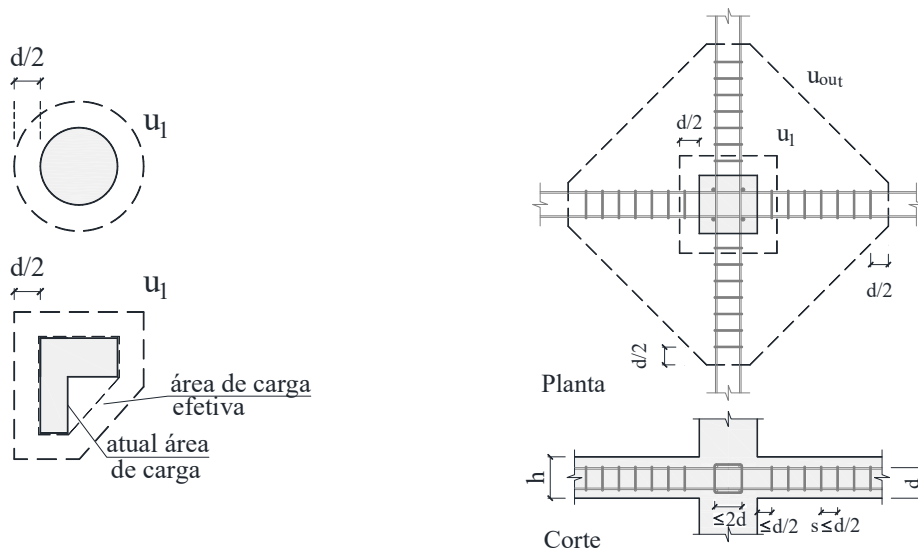
2.3.1. ACI 318 (2014)

Segundo o ACI 318 (2014) a resistência à punção de uma laje sem armaduras de cisalhamento é expressa como o mínimo de três expressões, dadas na Equação 2.5. Estas três equações levam em consideração os efeitos da retangularidade do pilar, a posição da ligação no pavimento ou área de carga em relação à altura útil. O perímetro de controle para estas equações deve ser localizado à $d/2$ da face do pilar ou área carregada, conforme Figura 2.16a.

$$V_{R,c} = \min \begin{cases} 0,17 \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \\ 0,083 \cdot \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{u_1} + 2\right) \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \\ 0,33 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \end{cases} \quad \text{Equação 2.5}$$

onde f_c é a resistência à compressão do concreto, β_c é a razão entre a maior e a menor dimensão do pilar, α_s é uma constante que assume valor igual a 40 para o caso de pilares internos, u_1 é o comprimento de um perímetro de controle a $d/2$ da face do pilar, e d é a altura útil da laje.

Para estribos a distância entre o pilar e a primeira camada de armadura não deve exceder o valor de $d/2$ e o espaçamento entre suas pernas verticais não deve exceder $2d$, conforme representado na Figura 2.16b.



a) lajes sem armadura de cisalhamento

b) lajes com armadura de cisalhamento

Figura 2.16 – Definição do perímetro de controle de acordo com ACI 318 (2014)

A capacidade de carga fora da região reforçada ao cisalhamento ($V_{R,out}$) para os elementos de laje lisa deve ser calculada de acordo com a Equação 2.6, utilizando a definição de perímetro de controle (u_{out}) mostrada na Figura 2.16b. Por outro lado, a capacidade no interior da região reforçada ao cisalhamento ($V_{R,cs}$) válida para estribos, pode ser expressa por meio da Equação 2.7, e o seu valor máximo expresso por meio da Equação 2.8.

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

$$V_{R,cs} = 0,17 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d + \left(\frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{ys,w} \right) \quad \text{Equação 2.7}$$

$$V_{R,cs} < V_{R,max} = 0,5 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{Equação 2.8}$$

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

2.3.2. EUROCODE 2 (2004)

Segundo o Eurocode 2 (2004), a resistência à punção em lajes de concreto armado sem armadura de cisalhamento, com perímetro de controle à $2d$ da face do pilar, deve ser obtida conforme a Equação 2.9.

$$V_{Rc} = \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{Equação 2.9}$$

onde k é o *size effect*, assumido como $k = 1 + \sqrt{200 / d} \leq 2,0$, ρ é a taxa de armadura de flexão, limitada em 0,02, γ_c é o coeficiente de segurança parcial que, para os casos experimentais em análise, $\gamma_c = 1$; e u_1 é o comprimento do perímetro de controle afastado $2d$ das faces do pilar, como apresentado na Figura 2.17.

Em regiões com armadura de cisalhamento, a resistência deve ser calculada de acordo com a Equação 2.10. E a verificação da resistência da diagonal comprimida, próxima das extremidades do pilar, deve ser realizada com a Equação 2.11.

$$V_{R,cs} = 0,75 \cdot V_{R,c} + \left(1,5 \cdot \frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,ef} \right) \leq k_{max} \cdot V_{R,c}^{15} \quad \text{Equação 2.10}$$

$$V_{R,max} = 0,4 \cdot v \cdot f_c \cdot u_o^{16} \quad \text{Equação 2.11}$$

onde $v = 0,6 \cdot (1 - f_{ck} / 250)$, com f_{ck} em MPa e $f_{yw,ef}$ é a tensão efetiva na armadura de cisalhamento, de acordo com $f_{yw,ef} = 250 + 0,25d \leq f_{yw,d}$; k_{max} é um fator que limita a máxima capacidade que pode ser atingida pelo uso da armadura de cisalhamento, o valor recomendado para este coeficiente é de 1,5.

A ruptura ocorrendo fora da região das armaduras de cisalhamento pode ser verificada com a Equação 2.9 utilizando o perímetro de controle (u_{out}) conforme Figura 2.18, que apresenta alguns detalhes típicos recomendados por esta norma quando da utilização de armaduras de cisalhamento.

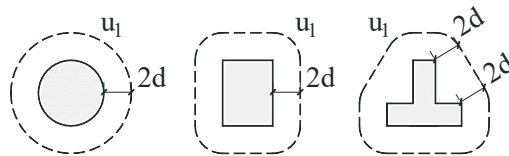


Figura 2.17 – Perímetro de controle típico ao redor de áreas carregadas

¹⁵ Implementado com a emenda EN 1992-1-1:2004/A1:2014.

¹⁶ Alterado com a errata EN 1992-1-1:2004/AC:2010.

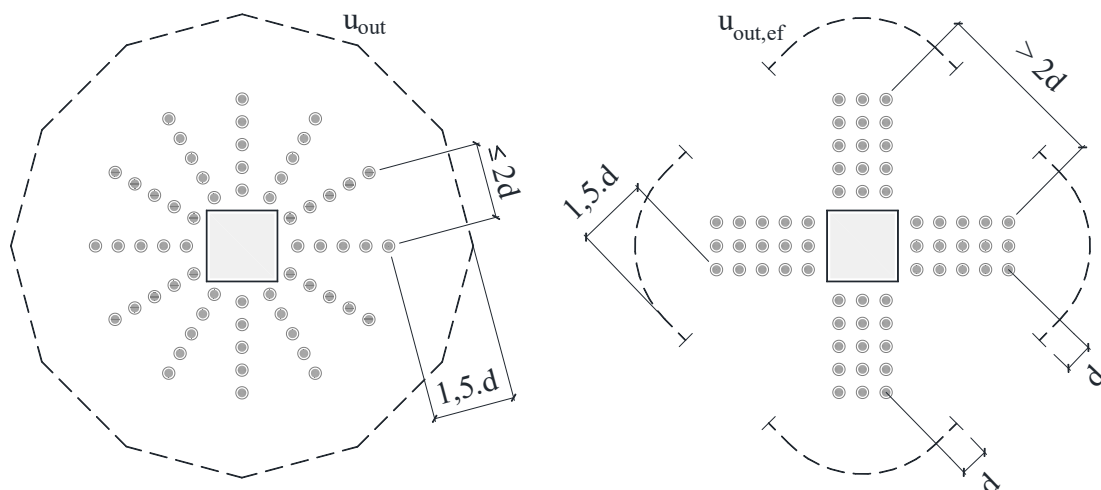


Figura 2.18 – Definição do perímetro de controle de acordo com Eurocode 2 (2004) para lajes com armadura de cisalhamento

Na Figura 2.18 u_{out} é o comprimento do perímetro de controle afastado $1,5.d$ da camada mais externa de armaduras de cisalhamento, respeitando-se um limite de $2d$ para a distância máxima entre duas linhas concêntricas, no caso de armaduras dispostas radialmente. No caso deste limite não ser atendido, deve ser utilizado o perímetro de controle externo efetivo ($u_{out,ef}$).

2.3.3. ABNT NBR 6118 (2014)

O modelo analítico para verificação da resistência ao cisalhamento adotado pela NBR (2014) é análogo ao do Eurocode 2 (2004), diferindo pelo *size effect*, que é calculado pela expressão $k = 1 + \sqrt{200/d}$ (d em mm) e que pode assumir valores superiores a 2,0, e pela taxa de armadura a flexão que também pode assumir valor superior 0,02.

Para esta norma, a resistência à punção em lajes de concreto armado sem armadura de cisalhamento deve ser feita conforme Equação 2.12 e perímetro de controle representado na Figura 2.19. A resistência ao cisalhamento dentro da região reforçada é obtida com a Equação 2.13 e perímetro de controle de acordo com os detalhes das Figura 2.20. E a verificação da tensão resistente de compressão diagonal do concreto próxima das extremidades do pilar, deve ser obtida conforme Equação 2.14, com a observação que $V_{R,max}$ pode ser ampliado de 20 % por efeito de estado múltiplo de tensões junto a um pilar

interno, quando os vãos que chegam a esse pilar não diferem mais de 50 % e não existem aberturas junto ao pilar.

$$V_{R,c} = \frac{0,182}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot u_1 \cdot d \quad \text{Equação 2.12}$$

$$V_{R,cs} = \frac{0,14}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_c)^{1/3} \cdot u_1 \cdot d + \left(1,5 \cdot \frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,ef} \right) \quad \text{Equação 2.13}$$

$$V_{R,m\acute{a}x} = (0,27 \cdot \alpha_v \cdot f_{cd} \cdot u_o \cdot d) \cdot 1,2 \quad \text{Equação 2.14}$$

onde γ_c é o coeficiente de segurança parcial que, para os casos experimentais é tomada igual uma unidade. A norma brasileira, no entanto, não apresenta esses limites; u_{out} é o comprimento do perímetro de controle afastado à $2d$ da camada mais externa de armaduras de cisalhamento, respeitando-se um limite de $2d$ do último contorno de armaduras. No caso deste limite não ser atendido, deve ser utilizado o perímetro de controle externo efetivo ($u_{out,ef}$), ver Figura 2.20; $f_{yw,ef}$ é a tensão efetiva na armadura de cisalhamento, não maior do que 250 MPa para estribos em lajes com altura de até 150 mm. Para lajes com altura maior que 350 mm, é considerada a resistência de 435 MPa, sendo permitida interpolação linear para valores intermediários; e $\alpha_v = (1 - f_{ck} / 250)$ com f_{ck} em MPa.

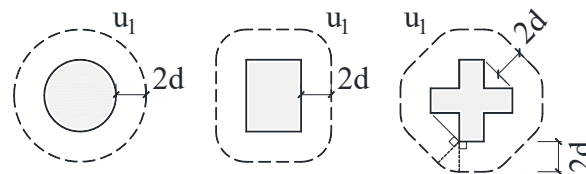
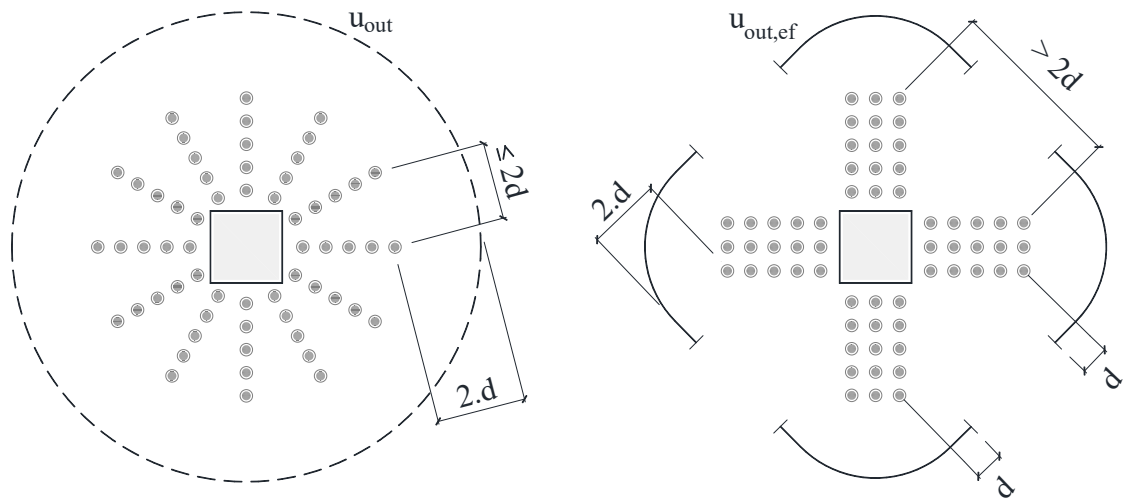
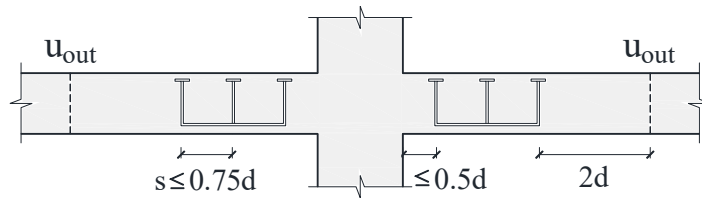


Figura 2.19 – Perímetro de controle em pilares internos de acordo com ABNT NBR 6118 (2014)



a) Disposição da armadura de punção em planta e contorno da superfície crítica u_{out}



b) Disposição da armadura de punção em corte

Figura 2.20 – Definição do perímetro de controle de acordo com ABNT NBR 6118 (2014)

2.3.4. *fib* Model Code 2010 (2012)

O modelo de cálculo da resistência à punção do *fib* Model Code 2010 (2012) é baseado na “Teoria da Fissura Crítica de Cisalhamento” desenvolvida por MUTTONI (2008). Para esta norma a avaliação da resistência à punção deve ser feita em um perímetro de controle, b_0 , afastado $0,5d_v$ da área carregada, ver Figura 2.21. A altura útil efetiva da laje, d_v , deve ser tomada como representada na Figura 2.22.

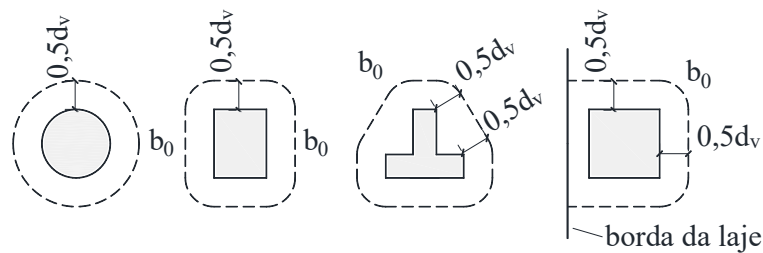


Figura 2.21 – Perímetro de controle de acordo com *fib* Model Code 2010 (2012)

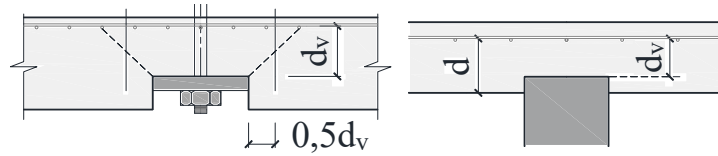


Figura 2.22 – Altura útil da laje de acordo com *fib* Model Code 2010 (2012)

A resistência última à punção, $V_{R,c}$, para uma laje sem armadura de cisalhamento é estabelecida conforme Equação 2.15.

$$V_{R,c} = k_{\psi} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_0 \cdot d_v \quad \text{Equação 2.15}$$

O parâmetro k_{ψ} é calculado pela Equação 2.16 e depende da rotação da laje, ψ , na região do apoio, a qual é representada na Figura 2.23.

$$k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9 \cdot k_{dg} \cdot \psi \cdot d} \leq 0,6 \quad \text{Equação 2.16}$$

sendo,

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75 \quad \text{Equação 2.17}$$

onde d_g é o diâmetro máximo do agregado graúdo e d é o valor médio da altura útil efetiva (armadura de flexão) para as direções x e y.

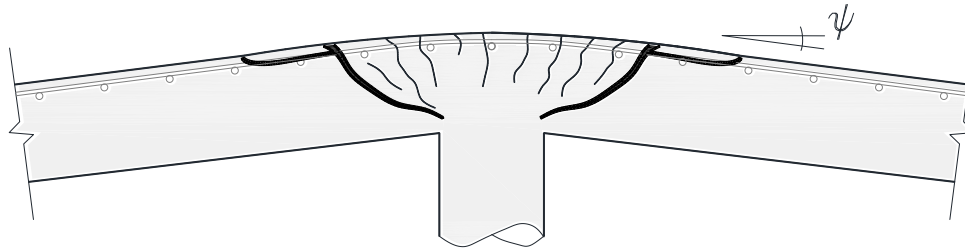


Figura 2.23 – Rotação ψ da laje de acordo com *fib* Model Code 2010 (2012)

O cálculo da rotação no momento da ruína da laje pode ser feito em quatro níveis de aproximação. O nível 1 é aplicado para lajes analisadas por teoria elástica que não apresentam redistribuição significativa de forças internas. Uma estimativa segura da rotação na ruptura é dada pela Equação 2.18:

$$\psi = 1,5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_y}{E_s} \quad \text{Equação 2.18}$$

onde r_s denota a posição em que o momento fletor radial é zero em relação ao eixo do apoio. O valor de r_s pode ser aproximado como 0,22 Lx ou 0,22 Ly para as direções x e y, respectivamente, para lajes lisas regulares onde a razão dos vãos (Lx / Ly) está entre 0,5 e 2,0; f_y é a tensão de escoamento do aço; e E_s seu módulo de elasticidade.

O nível 2 fornece uma boa estimativa nos casos em que são consideradas significativas redistribuições dos momentos fletores, ver Equação 2.19.

$$\psi = 1,5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_y}{E_s} \left(\frac{V_E / 8}{m_R} \right)^{1,5} \quad \text{Equação 2.19}$$

onde m_R é o momento resistente por unidade de largura da laje, e V_E é a carga solicitante.

O nível 3 fornece uma melhor estimativa para lajes calculadas por modelo linear-elástico, nesta aproximação o coeficiente 1,5 da Equação 2.19 pode ser substituído por 1,2:

$$\psi = 1,2 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_y}{E_s} \left(\frac{V_E / 8}{m_R} \right)^{1,5} \quad \text{Equação 2.20}$$

O nível 4 é utilizado com base em análises não lineares da estrutura, levando em conta os efeitos da fissuração e enrijecimento, o escoamento das armaduras e outros efeitos não lineares relevantes.

Para lajes com armadura de cisalhamento, o *fib* MC2010 considera a resistência última da laje composta por duas parcelas (Equação 2.21), uma relativa à contribuição do concreto e a outra à contribuição do aço das armaduras de cisalhamento interceptadas pela superfície de ruptura.

$$V_{R,cs} = V_{R,c} + V_{R,s} \quad \text{Equação 2.21}$$

onde $V_{R,cs}$ é a capacidade de carga da ligação laje-pilar; $V_{R,c}$ é a contribuição do concreto para a capacidade de carga; $V_{R,s}$ é a contribuição do aço para a capacidade de carga, dada pela Equação 2.22.

$$V_{R,s} = \sum A_{sw} k_e \sigma_{sw} \text{ sen} \alpha \quad \text{Equação 2.22}$$

onde $\sum A_{sw}$ é a soma das áreas da seção transversal das armaduras de cisalhamento localizadas dentro da zona delimitada pelas distâncias de $0,35d_v$ e d_v das extremidades da área carregada. O ângulo α é a inclinação das armaduras, conforme Figura 2.24.

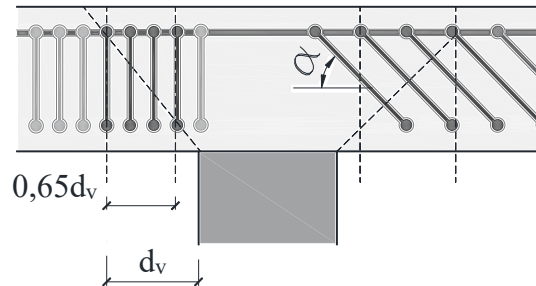


Figura 2.24 – Armadura de cisalhamento ativada na ruptura de acordo com *fib* Model Code 2010 (2012)

σ_{sw} se refere à tensão que é ativada nas armaduras de cisalhamento, e é calculada pela Equação 2.23.

$$\sigma_{sw} = \frac{E_s \cdot \psi}{6} \left(1 + \frac{f_{bd}}{f_{yw}} \cdot \frac{d}{\phi_w} \right) \leq f_{yw} \quad \text{Equação 2.23}$$

onde ϕ_w é o diâmetro da armadura de cisalhamento; f_{yw} a sua tensão de escoamento; e f_{bd} é a tensão de aderência ao concreto, que para barras corrugadas pode ser usado o valor de $f_{bd} = 3MPa$.

A máxima resistência à punção é limitada pela integridade do concreto na diagonal comprimida, conforme apresentado na Equação 2.24. A resistência à punção fora da zona das armaduras de cisalhamento é dada pela Equação 2.25.

$$V_{R,max} = k_{sys} \cdot k_{\psi} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_0 \cdot d_v \leq \sqrt{f_{ck}} \cdot b_0 \cdot d_v \quad \text{Equação 2.24}$$

$$V_{R,c,out} = k_{\psi} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_{out} \cdot d_v \quad \text{Equação 2.25}$$

onde o coeficiente k_{sys} leva em conta o desempenho das armaduras de cisalhamento em controlar a fissura de cisalhamento e para garantir o confinamento do concreto na face comprimida. Simplificadamente, k_{sys} pode ser tomado igual a 2,0. Eventualmente, se regras de detalhamento mais restritivas forem adotadas ($s_0 \leq 0,5d_v$ e $s_1 \leq 0,5d_v$, de acordo com a Figura 2.26, e se o local do reforço transversal é checado durante a

construção), o valor de k_{sys} pode ser incrementado para 2,4, no caso de estribos com suficiente ancoragem nas duas faces da laje, outros valores podem ser usados para o coeficiente k_{sys} desde que sejam verificado experimentalmente; b_{out} é o comprimento do perímetro de controle afastado à $0,5d_v$ da camada mais externa de armaduras de cisalhamento, respeitando-se um limite de $1,5d_v$ do último contorno de armaduras, ver Figura 2.25.

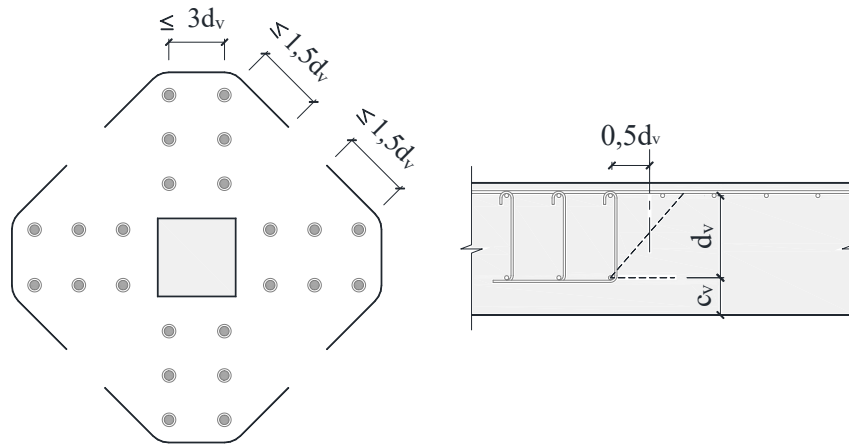


Figura 2.25 – Perímetro de controle de acordo com *fib* Model Code 2010 (2012) para lajes com armadura de cisalhamento.

As equações para lajes com armadura de cisalhamento são aplicáveis desde que: o mínimo de duas camadas de armaduras sejam dispostas na direção radial; a geometria e tipo de armadura de cisalhamento garanta ancoragem em ambas extremidades; o máximo cobrimento do concreto no lado comprimido não exceda $d_v/6$; e atenda os limites indicados na Figura 2.26.

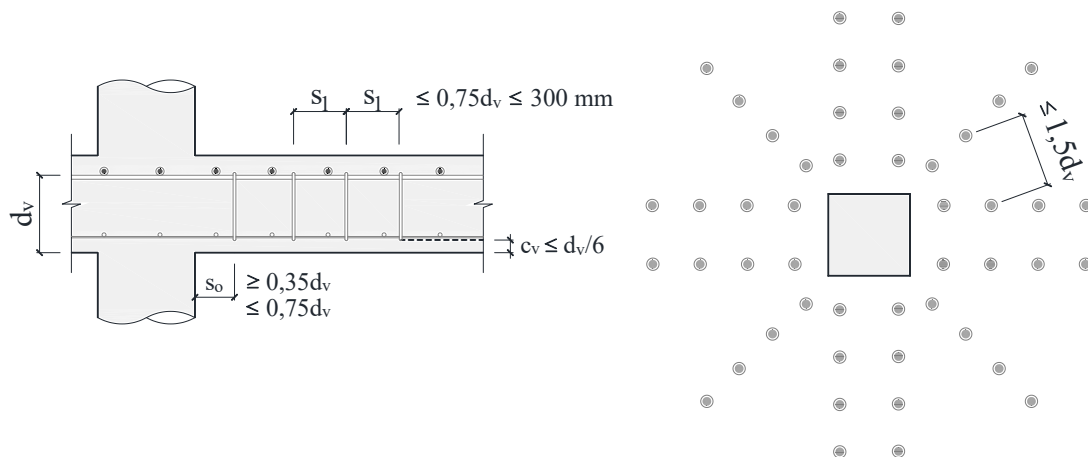


Figura 2.26 – Regras de detalhamento para armadura de cisalhamento de acordo com *fib* Model Code 2010 (2012)

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ENSAIADAS

Os modelos ensaiados em laboratório são normalmente idealizados como elementos estruturais básicos individuais, modelos locais, desde que se leve em consideração que os resultados apresentem comportamento compatível às estruturas reais de concreto armado. Com esse intuito, o presente trabalho procurou reproduzir uma região de momento negativo em torno do pilar, delimitada por uma circunferência de raio igual a 22% do vão total entre pilares, considerando uma situação de pilar interno e carregamento simétrico.

As dimensões adotadas para o modelo local buscam representar o caso particular de uma estrutura de um edifício real construído com laje *BubbleDeck*, com compatibilidade de espessura de laje, vãos e dimensões do pilar, respeitando também as limitações dimensionais impostas pela laje de reação e pórtico de ensaios do Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília - LABEST.

No total foram ensaiados à punção 11 modelos locais de ligação laje-pilar interno submetidos a carregamento simétrico. Sete desses modelos foram construídos com a técnica *BubbleDeck* e comparados com quatro lajes maciças de referência. Todas as lajes possuíam dimensões de 2500 x 2500 mm com altura nominal de 280 mm (BD 280) e pilares internos circulares medindo 300 mm de diâmetro. As formas esféricas de poliestireno utilizadas têm diâmetro de 225 mm e foram espaçadas a cada 250 mm, entre eixos, nas duas direções.

As lajes foram distribuídas em três séries de concretagem, na primeira série foram ensaiadas três lajes *BubbleDeck* e uma maciça de referência, na segunda série foram ensaiadas duas lajes *BubbleDeck* e duas lajes maciças, por fim na terceira série foram moldadas duas lajes *BubbleDeck* e uma maciça de referência, totalizando as 11 lajes. Todas as lajes se apoiam em pilares circulares de 300 mm de diâmetro, com alturas de 800 mm no tramo superior e 500 mm no tramo inferior para as lajes da 1ª série, ver Figura 3.1c, e alturas 850 mm no tramo superior e 450 mm no tramo inferior para as lajes da 2ª e 3ª série, ver Figura 3.1d. A variação da altura do pilar se deu por motivos técnicos de montagem e não exerceu influência nos resultados de ensaio.

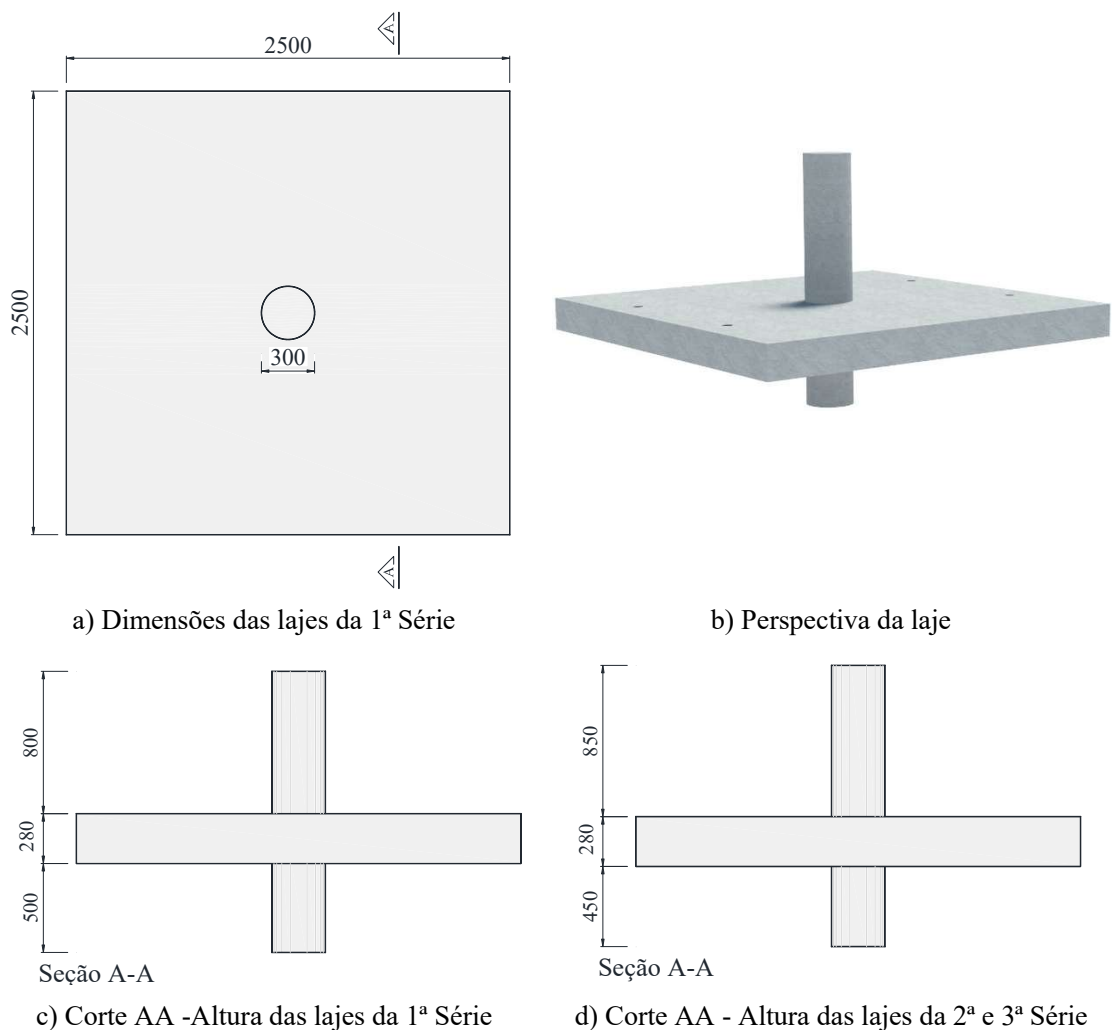


Figura 3.1 – Dimensões das lajes ensaiadas.

Na primeira série de concretagem, foi moldada uma laje maciça de referência, denominada RSP28 (Figura 3.2a), duas lajes *BubbleDeck* sem armadura de cisalhamento, BD28-P1 e BD28-P2 (Figura 3.2b e c), uma do tipo módulo reforçado e outra tipo módulo com pré-laje, respectivamente, e por fim um terceiro modelo *BubbleDeck* com pré-laje, BD28-P3 (Figura 3.2d), que possuía armadura de cisalhamento do tipo estribo fechado, com barras de diâmetro igual à 6,3mm, distribuída em uma direção e sem ancoragem na armadura de flexão negativa principal. A distribuição das esferas e armaduras de cisalhamento para as lajes *BubbleDeck* da 1ª e 2ª Série de ensaios seguiu recomendações encontradas em relatórios técnicos do fabricante.

Na 2ª série de concretagem, as lajes possuíam armadura de cisalhamento do tipo estribo fechado com 8 mm de diâmetro, nas lajes tipo *BubbleDeck* - BD1 e BD2, ver Figura 3.3a e b – os estribos foram distribuídos em uma direção, sem ancoragem na

armadura de flexão principal, variando entre elas apenas a utilização da pré-laje. As duas lajes maciças possuíam armaduras de cisalhamento distribuídas nas duas direções, em forma de cruz. Na laje SS1 (Figura 3.3c), sem pré-laje, a armadura de cisalhamento ancorava na armadura superior e inferior, sendo denominada neste trabalho de ancoragem total. Já na laje SS2 (Figura 3.3d), com pré-laje, a armadura de cisalhamento ancorava na armadura superior e se apoiava acima da pré-laje, aqui denominada de ancoragem parcial.

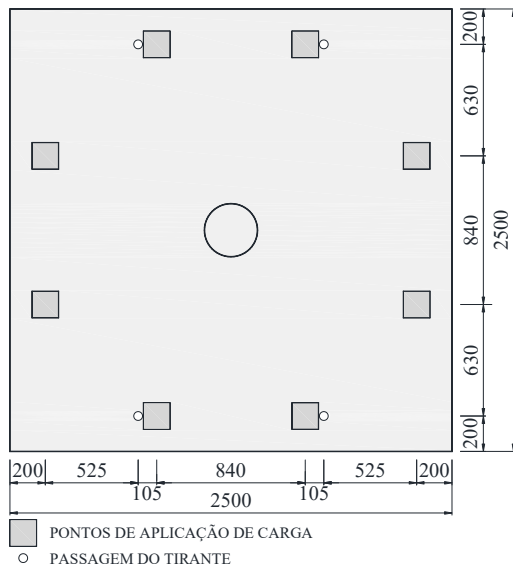
As lajes *BubbleDeck* da 3ª Série - BD3 e BD4, ver Figura 3.4a e b - possuíam armadura de cisalhamento do tipo estribo aberto, com 8 mm de diâmetro, distribuídos em forma de cruz e ancorados de forma total e parcial, respectivamente, variando entre elas a utilização do painel pré-moldado. Nesta série de ensaios foi construída uma laje maciça adicional, idêntica à laje SS1 da 2ª Série, esta duplicidade se deve à sua importância como modelo de referência, para fins de comparação com as lajes de características semelhantes.

De forma geral, as lajes com pré-laje são compostas por quatro elementos simétricos previamente concretados com altura nominal de 60mm, dispostos na forma para a concretagem do volume restante dos modelos. As dimensões destes elementos podem ser visualizadas na Figura 3.5 e mais detalhes sobre o método construtivo podem ser encontrados no item 3.3.

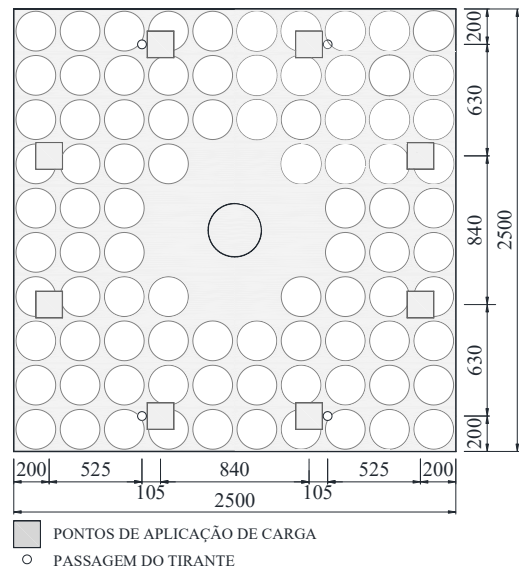
A resistência à compressão do concreto para todas as lajes foi especificada com 30 MPa e a altura útil teórica foi de 240 mm, as demais características são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resumo das características das lajes ensaiadas

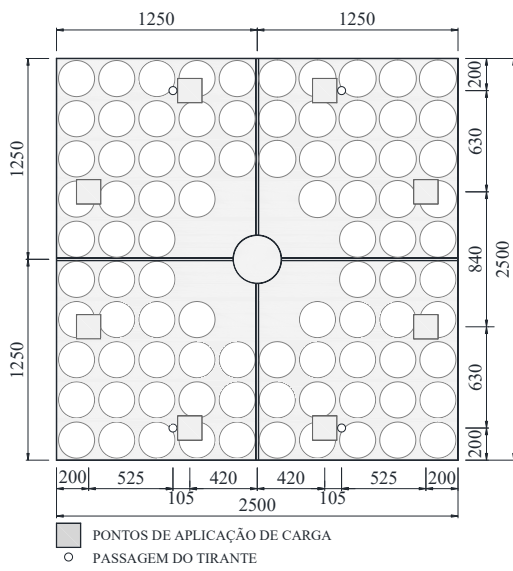
| Série | Descrição | | | Armadura de cisalhamento | | | |
|----------|--------------|-------------------|----------|--------------------------|---------|-------------------|-----------|
| | Laje | Tipo | Pré laje | Diâmetro (mm) | Tipo | Distribuição | Ancoragem |
| 1ª Série | RSP28 | Maciça | Não | - | - | - | - |
| | BD28 - P1 | <i>BubbleDeck</i> | Não | - | - | - | - |
| | BD28 - P2 | <i>BubbleDeck</i> | Sim | - | - | - | - |
| | BD28 - P3 | <i>BubbleDeck</i> | Sim | 6,3 | Fechado | Uma direção | Não |
| 2ª Série | BD1 | <i>BubbleDeck</i> | Não | 8,0 | Fechado | Uma direção | Não |
| | BD2 | <i>BubbleDeck</i> | Sim | 8,0 | Fechado | Uma direção | Não |
| | SS1 | Maciça | Não | 8,0 | Fechado | Cruz (2 direções) | Total |
| | SS2 | Maciça | Sim | 8,0 | Fechado | Cruz (2 direções) | Parcial |
| 3ª Série | BD3 | <i>BubbleDeck</i> | Não | 8,0 | Aberto | Cruz (2 direções) | Total |
| | BD4 | <i>BubbleDeck</i> | Sim | 8,0 | Aberto | Cruz (2 direções) | Parcial |
| | SS1 3ª Série | Maciça | Não | 8,0 | Fechado | Cruz (2 direções) | Total |



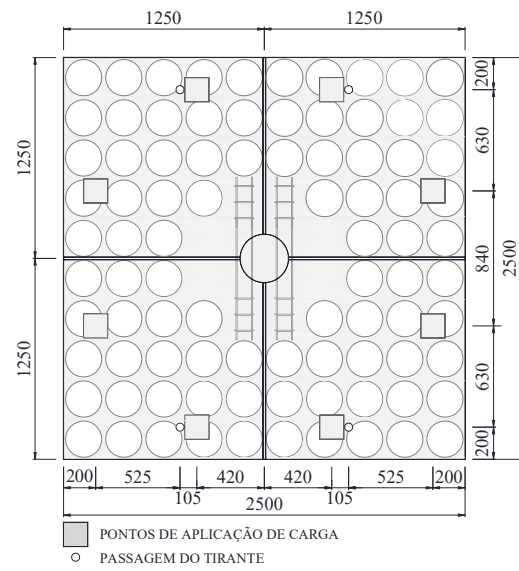
a) RSP28



b) BD28-P1



c) BD28-P2



d) BD28-P3

Figura 3.2 – 1ª Série de concretagem

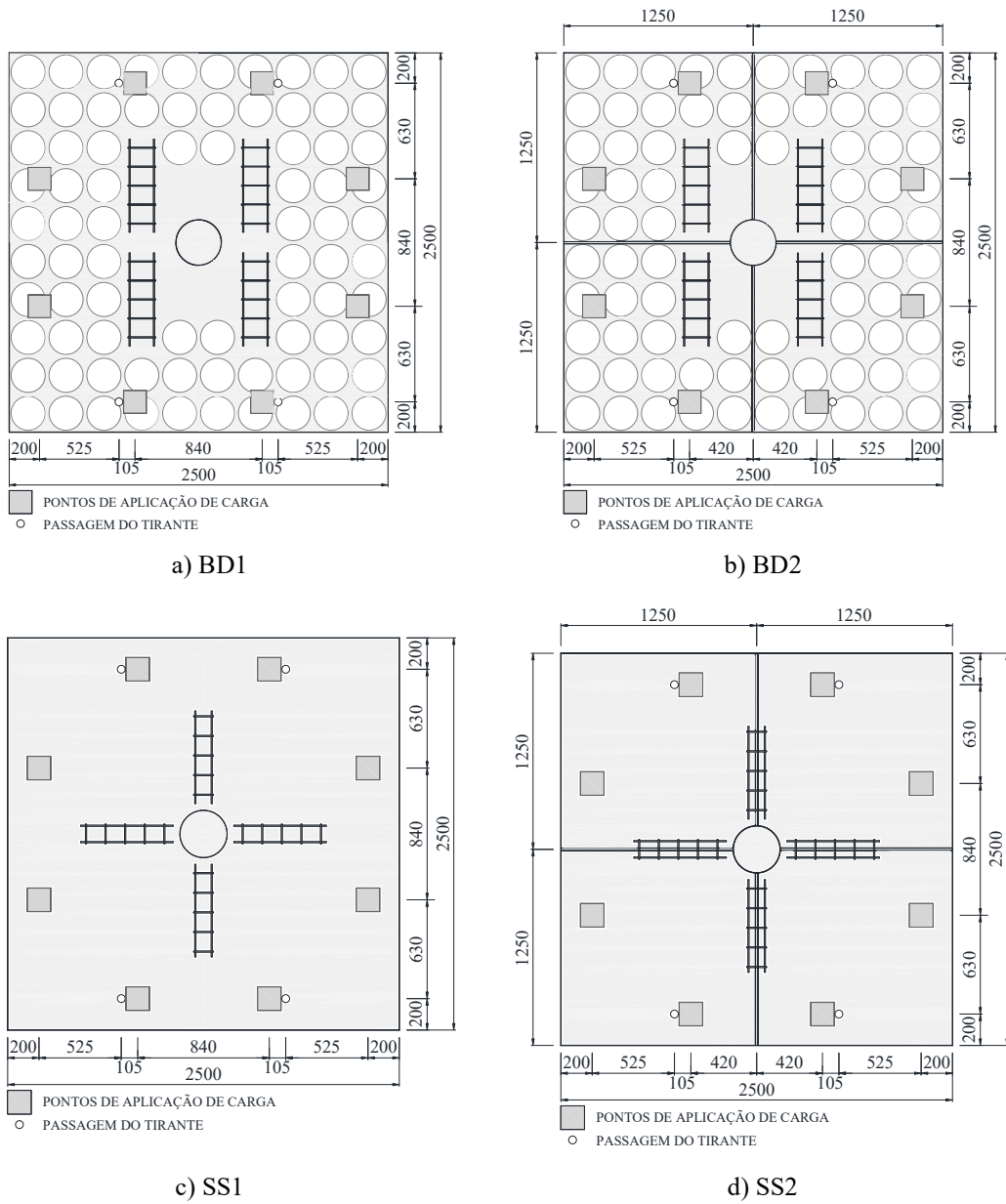


Figura 3.3 – 2ª Série de concretagem

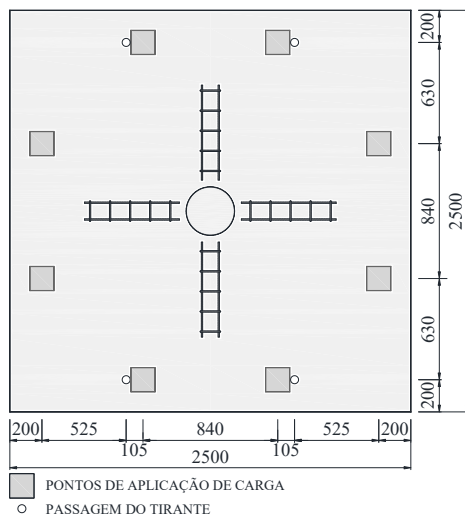
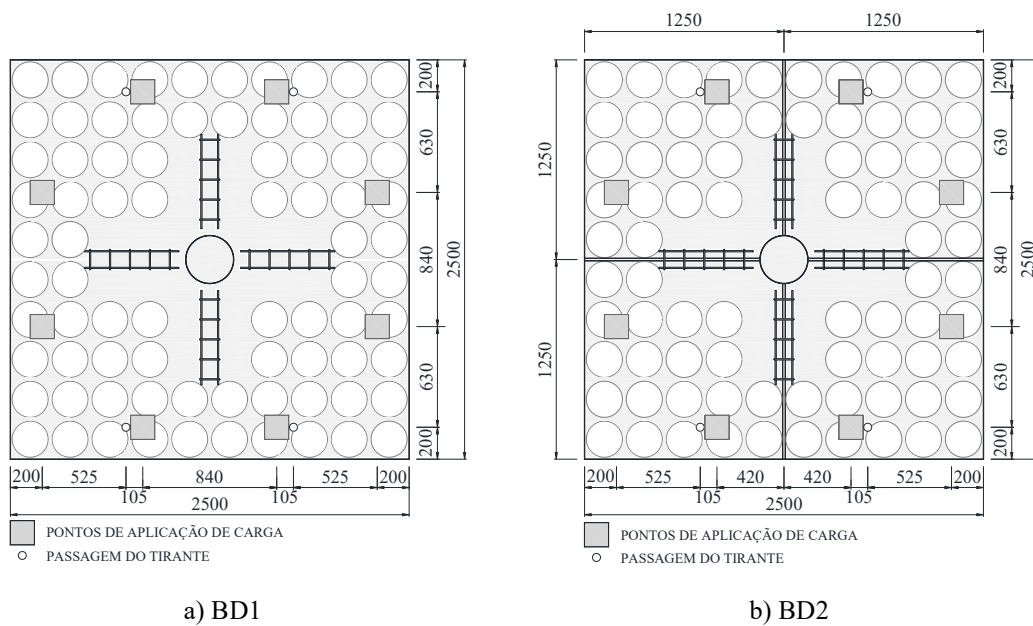


Figura 3.4 – 3ª Série de concretagem

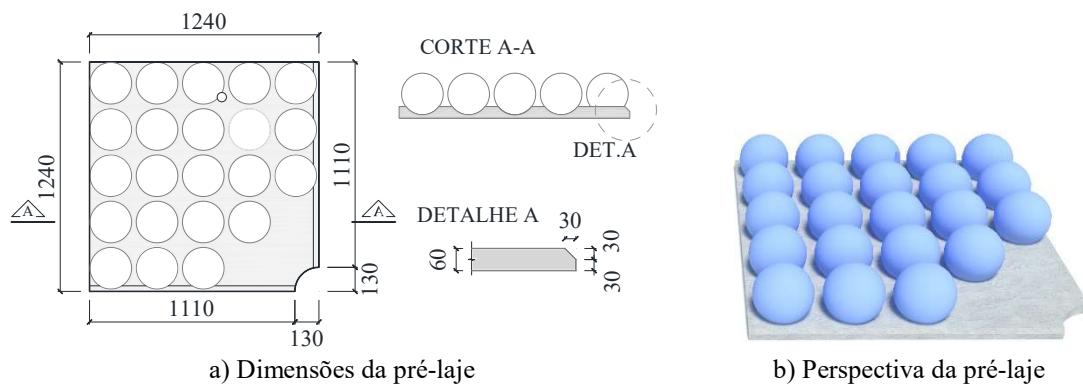


Figura 3.5 – Detalhe genérico das pré-lajes

Para uma melhor visualização das principais variáveis definidas nas séries de lajes propostas, detalhou-se na Figura 3.6 uma divisão das lajes em quatro Grupos de acordo com os principais parâmetros das armaduras de cisalhamento.

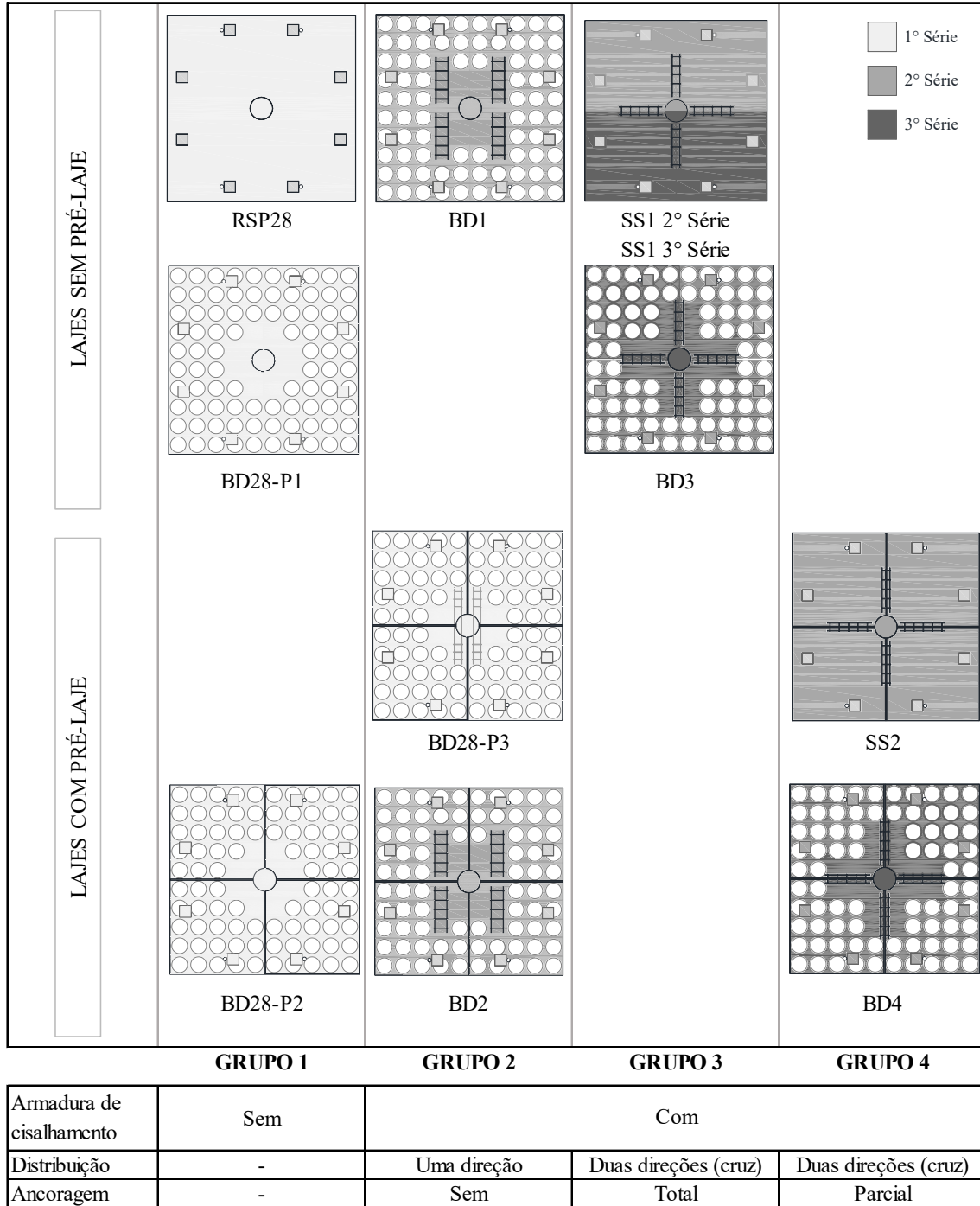
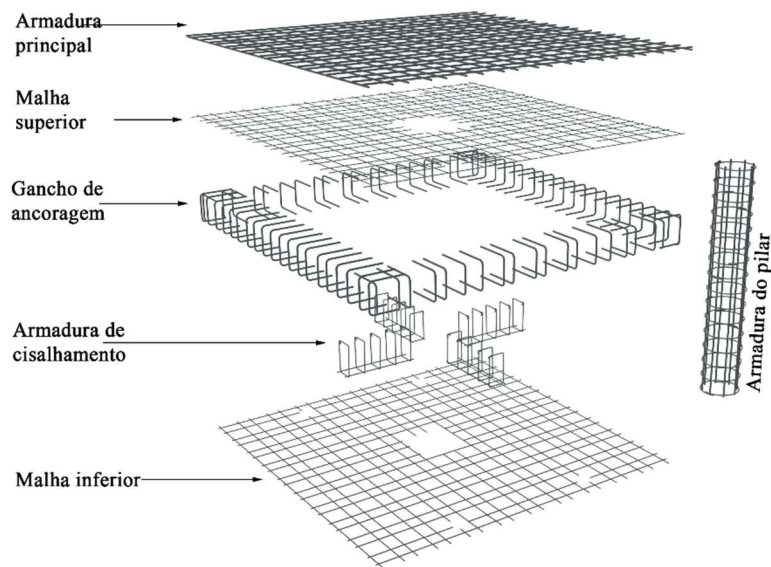


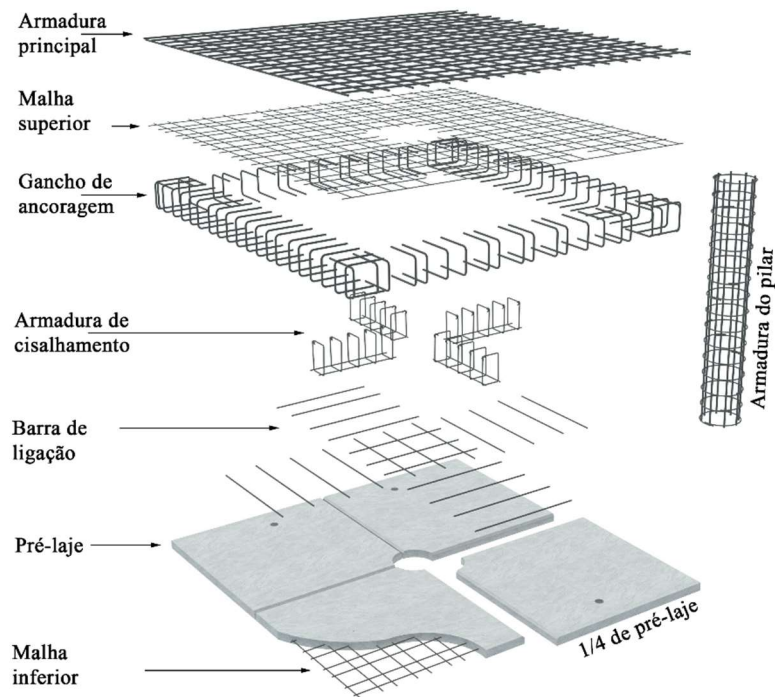
Figura 3.6 – Distribuição dos modelos por grupos nas séries ensaiadas

3.1.1. Sequência de instalação das lajes

Neste trabalho foram ensaiadas lajes *BubbleDeck* do tipo módulo reforçado e módulo com pré-laje. Para um melhor entendimento de como estes sistemas foram construídos em laboratório, nas Figura 3.7 e Figura 3.8 são representadas de forma esquemática todos elementos de ambos.

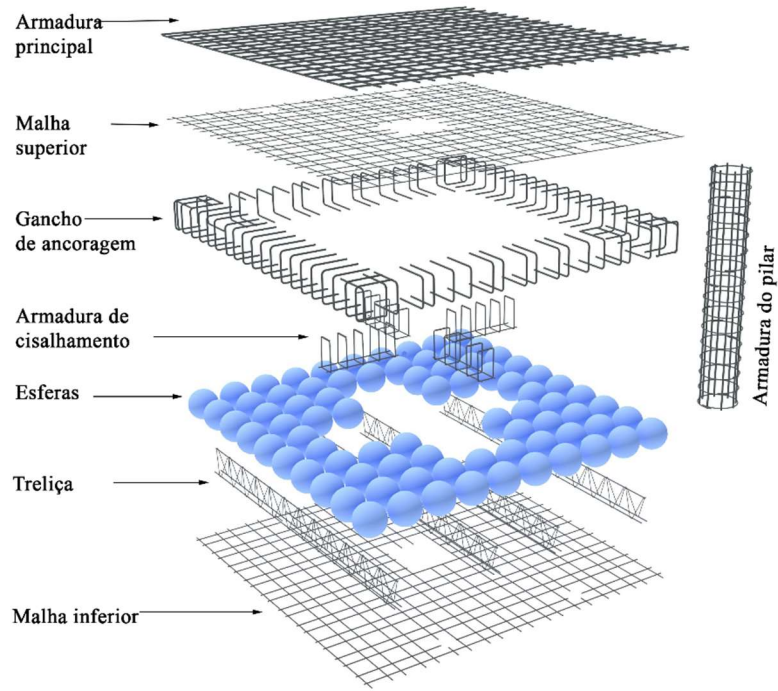


a) Lajes sem pré-laje

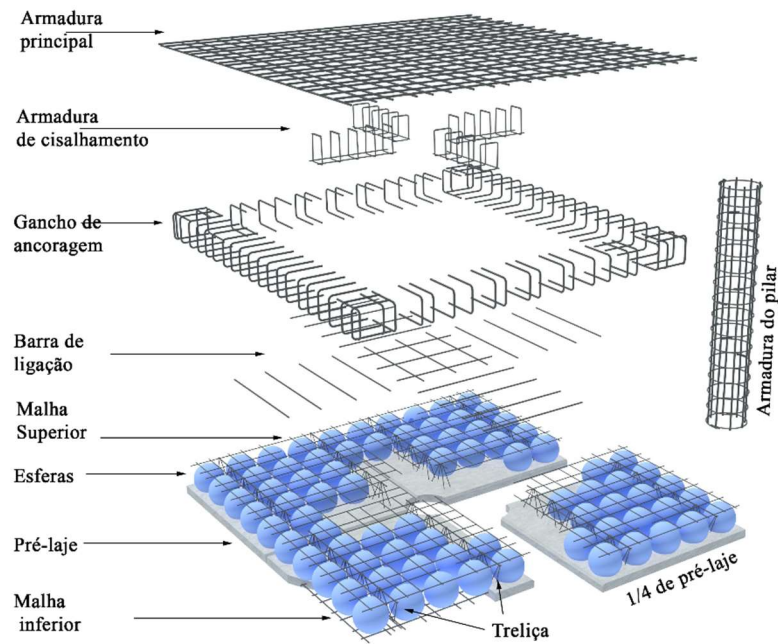


b) Lajes com pré-laje

Figura 3.7 – Vista explodida das lajes Maciças



a) Lajes sem pré-laje



b) Lajes com pré-laje

Figura 3.8 – Vista explodida das lajes *BubbleDeck*

3.1.2. Armaduras de flexão negativa das lajes

As armaduras de flexão de todas as lajes foram compostas por barras de aço de 12,5 mm de diâmetro, aço CA50 e espaçamento variando entre 100 mm e 150 mm, quando necessário esta disposição era levemente alterada em função das interferências causadas por armaduras de cisalhamento e a passagem dos tirantes de reação. Os detalhes destas armaduras nas lajes de referência e nas lajes *BubbleDeck* são apresentados nas Figura 3.9, Figura 3.11, Figura 3.13 e Figura 3.14. Para ancoragem das armaduras de flexão, foram acrescentadas, nas extremidades, barras de 12,5 mm de diâmetro, dobradas em forma de “U” conforme detalhe da Figura 3.10 e Figura 3.12.

Adicionalmente, todas as lajes foram armadas com uma malha de aço composta por barras de 6,0 mm de diâmetro e aço CA60 espaçadas a cada 100 mm e 150 mm, esta armação faz parte do sistema construtivo *BubbleDeck* e serve para fixação das esferas, ver detalhes no item 3.1.2.

A altura útil equivalente de todas lajes foi obtida através da média ponderada entre a área total das barras de 6,0 mm e 12,5 mm de diâmetro e suas respectivas alturas medidas em campo $d_{x,y} = (A_{s,12,5} \cdot d_{12,5,xy} + A_{s,6,0} \cdot d_{6,0,xy}) / (A_{s,12,5} + A_{s,6,0})$, sendo A_s a área de uma barra e $d_{x,y}$ a altura útil de cada barra nas direções ortogonais x e y . Uma abordagem similar a esta foi considerada em uma análise preliminar, em que a área das barras foi substituída pela equivalente tensão de escoamento do aço. Porém, devido a pequena variação entre os resultados foi decidido apresentar apenas os resultados da primeira abordagem.

No que diz respeito às considerações de projeto, as taxas de armadura, ρ_s , das lajes de referência e *BubbleDeck* são as mesmas, pois, recomendações como as do EC2 (2004), CEB-FIP 90 (1991) e NBR 6118 (2014) sugerem que $\rho_s = A_s/A_c = A_s / [(D + 6 \cdot d) \cdot d]$, sendo D o diâmetro do pilar circular, d a altura útil da laje e A_s a área da armadura de flexão compreendida sobre a largura $0,5 \cdot D + 3 \cdot d$, a qual é medida para cada lado da laje a partir do eixo do pilar.

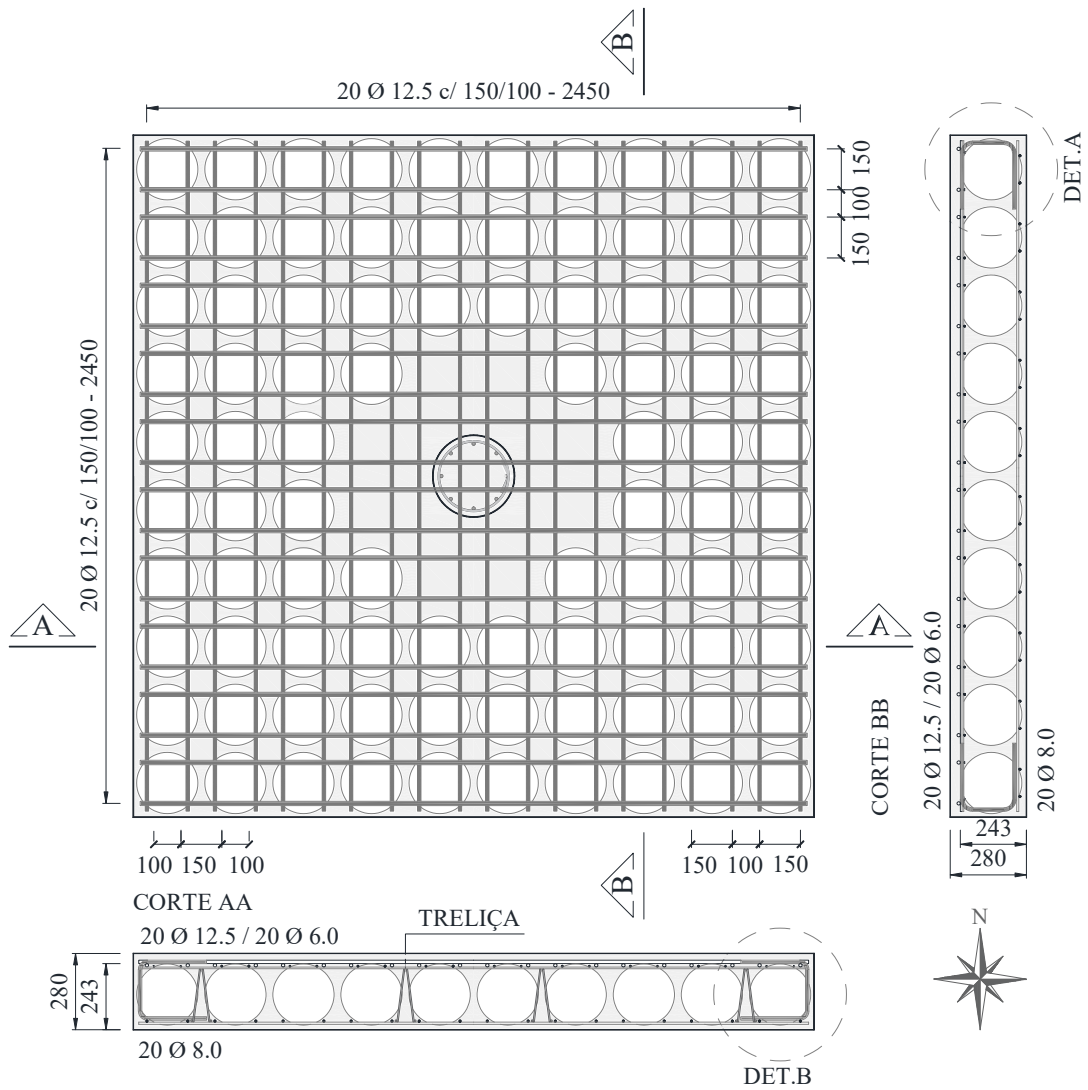


Figura 3.9 – Armaduras de flexão das lajes sem pré-laje

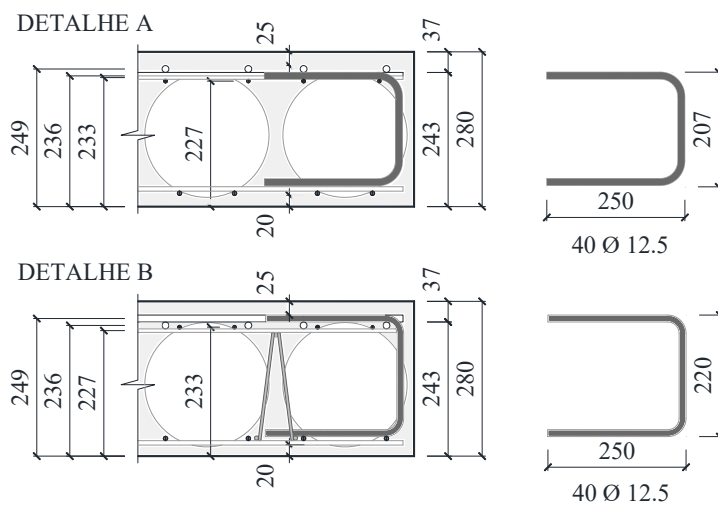
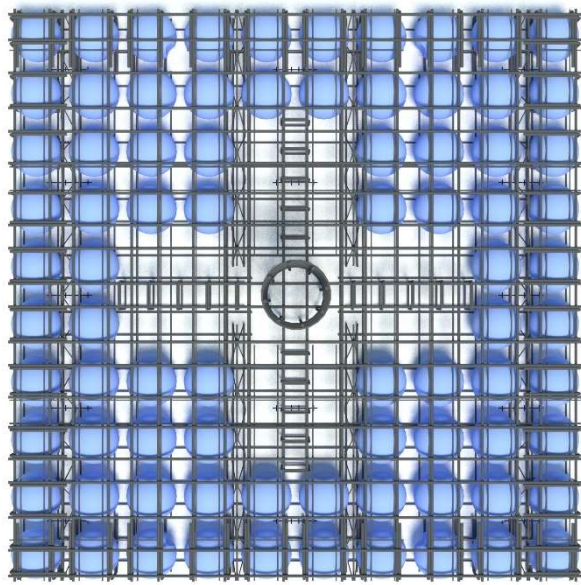
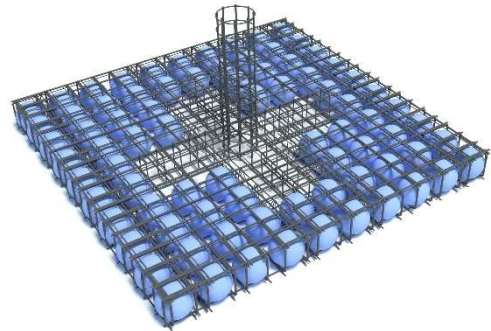


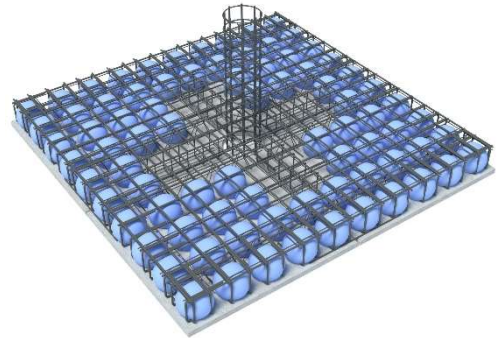
Figura 3.10 – Detalhes dos ganchos das armaduras de flexão das lajes sem pré-laje



a) Vista em planta da armação de laje *BubbleDeck*

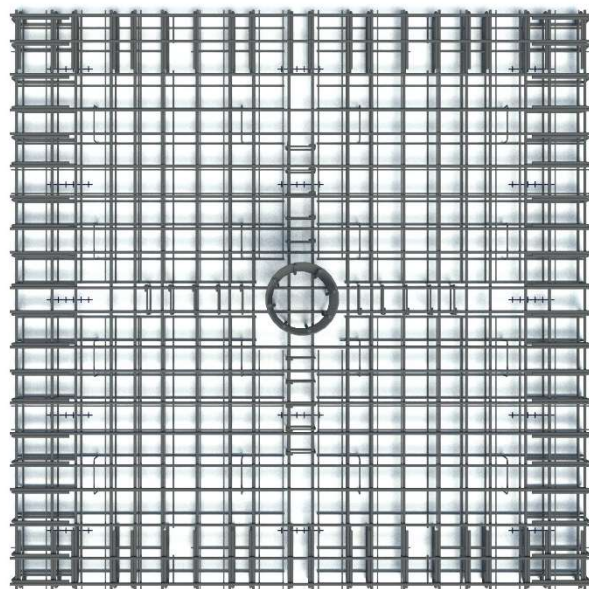


b) Perspectiva de laje sem pré-laje

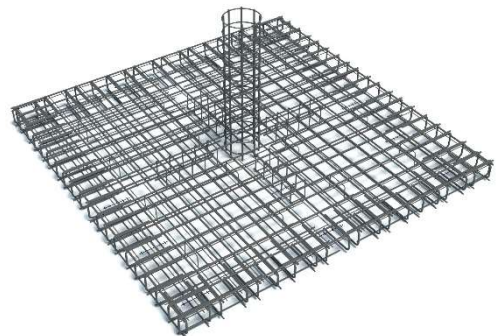


c) Perspectiva de laje com pré-laje

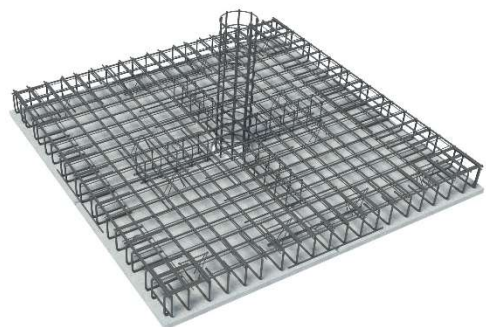
Figura 3.13 – Perspectiva da armação das lajes *BubbleDeck*



a) Vista em planta da armação de laje maciça



b) Perspectiva de laje sem pré-laje



c) Perspectiva de laje com pré-laje

Figura 3.14 – Perspectiva da armação das lajes maciças

3.1.3. Armação das telas inferiores e superiores das lajes

No sistema construtivo *BubbleDeck* as esferas plásticas são fixas através de duas telas de aço, que entre outras funções, mantêm o espaçamento entre as esferas, apoia as barras de flexão negativa, substitui a armação de flexão positiva e eventualmente contribui para resistência à compressão nas regiões onde o concreto é substituído por vazios.

Para as lajes ensaiadas, foram utilizadas telas eletrosoldadas de aço CA60 com espaçamento intercalado entre barras de 100 e 150 mm. O diâmetro das barras da tela superior foi de 6,0 mm enquanto da tela inferior foi adotado o diâmetro de 8,0 mm. As distribuições das telas nas lajes podem ser visualizadas na Figura 3.15 a Figura 3.18.

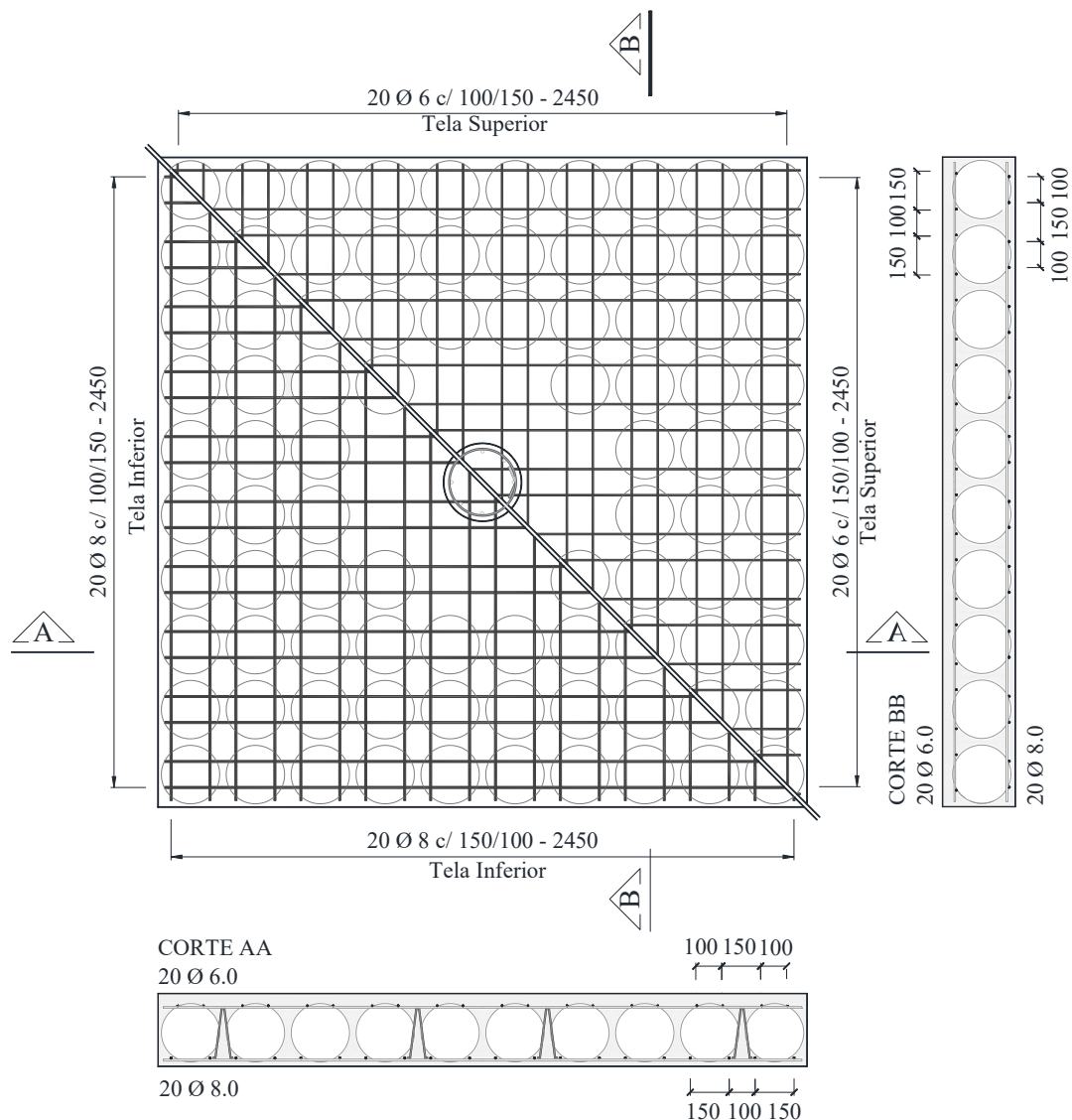


Figura 3.15 – Tela inferior e superior para lajes sem pré-laje

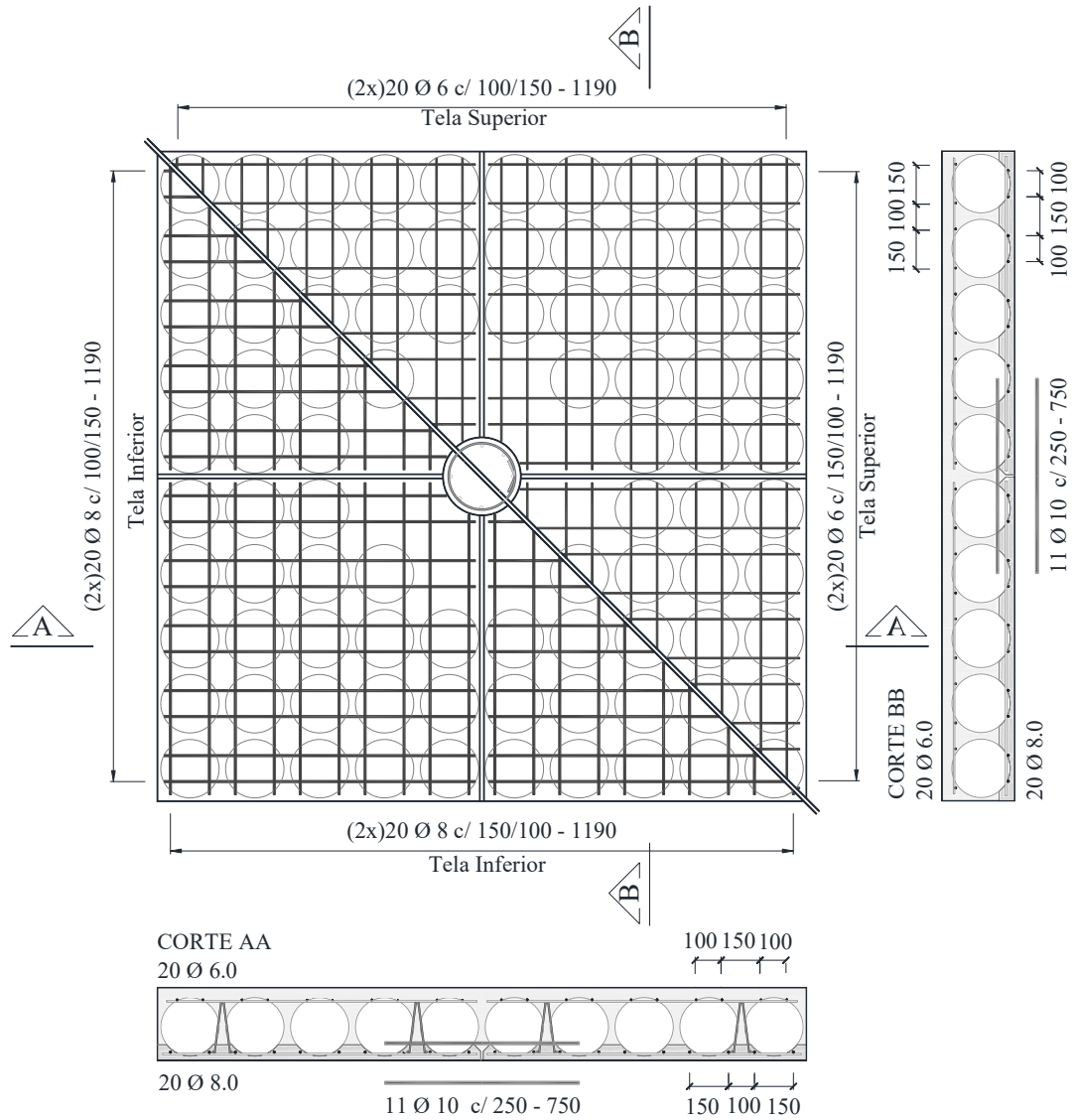
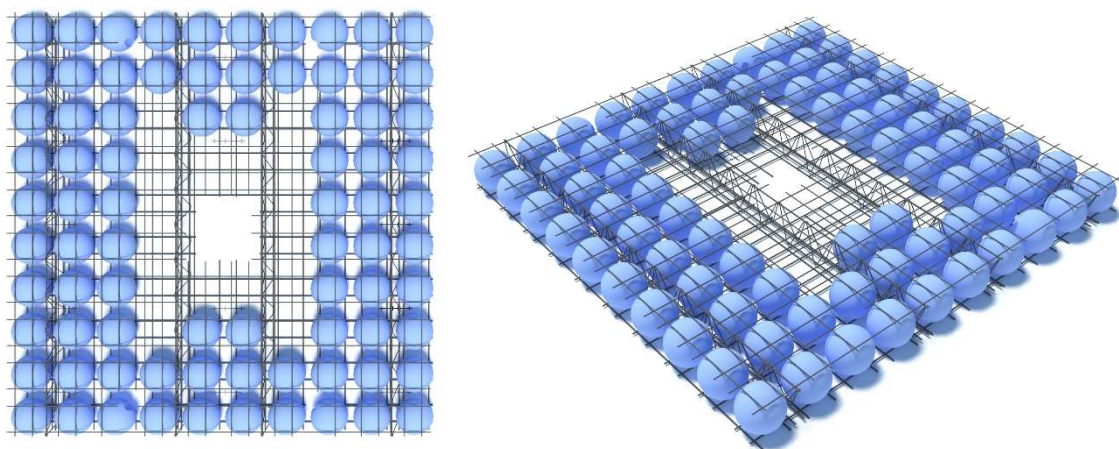


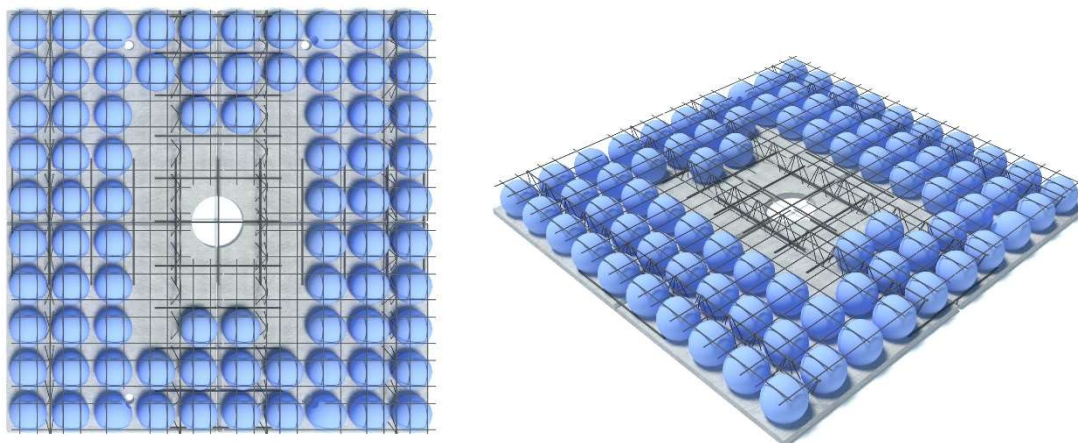
Figura 3.16 – Tela inferior e superior para lajes com pré laje



a) Vista em planta

b) Detalhe em perspectiva

Figura 3.17 – Representação tela inferior e superior para lajes sem pré laje



a) Vista em planta

b) Detalhe em perspectiva

Figura 3.18 – Representação da tela inferior e superior para lajes com pré laje

3.1.4. Armaduras de cisalhamento das lajes

Uma das variações construtivas das lajes BD são os módulos com pré-lajes, nesse sistema se torna vantajoso incorporar nos pré-moldados durante a concretagem as armaduras de cisalhamento, uma vez que facilita o trabalho em obra e agiliza o processo de montagem. Porém, para que estas armaduras não interfiram no armazenamento e transporte dos painéis acabados estas devem vir posicionadas entre as duas telas de aço que fixam as esferas. Neste processo a distribuição dos estribos pode ser colocado em apenas uma direção e o tramo superior dos estribos não é ancorado nas armaduras de flexão principal.

Com o objetivo de avaliar o comportamento das lajes com esta distribuição de estribos, armaduras em uma direção e sem ancoragem, foi moldada uma laje do Grupo 1 e duas do Grupo 2 com este sistema. A laje BD28-P3 do Grupo 1 consta com três camadas de estribos fechados com diâmetro de 6,3 mm, aço CA50 e espaçamento de 125 mm, ver detalhes na Figura 3.20. As lajes BD1 e BD2 do Grupo 2, possuem cinco camadas de estribos fechados de 8 mm de diâmetro espaçados a cada 125mm e dispostos em uma direção, ver Figura 3.21 e Figura 3.21 – Detalhe dos estribos da laje BD1

Nas demais lajes ensaiadas, as armaduras de cisalhamento foram compostas por cinco camadas de estribos de 8,0 mm de diâmetro, aço CA50, dispostos em cruz com espaçamento de 125 mm entre eles. Nas lajes do Grupo 4 executadas com pré-laje - SS2 e BD4 (Figura 3.24 e Figura 3.26) - o tramo inferior dos estribos era apoiado neste painel enquanto o tramo superior era ancorado na armadura de flexão superior, a ancoragem dos

estribos para estes casos foi caracterizada com “ancoragem parcial”. Para as lajes do Grupo 3– SS1, SS1 3ª Série e BD3 – (Figura 3.23, Figura 3.25 e Figura 3.26) - os estribos possuíam ancoragem tanto na armadura superior quanto inferior, sendo, portanto, caracterizada como “ancoragem total”. A Figura 3.19 apresenta um detalhe geral da forma de ancoragem conforme o descrito e na Tabela 3.2 estão apresentadas todas características das armaduras de cisalhamento.

Tabela 3.2 – Características das armaduras de cisalhamento

| Série | Laje | Tipo | Distribuição | Anco- ragem | s_0 (mm) | s_R (mm) | ϕ_w (mm) | nº camadas | A_{sw} / camada (mm ²) |
|----------|-----------------|---------|----------------------|----------------|---------------|---------------|------------------|---------------|--|
| 1ª Série | BD28 - P3 | Fechado | Uma direção | Não | 108 | 45 | 6,30 | 3 | 249 |
| 2ª Série | BD1 | Fechado | Uma direção | Não | 163 | 78 | 8,00 | 5 | 201 |
| | BD2 | Fechado | Uma direção | Não | 163 | 78 | 8,00 | 5 | 201 |
| | SS1 | Fechado | Cruz (2 direções) | Total | 100 | 125 | 8,00 | 5 | 402 |
| | SS2 | Fechado | Cruz (2 direções) | Parcial | 100 | 125 | 8,00 | 5 | 402 |
| 3ª Série | BD3 | Aberto | Cruz (2 direções) | Total | 100 | 125 | 8,00 | 5 | 402 |
| | BD4 | Aberto | Cruz (2 direções) | Parcial | 100 | 125 | 8,00 | 5 | 402 |
| | SS1 3ª Série | Fechado | Cruz (2 direções) | Total | 100 | 125 | 8,00 | 5 | 402 |

Sendo s_0 a distância entre o pilar e primeira linha de estribos, s_R o espaçamento entre estribos, ϕ_w o diâmetro dos estribos e A_{sw} a área de estribos por camada.

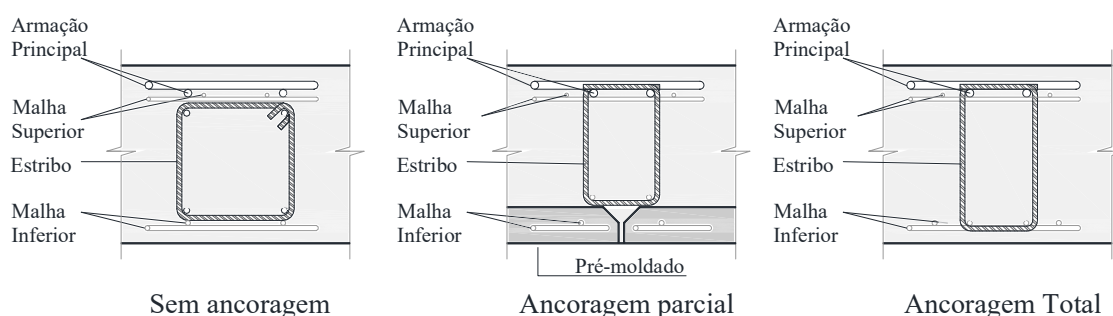


Figura 3.19 – Detalhe genérico da ancoragem das armaduras de cisalhamento – sem escala

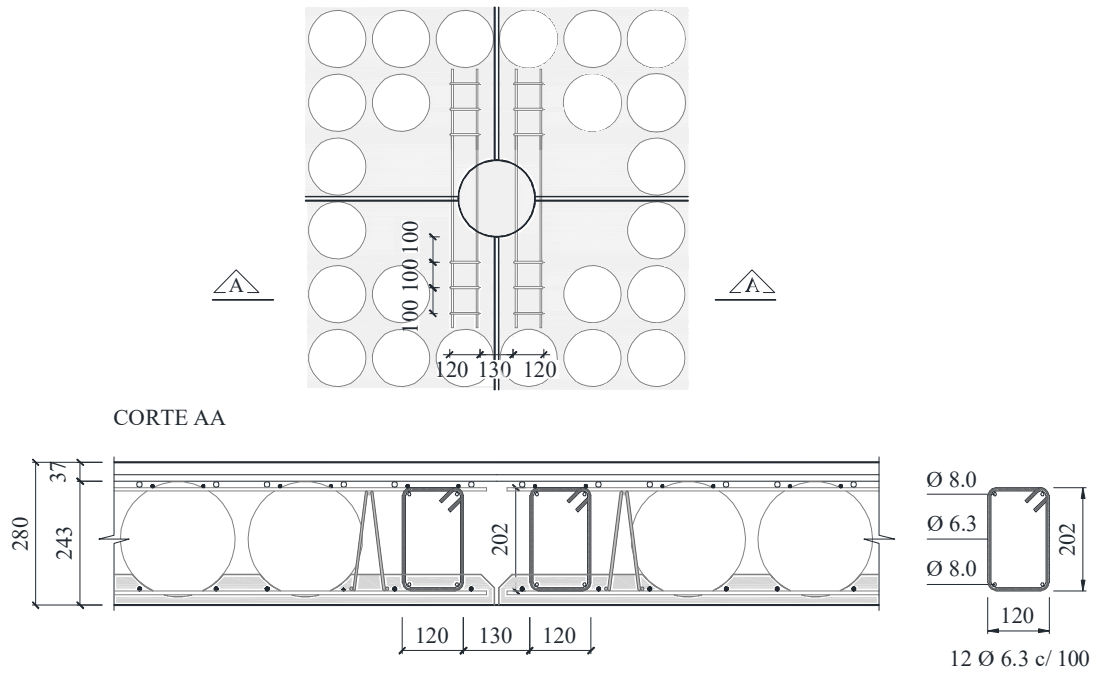


Figura 3.20 – Detalhe dos estribos da laje BD28-P3

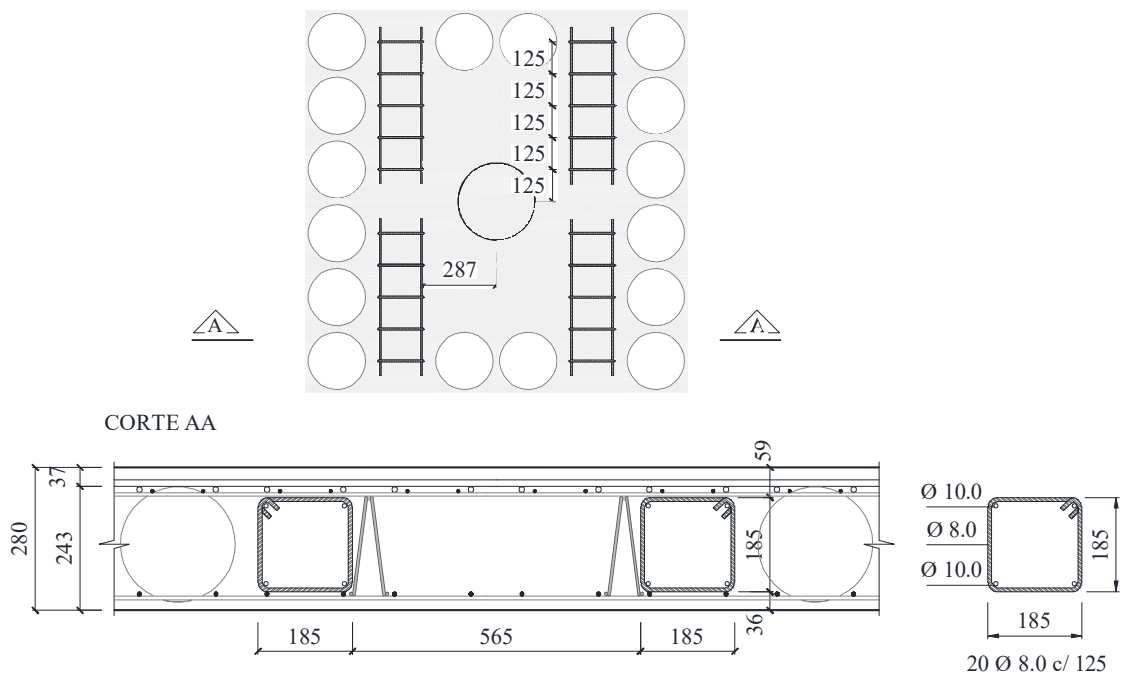


Figura 3.21 – Detalhe dos estribos da laje BD1

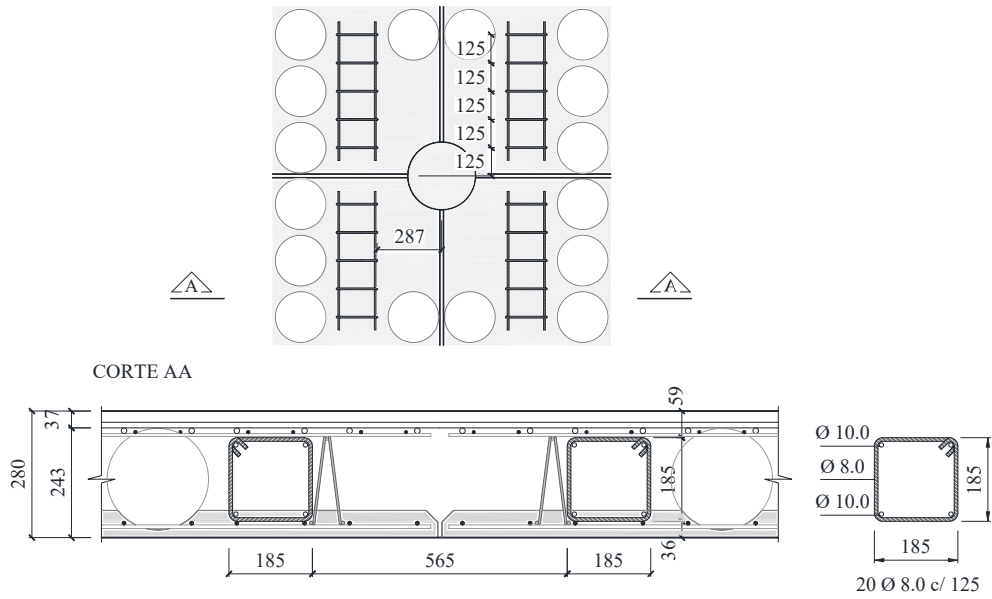


Figura 3.22 – Detalhe dos estribos da laje BD2

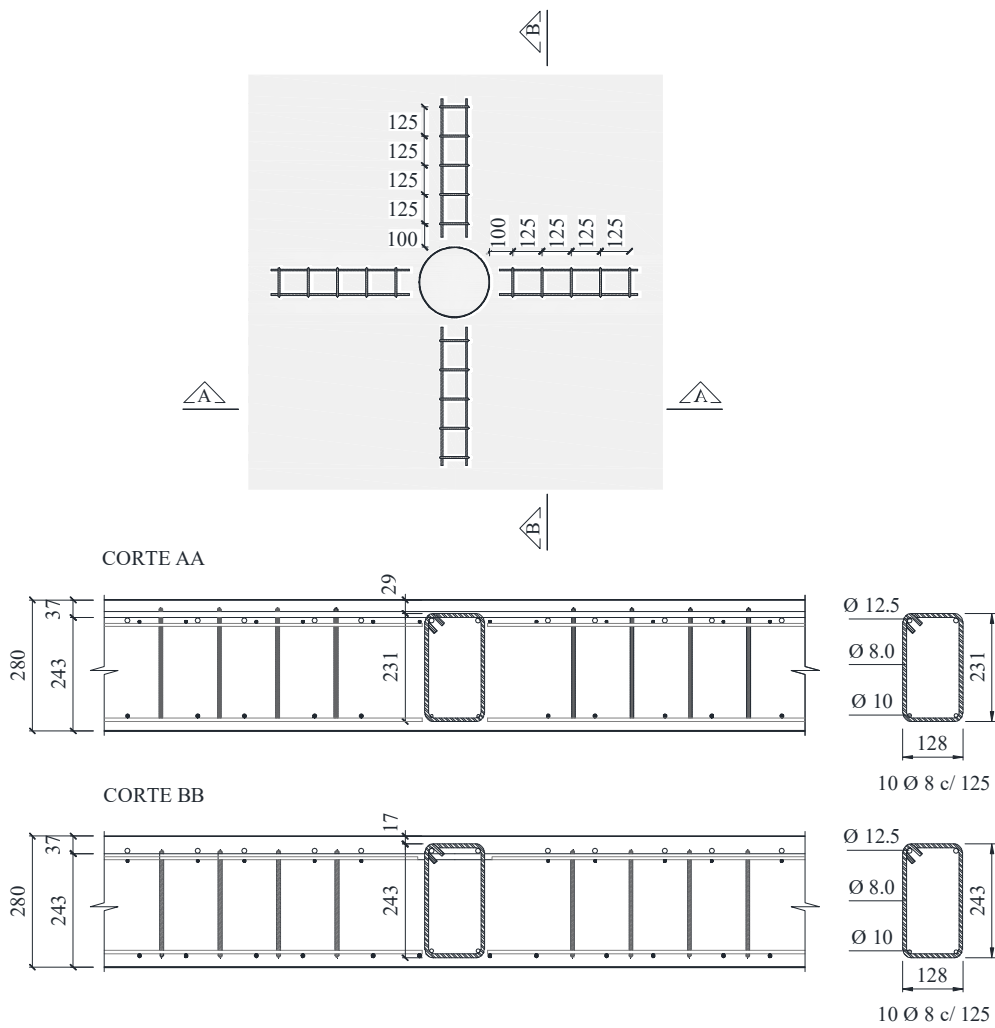


Figura 3.23 – Detalhe dos estribos da laje SS1

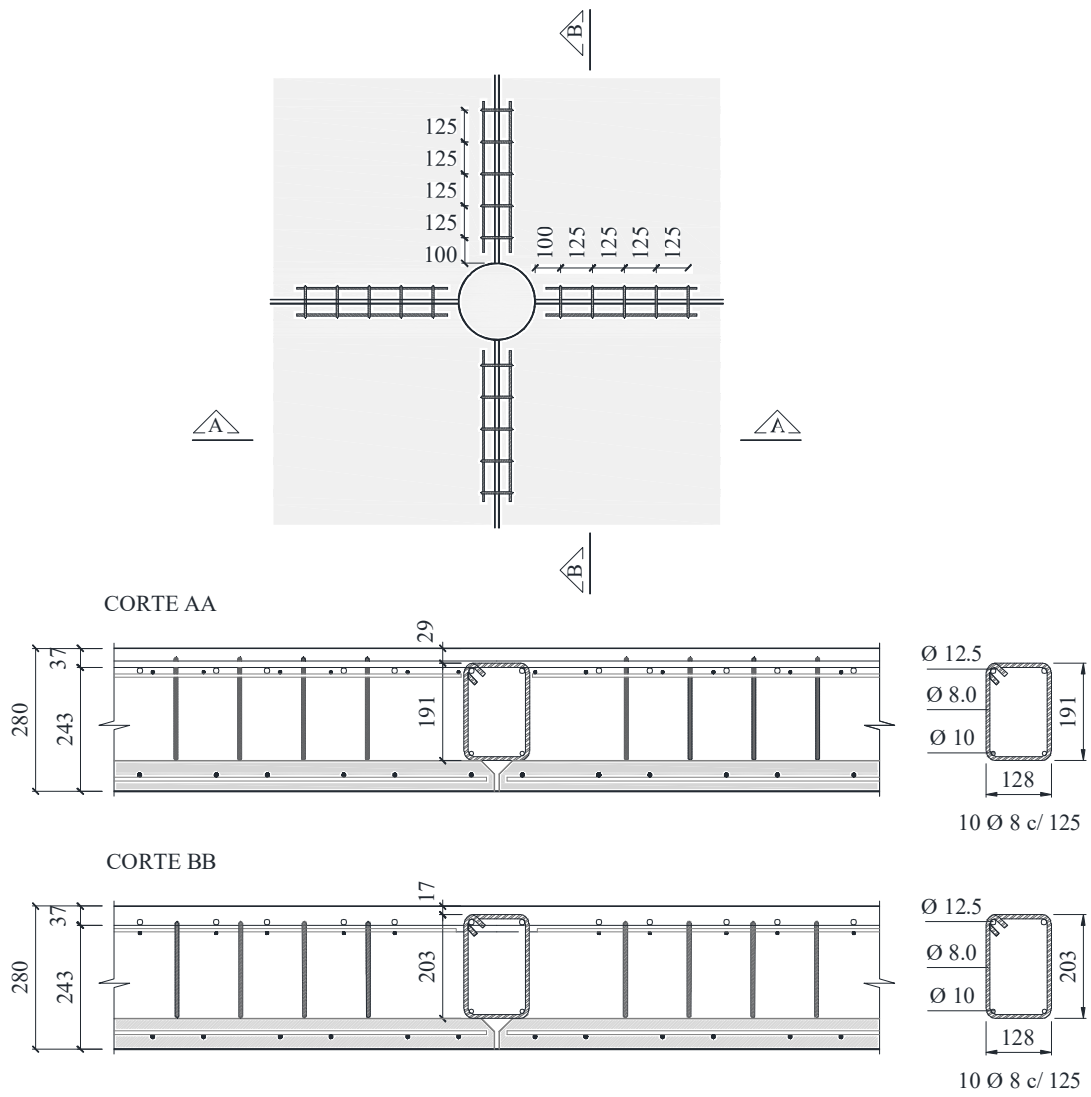


Figura 3.24 – Detalhe dos estribos da laje SS2

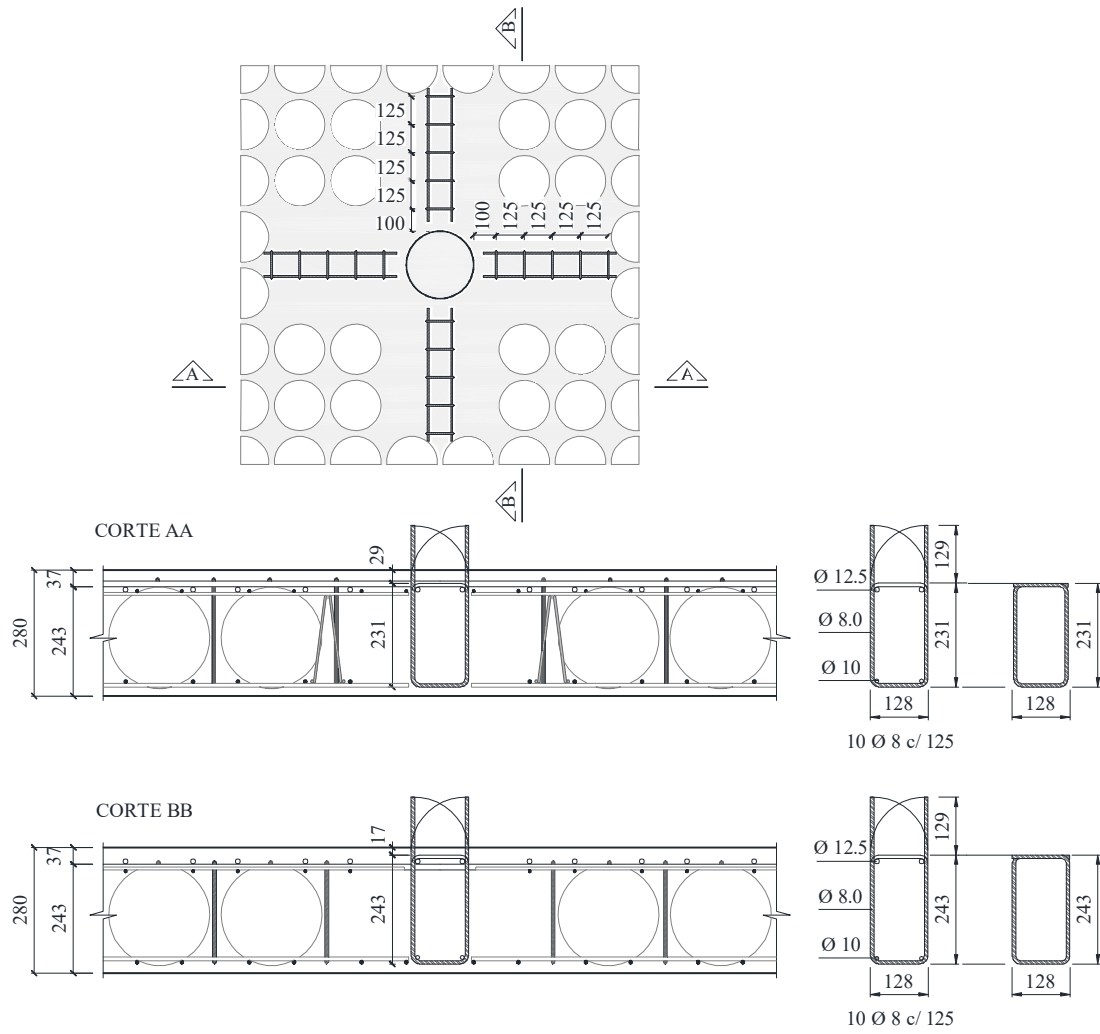


Figura 3.25 – Detalhe dos estribos da laje BD3

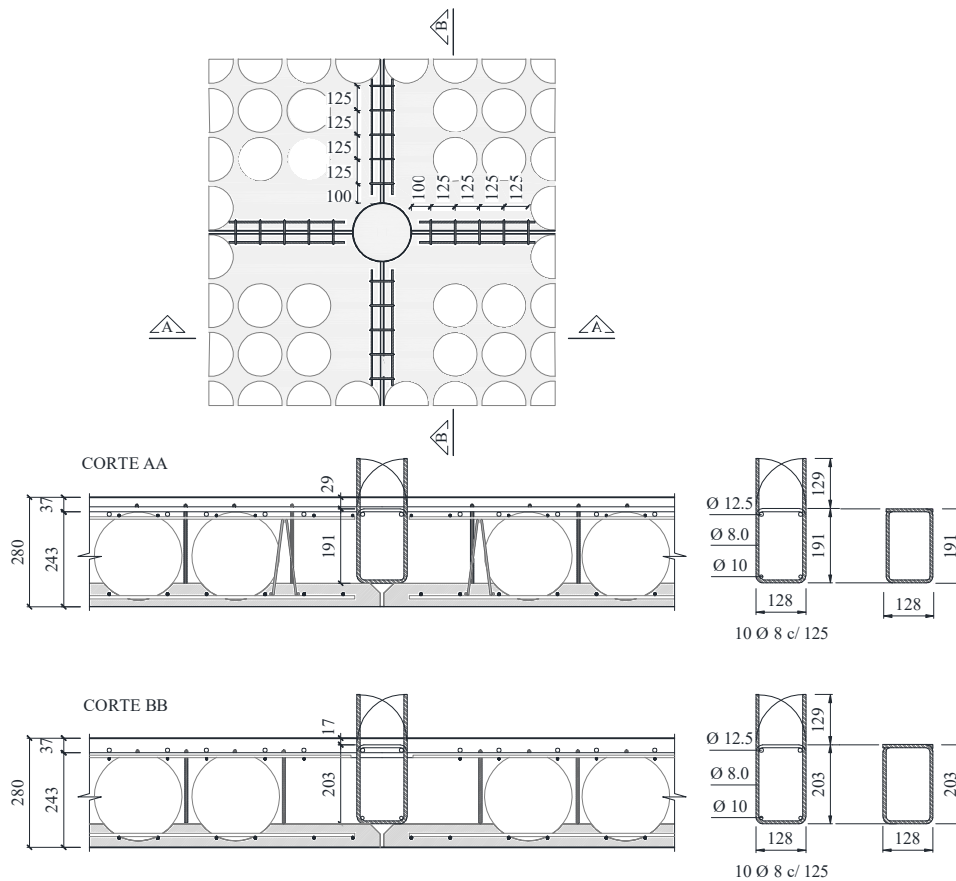


Figura 3.26 – Detalhe dos estribos da laje BD4

3.1.5. Armaduras dos pilares

Os pilares foram armados longitudinalmente com oito barras de aço CA50 de 12,5 mm de diâmetro, esta armação atende os limites normativos garantindo que não haja ruptura neste elemento. A armação transversal foi composta por 19 estribos de aço CA50 de 8,0 mm de diâmetro espaçados a cada 80mm. A Figura 3.27 detalha estas armaduras.

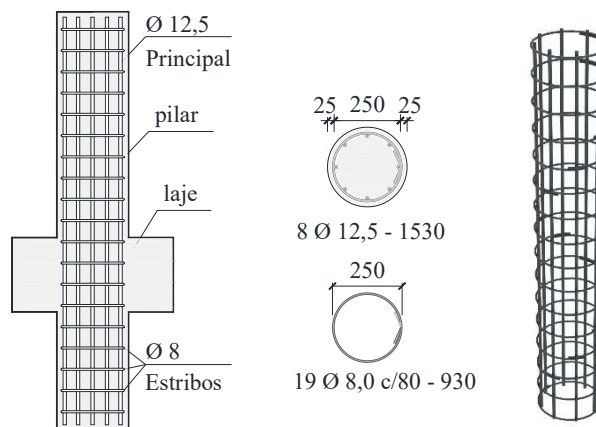


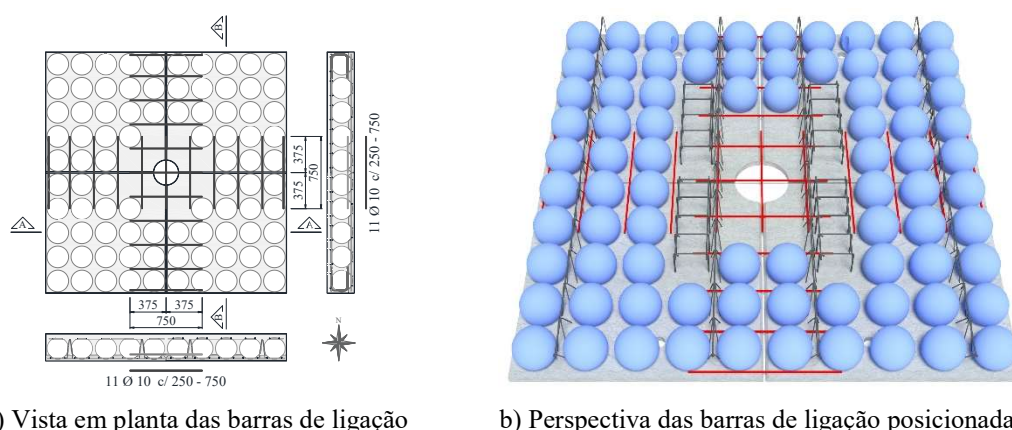
Figura 3.27 – Detalhamento das armaduras dos pilares

3.1.6. Elementos característicos do sistema *BubbleDeck*

Assim como as telas de aço, detalhadas no item 3.1.2, as lajes *BubbleDeck* possuem elementos intrínsecos ao seu processo construtivo cujas principais características são destacadas a seguir.

3.1.6.1. Barras de ligação entre painéis

No sistema *BubbleDeck* devem ser previstas armaduras de ligações entre os painéis pré-moldados. Para as lajes BD28-P3, BD2, SS2 e BD4 foram utilizadas barras de ligação retas com diâmetro de 10 mm, comprimento total de 750 mm e espaçamento de 250 mm. Na Figura 3.28 esta detalhada a distribuição em planta destas armaduras para todas as lajes *BubbleDeck* com pré-moldado.



a) Vista em planta das barras de ligação

b) Perspectiva das barras de ligação posicionadas

Figura 3.28 – Barras de ligação das pré-lajes

3.1.6.2. Treliças

Outro elemento intrínseco do sistema *BubbleDeck* são as treliças posicionadas entre as telas de fixação das esferas. Estes elementos são utilizados para o içamento dos painéis pré-moldados e servem como separador entre as duas telas, mantendo seu correto espaçamento. Outra importante função desta treliça é a rigidez que ela proporciona ao conjunto durante a concretagem, pois evita que a tela superior se deforme como resultado da flutuação das esferas causado pelo empuxo do concreto.

A treliça utilizada para os ensaios foi uma peça comercial, modelo TG20L, fornecida pela empresa Gerdau S.A. com comprimentos de 12m, esta peça tem senóide dupla fabricada com barras 4,2 diâmetro de mm nas diagonais e reforço de barras de 5,0 mm de diâmetro nos banzos inferiores e uma barra de 7,1 mm de reforço para o banzo superior, o

espaçamento entre os picos da senóide é de 204 mm na horizontal e altura total é de 200 mm, ver detalhes na Figura 3.29

Para lajes *BubbleDeck* sem pré-laje foram utilizadas quatro treliças com comprimento de 2450 mm, ver Figura 3.30a, nas demais lajes *BubbleDeck* foram utilizadas oito treliças com comprimento total de 1190 mm, ver Figura 3.30b. Para as lajes maciças, foram utilizados 12 segmentos com comprimento de 204 mm como apoio para armaduras de flexão negativa.

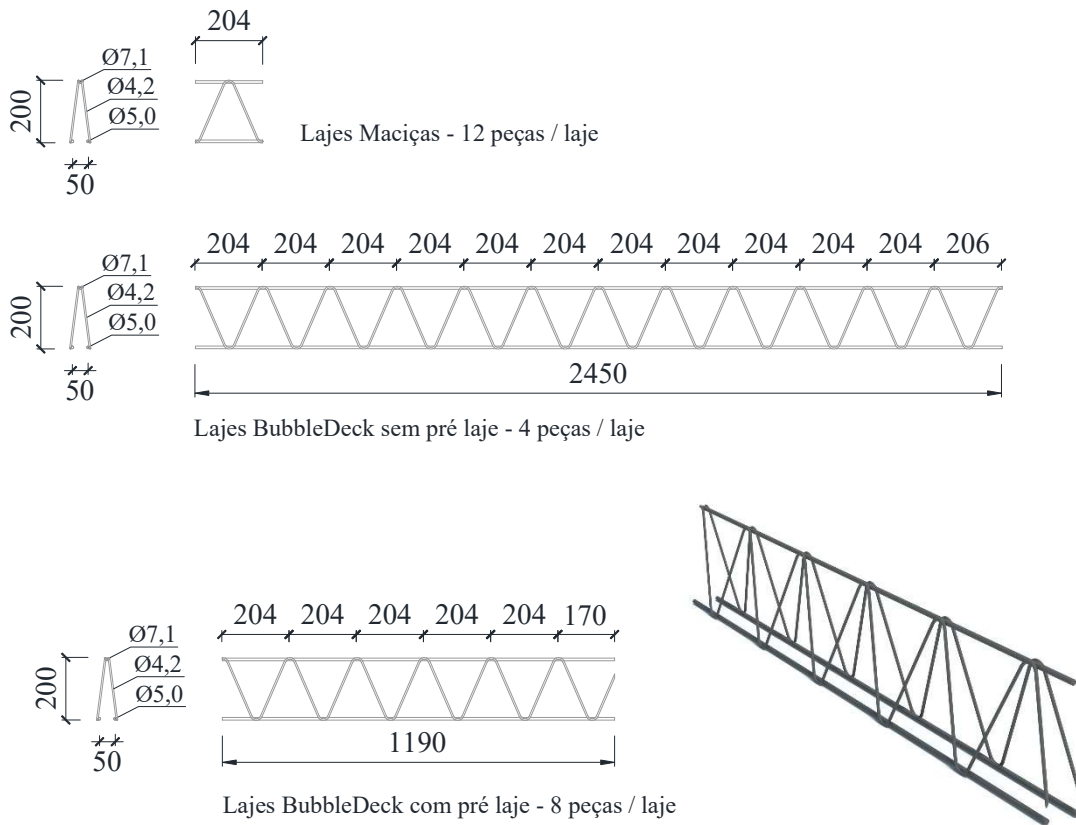
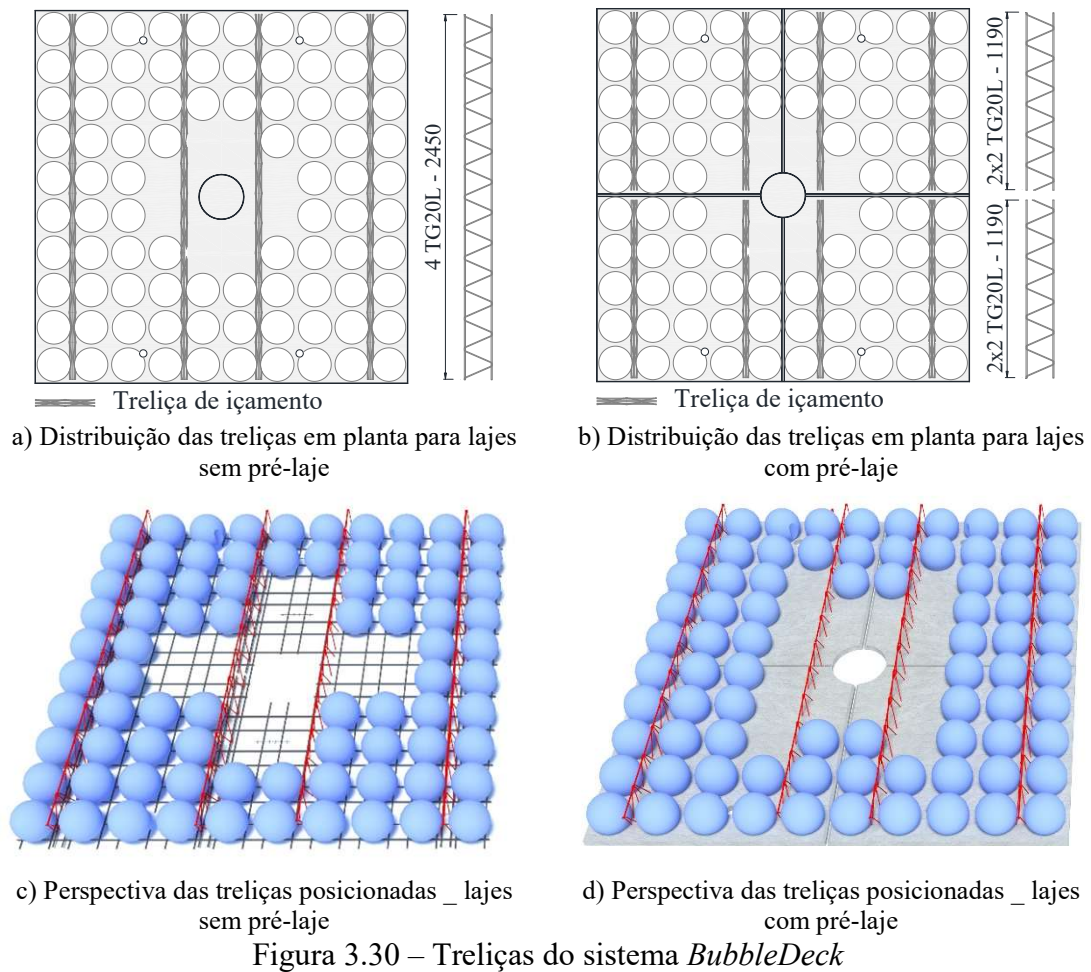


Figura 3.29 – Treliças do sistema *BubbleDeck*



3.1.6.3. Esferas *BubbleDeck*

As esferas do sistema *BubbleDeck* são ocas, têm formato esférico e são confeccionadas com polietilenos de alta densidade (PEAD), que não é poroso e não reage quimicamente com o concreto ou barras de aço. As esferas suportam até 90 kg e têm rigidez suficiente para resistir com segurança as cargas aplicadas nas fases construtivas.

Nesta pesquisa foram utilizadas esferas de 225 mm de diâmetro com espessura que varia entre três e quatro milímetros (Figura 3.31). Sua aplicação é indicada para lajes de 280 mm de altura.

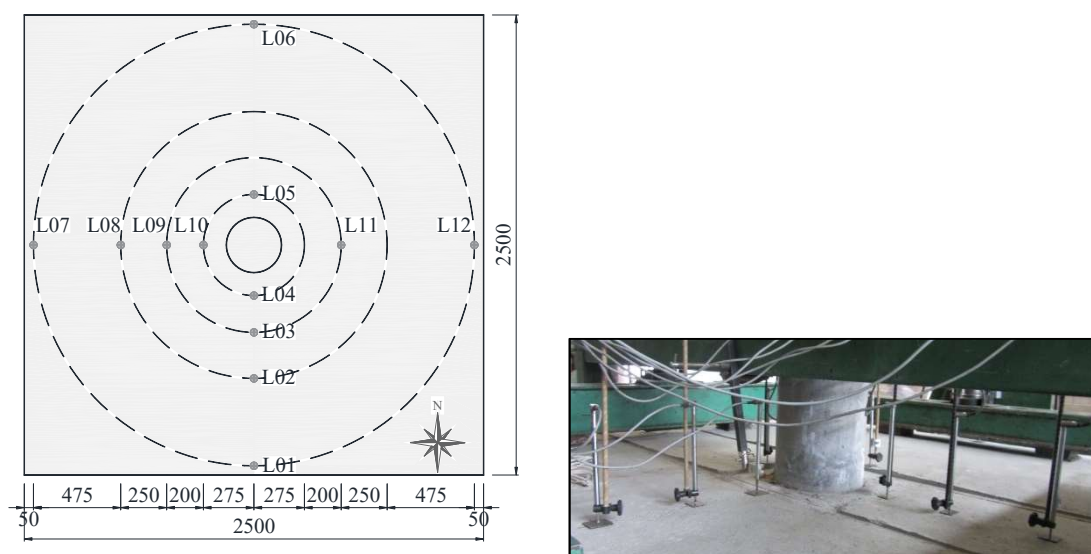


Figura 3.31 – Esferas *BubbleDeck*

3.2. INSTRUMENTAÇÃO

3.2.1. Deslocamentos verticais

Para medir os deslocamentos das lajes foram utilizados 12 LVDT's (*Linear Variable Differential Transformer*), modelo WA50 da marca HBM, distribuídos na face superior das lajes, conforme mostra a Figura 3.32a. Os equipamentos foram apoiados em um suporte metálico independente do sistema de ensaio, conforme representado na Figura 3.32b.



a) Posição dos LVDT's nas lajes – vista em planta b) Vista Sudoeste dos LVDT's fixos na laje.

Figura 3.32 – Posição dos LVDT's nas lajes – vista em planta

3.2.2. Deformações nas armaduras de flexão

A medição da deformação específica nas barras de flexão principal foi feita com extensômetros elétricos de resistência (EER), modelo KFG-5-120-C1-11, resistência $120,2 \pm 0,2\Omega$ da marca *Kyowa Eletronics*. Em cada ponto de instrumentação foram instalados nas barras de aço dois extensômetros diametralmente opostos. A leitura de deformação apresentada para cada ponto foi tomada pela média dos registros nos pares de extensômetros. Durante a concretagem a barra era posicionada de forma a manter na mesma altura os extensômetros de um mesmo ponto, de modo a minimizar os efeitos de flexão localizada das barras.

Nas lajes da 1ª Série as deformações nas armaduras de flexão foram monitoradas em cinco pontos distintos na malha superior da armadura principal, direção Leste-Oeste, e 3 pontos

na malha inferior da armadura principal, direção Sul-Norte, totalizando oito pontos de leitura, ver esquema na Figura 3.33a. Para as lajes da Série 2 e 3, foram monitorados apenas seis pontos na malha superior na direção Leste-Oeste, quadrante Norte da laje, ver Figura 3.33b.

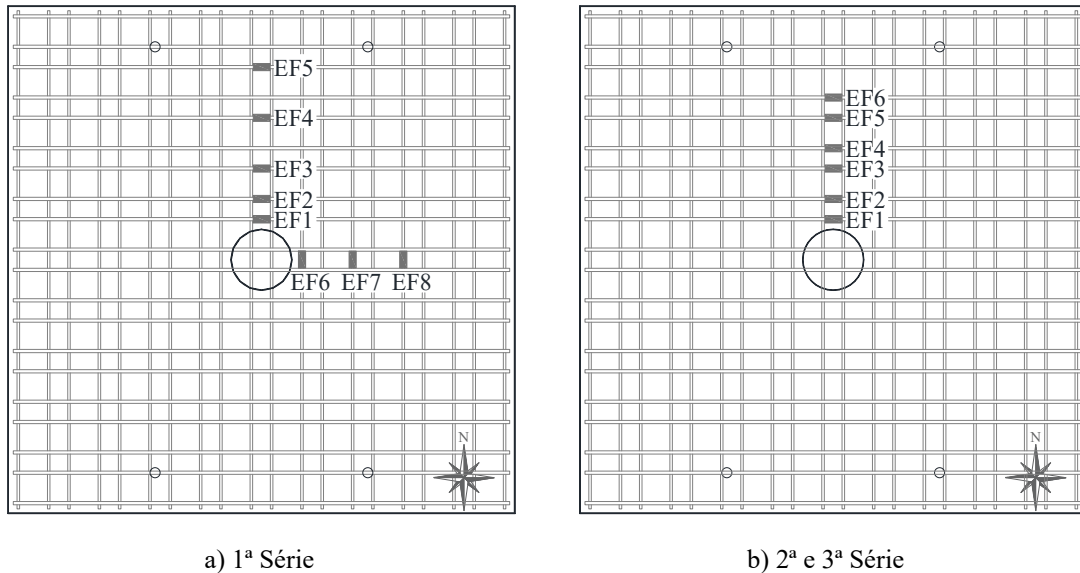


Figura 3.33 – Posição dos extensômetros das armaduras de flexão (EF) – vista em planta

O procedimento de colagem dos extensômetros consistiu basicamente na preparação da superfície (limagem e lixamento), colagem do extensômetro (limpeza, colagem e fixação dos cabos) e por fim a proteção mecânica dos mesmos, através da aplicação de adesivo epóxi, silicone e fita isolante de autofusão. Na Figura 3.33 é possível ver todo procedimento de colagem que foi utilizado nas barras de flexão e estribos e na Figura 3.35 se visualiza as barras instrumentadas na laje.

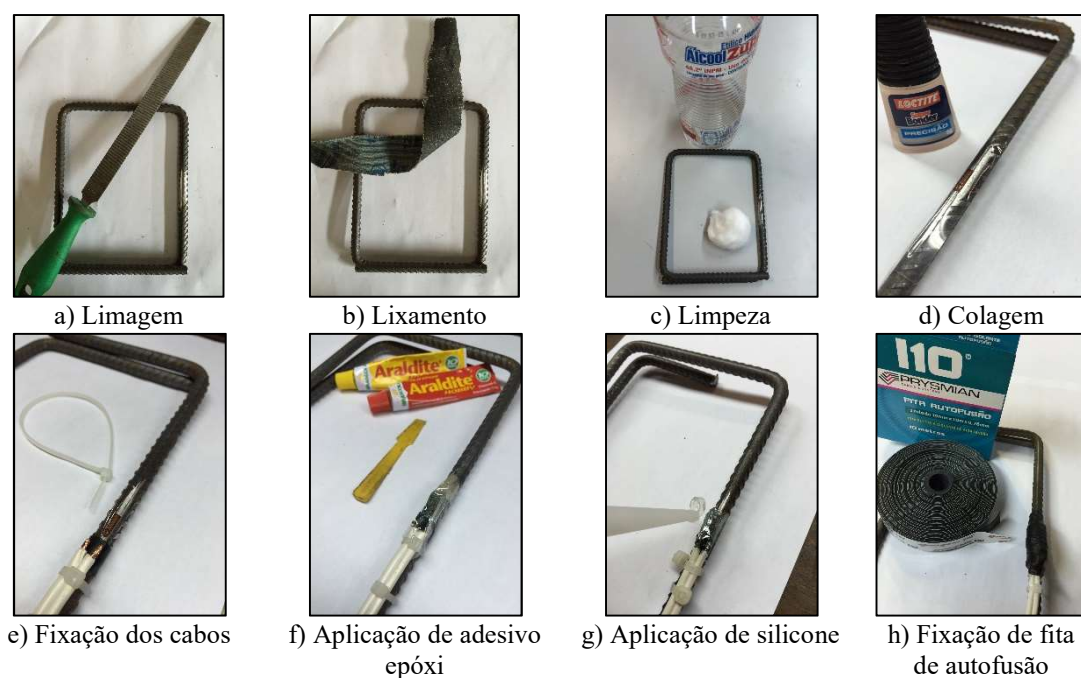


Figura 3.34 – Processo de colagem dos extensômetros



Figura 3.35 – Barras instrumentadas

3.2.3. Deformações nas armaduras de cisalhamento

A medição da deformação específica nos estribos foi feita com extensômetros elétricos de resistência (EER), modelo KGF-5-120-C1-11, resistência $120,2 \pm 0,2\Omega$ da marca *Kyowa Eletronics*. Em cada ponto de instrumentação foi instalado no estribo um extensômetro, posicionado no ponto médio de seu ramo. Para cada laje foram monitorados seis pontos, conforme distribuição vista na Figura 3.36.

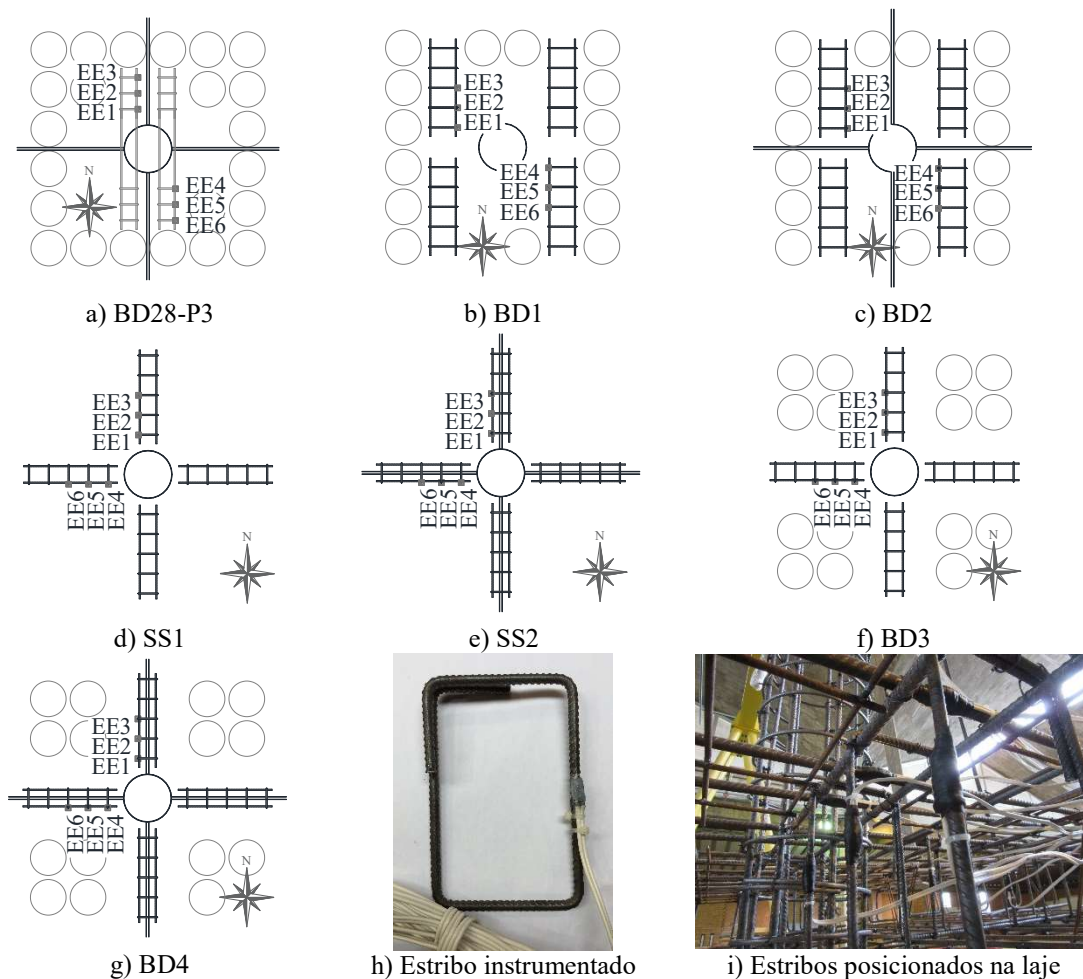


Figura 3.36 – Posição dos extensômetros dos estribos (EE) – vista em planta

3.2.4. Deformações no concreto

As deformações específicas no concreto foram medidas com extensômetros posicionados na face inferior da laje na região adjacente ao pilar. Os extensômetros utilizados foram da marca *Kyowa Eletronics* modelo KC-70-120-A1-11, foram posicionados dois para registrar as deformações radiais e dois para registrar as deformações tangenciais no concreto.

As posições dos extensômetros instalados na superfície inferior da laje estão detalhados na Figura 3.37. A variação destas posições está relacionada às dificuldades de instalação geradas por interferências do acabamento final das lajes, em especial aquelas com pré-moldado, ver Figura 3.38. Estas modificações não invalidam os resultados, uma vez que o carregamento das lajes é simétrico e todos os quadrantes devem apresentar leituras similares.

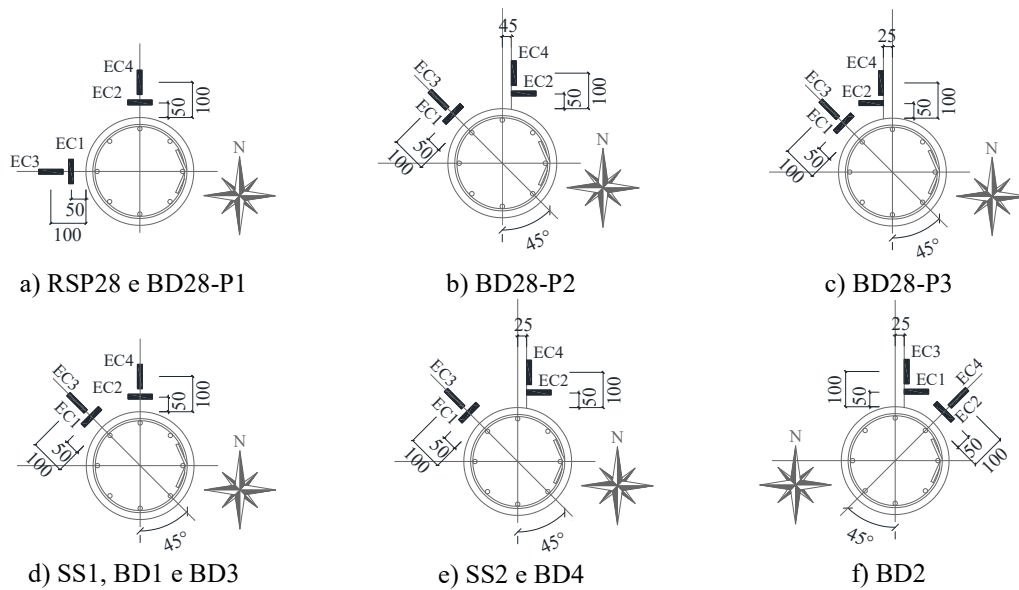


Figura 3.37 – Posicionamentos dos extensômetros do concreto.



a) Extensômetros da laje BD2



b) Acabamento da face inferior da laje SS2

Figura 3.38 – Extensômetros do concreto colados

3.3. PROCESSO CONSTRUTIVO DOS MODELOS

O sistema construtivo dos modelos em laboratório pode ser dividido em três grandes etapas, (a) Preparação das formas das pré-lajes, armação dos módulos e concretagem das pré-lajes, (b) Preparação das formas, armação dos módulos sem pré-laje, armação complementar de todas as lajes e (c) Concretagem final dos modelos.

Na primeira etapa, as treliças são fixas na tela inferior, posteriormente as esferas são posicionadas e a tela superior é presa, confinando as esferas e garantindo seu correto espaçamento. Com os módulos prontos, as pré-lajes são posicionadas para concretagem. Nesta etapa, o módulo deve ser inserido na forma após o lançamento do concreto, e para evitar sua flutuação, devem ser colocados pesos em sua parte superior. Após o processo de cura das pré-lajes, estas devem ser posicionadas nas formas para finalização da armação.

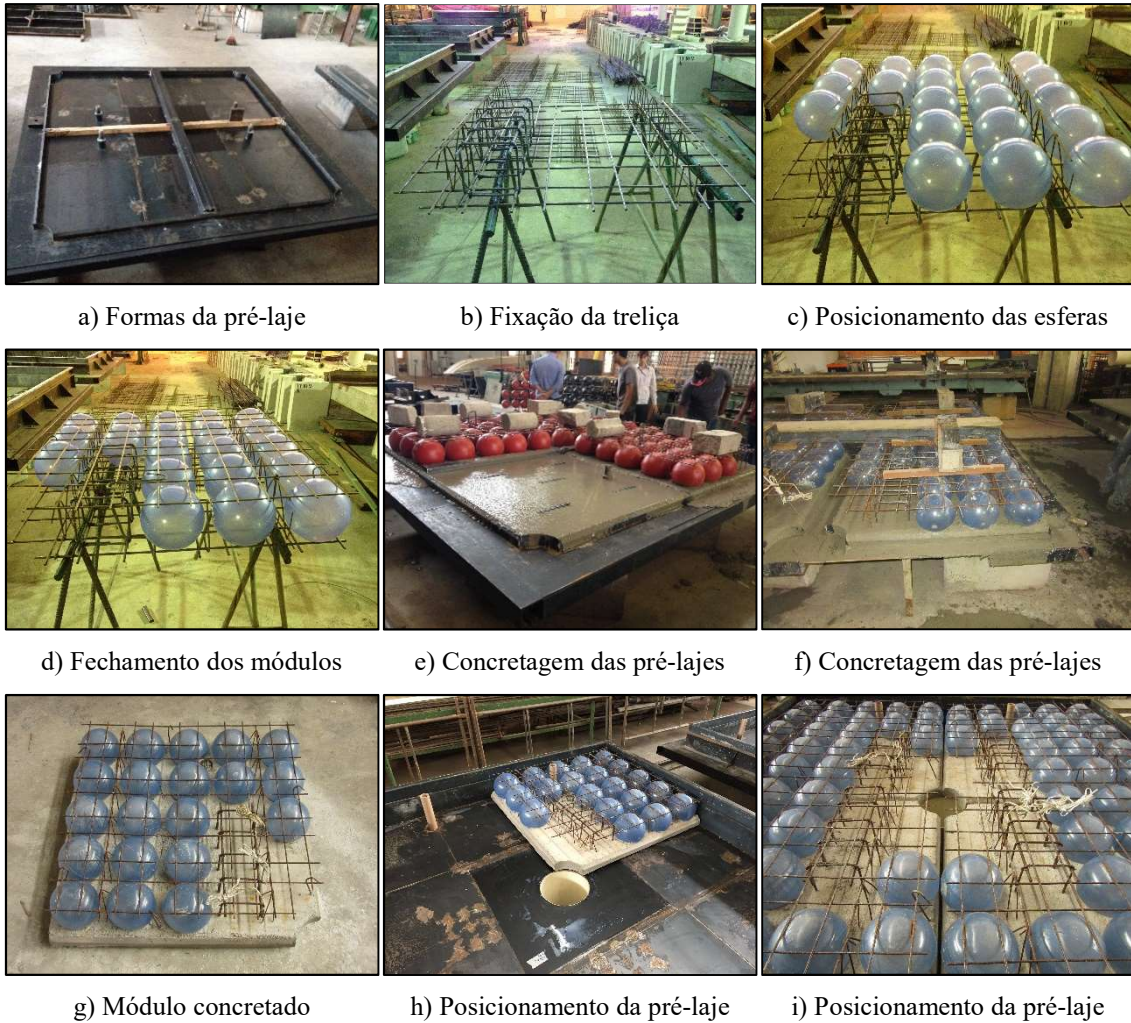


Figura 3.39 – Primeira etapa do sistema construtivo

Na segunda etapa do processo, os módulos, com e sem pré-laje, são posicionados nas formas metálicas para execução das armações de flexão principal, ganchos de ancoragem, barras de ligação e pilar, conforme representado na Figura 3.40. Nesta etapa, as formas dos pilares são confeccionadas com tubos de PVC de 300 mm de diâmetro, fixos externamente por uma forma metálica quadrada, ver Figura 3.40b.

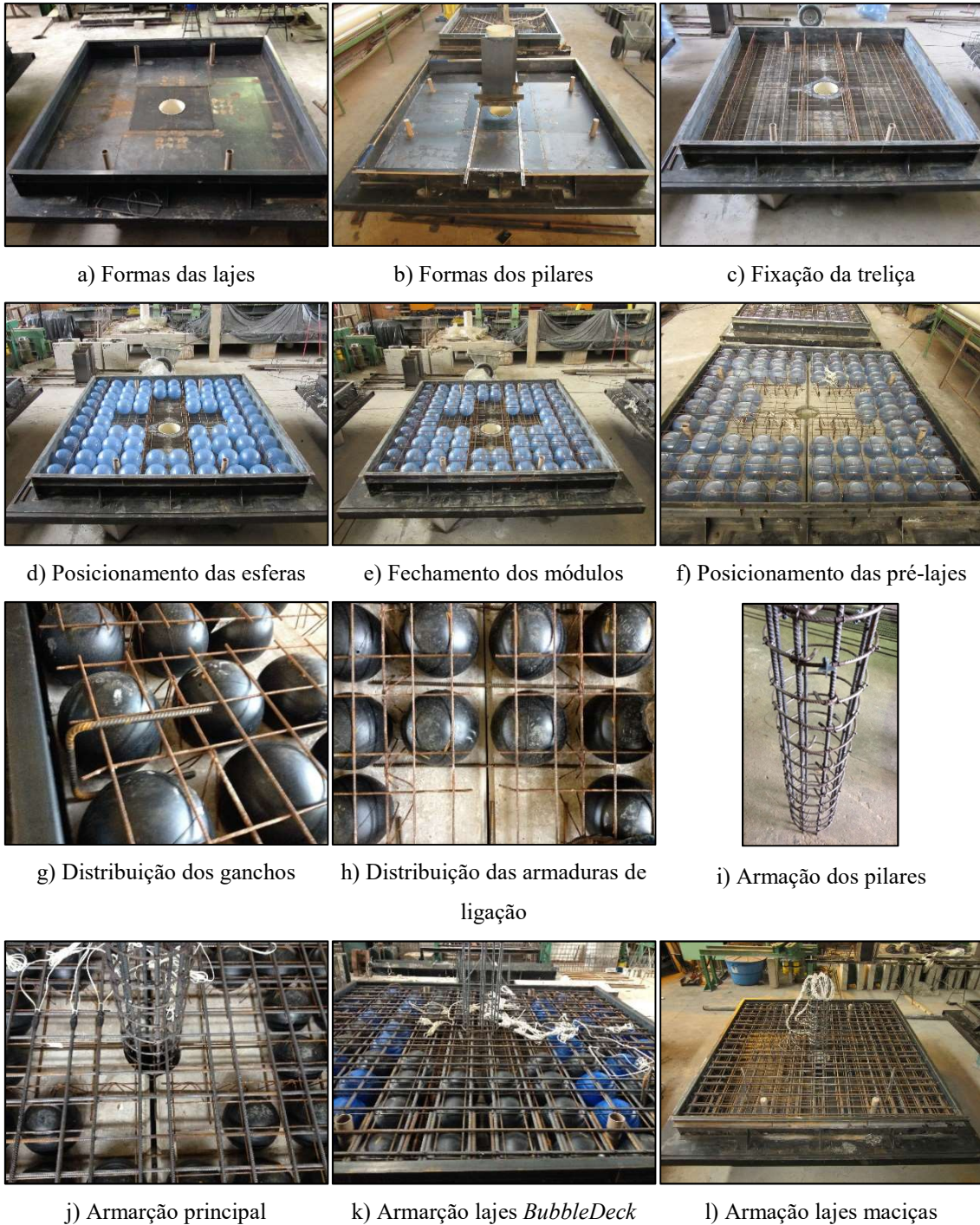


Figura 3.40 – Segunda etapa do sistema construtivo

A última etapa do processo consiste na concretagem final dos modelos, que por sua vez deve ser realizada em duas fases para as lajes *BubbleDeck* sem pré-laje, este procedimento é utilizado para evitar a flutuação dos módulos. Na primeira fase, deve ser lançado uma camada de concreto de aproximadamente 60mm de espessura. Na segunda fase, após perda de fluidez do concreto da primeira fase, o restante do volume de concreto é lançado. Nas lajes *BubbleDeck* com pré-laje o concreto pode ser lançado em uma única camada,

uma vez que a pré-laje evita que as esferas flutuem. Após a concretagem, as lajes são submetidas ao procedimento de cura. Estas são cobertas por mantas de algodão e molhadas de 4 a 5 vezes por dia durante uma semana e posteriormente são cobertas por uma lona, minimizando a evaporação da água.



a) Lajes prontas para concretagem b) Moldagem dos corpos de prova c) Lançamento da primeira camada de concreto



d) Concretagem final e) Concretagem do tramo superior do pilar f) Acabamento da laje



g) Lajes Concretadas h) Cura com mantas úmidas i) Cobertura após molhagem

Figura 3.41 – Terceira etapa do sistema construtivo

3.4. ENSAIOS DE MATERIAIS

3.4.1. Concreto

As lajes foram moldadas com concreto usinado auto-adensável, confeccionado para atingir aos 28 dias uma resistência à compressão característica de 30 MPa, o traço utilizado para esse concreto está descrito na Tabela 3.3. Para determinação das propriedades mecânicas do concreto utilizado nas lajes foram realizados ensaios de

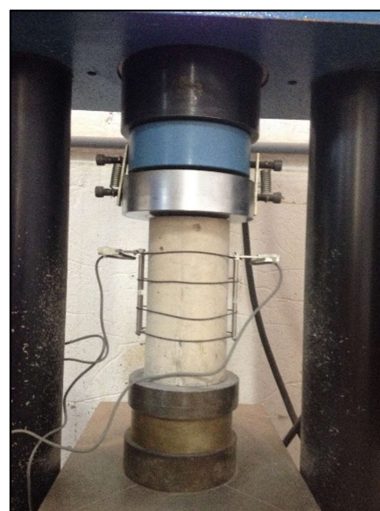
resistência à compressão simples de acordo com a ABNT NBR 5739 (2007), resistência à tração por compressão diametral de acordo com ABNT NBR 7222 (2011) e o módulo estático de elasticidade à compressão de acordo com a ABNT NBR 8522 (2008). Estes ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos, de dimensões 100 mm x 200 mm, previamente retificados com disco de corte, ver Figura 3.42.

Tabela 3.3 – Quantitativos para produção de 1 m³ de concreto

| Item | Quantidade |
|--|------------|
| Cimento – CP V ARI | 352 kg |
| Areia Natural Quartzosa | 416 kg |
| Areia Artificial | 431 kg |
| Brita 0 – Diâmetro máximo de 9,5 mm | 917 kg |
| Água | 193 L |
| Sílica Ativa | 15 kg |
| Aditivo Polifuncional Muraplast FK110 | 1,68 L |
| Aditivo Superplastificante Power Flow 1180 | 3,75 L |



a) Ensaio à tração



b) Ensaio à compressão e Módulo de Elasticidade

Figura 3.42 – Ensaio realizados nos corpos de prova de concreto

3.4.2. Aço

Para cada diâmetro utilizado na confecção das armaduras das lajes foram ensaiadas três amostras de corpo de prova por série de ensaio, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6892 (2013). Para as telas eletrossoldadas, aço CA60, foram confeccionados corpos de prova a partir da retirada de um segmento de barra da tela. Para as demais armaduras, com aço CA50, foram separados corpos de prova com 500 mm de

comprimento e seções transversais de $\varnothing 6,3$ mm (estribos), $\varnothing 8,0$ mm (estribos), $\varnothing 10,0$ mm (barras de ligação) e $\varnothing 12,5$ mm (barras de flexão e ancoragem).

Todos ensaios foram realizados na prensa Emic modelo DL 30000, com capacidade de 300 kN, localizada no Laboratório de Ensaio de Materiais da UnB, utilizando o extensômetro eletrônico Emic modelo EE09 que é indicado para as medições de deformação em materiais de médio alongamento.

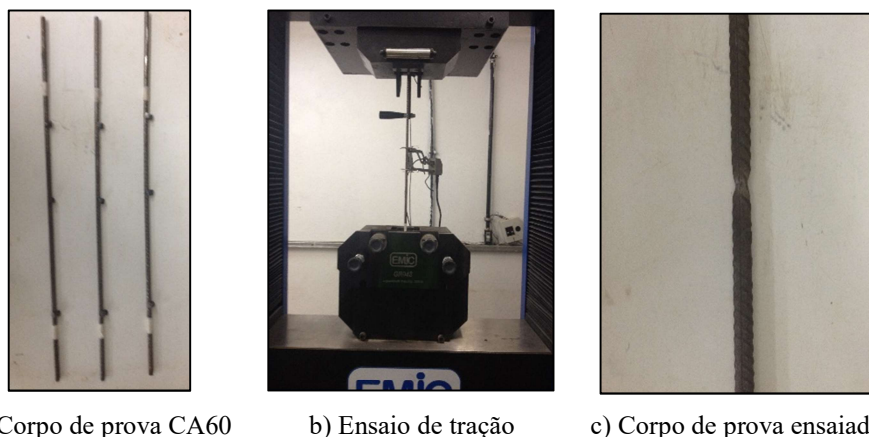


Figura 3.43 – Ensaios realizados nos corpos de prova de aço

3.5. SISTEMA DE ENSAIO

Para esta pesquisa foi adotado o sistema de ensaio disponível no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília. Este sistema funcionou de forma satisfatória segundo pesquisas avaliadas [FERREIRA (2010); OLIVEIRA (2013); SANTOS (2014)] e como vantagens ao adotá-lo se destaca a possibilidade de utilização sem adaptações ao pórtico ou as dimensões em planta dos modelos.

Todos os ensaios foram realizados em um pórtico metálico montado sobre uma laje de reação e os dados de deformações, deslocamentos e carregamentos aplicados foram lidos por um sistema de aquisição de dados *Spider 8*, em conjunto com o *software Catman*. As leituras eram acionadas manualmente a cada passo de carga.

No pórtico, quatro atuadores hidráulicos de marca Enerpac eram acionados por duas bombas elétricas e aplicaram o carregamento, no sentido de cima para baixo, em quatro vigas metálicas rígidas que distribuíam o carregamento em duas chapas de aço por viga, totalizando oito pontos de aplicação equidistantes do centro do pilar, conforme esquema da Figura 3.44. O carregamento foi aplicado de forma simétrica com passos de carga de

5 kN por atuador, totalizando 20 kN, até o nível de carga 300 kN, após este nível as cargas eram aplicadas com 10 kN por atuador (40 kN no total) até a ruptura, ver sistema de ensaio na Figura 3.47.

Na 1ª Série, o monitoramento da aplicação do carregamento foi realizado com células de carga Kratos, com capacidade de 1000 kN, alinhada a cada atuador hidráulico. As leituras realizadas para cada passo de carga foram realizadas com um conjunto de indicadores digitais, marca Kratos, com capacidade de 1000 kN, ver Figura 3.45b.

Antes dos ensaios, todos equipamentos foram devidamente testados. Porém, para as lajes da 1ª Série, uma célula de carga Kratos que estava posicionada na direção Leste apresentou mau funcionamento que não foi previamente detectado. O problema se deu pelo indicador digital correspondente a esta célula apresentar valores de carga na mesma ordem de grandeza das outras células. No entanto, constatamos que a carga real era superior à mostrada no indicador digital, nos levando assim a aplicar mais carga na direção Leste. No decorrer do texto são realizadas ressalvas ao se analisar os resultados das lajes da 1ª Série e no Capítulo 5 é discutida uma solução para o problema apresentado.

Para os demais ensaios realizados foram feitas adaptações nas dimensões dos pilares, de forma a permitir o uso de células de carga e indicadores da marca HBM, ver Figura 3.45c. No total foram utilizadas quatro células, posicionadas abaixo do êmbolo dos atuadores hidráulico e acima das rótulas metálicas, ver esquema de posicionamento da célula na Figura 3.45a. Esta solução permitiu colher de forma confiável os valores de carga aplicadas nos modelos restantes.

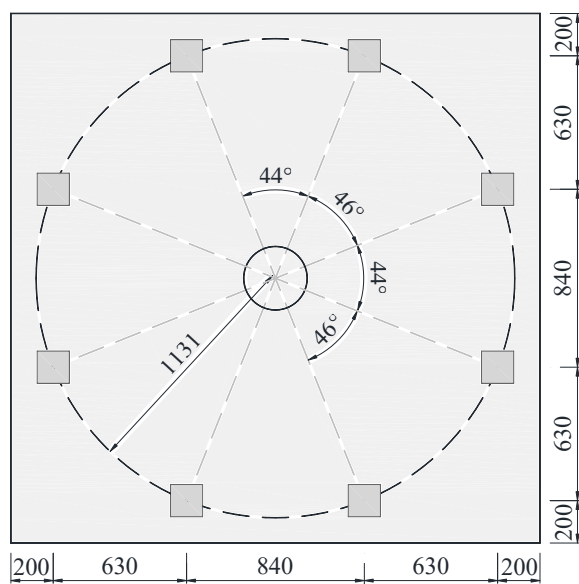


Figura 3.44 – Pontos de carregamento das lajes



a) Detalhe da célula de carga e atuador hidráulico

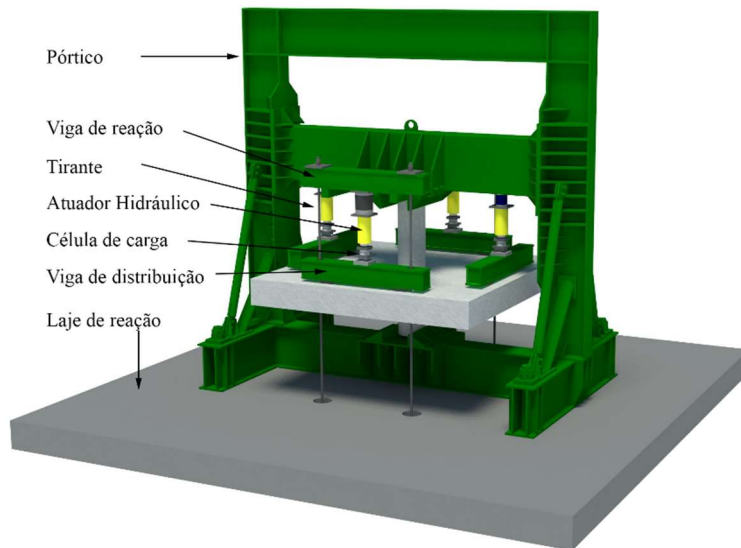


b) Indicadores digitais Kratos

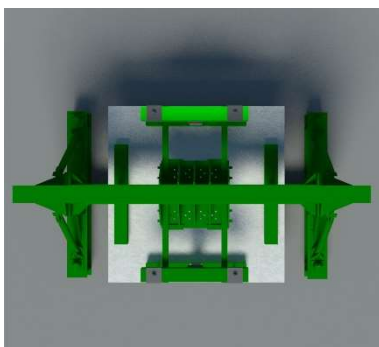


c) Indicadores digitais HBM

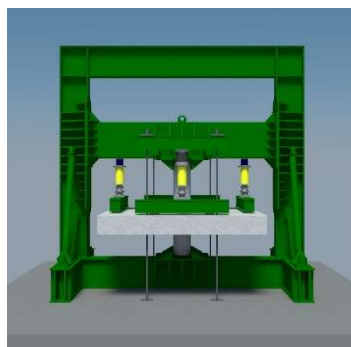
Figura 3.45 – Equipamentos



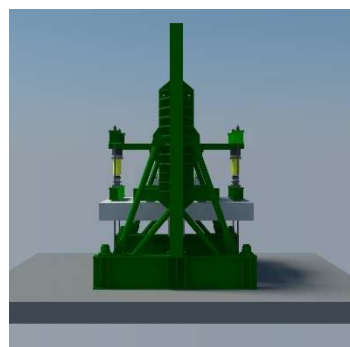
a) Sistema de ensaio 3D



b) Vista Superior



c) Vista Frontal



d) Vista Lateral

Figura 3.46 – Esquema 3D de ensaio



a) Vista Sudeste



b) Vista Frontal (Sul)



b) Vista Lateral (Leste)

Figura 3.47 – Esquema de ensaio

3.6. RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS LAJES

Para a determinação da resistência a flexão das lajes (V_{flex}), foi utilizada a teoria das linhas de rupturas expressa em uma formulação analítica usada por Guandalini *et al* (2009), conforme Equação 3.1 e Equação 3.2. Os resultados dos cálculos de V_{flex} estão representados na Tabela 3.4. O mecanismo de colapso está representado na Figura 3.48 e foi adotado com base nas observações experimentais por representar de forma adequada o comportamento das lajes na ruptura.

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

$$m_u = \rho \cdot f_y \cdot d^2 \cdot \left[1 - 0,59 \cdot \left(\rho \cdot \frac{f_y}{f_c} \right) \right] \quad \text{Equação 3.2}$$

onde m_u é momento último e as variáveis B , c e r_q estão definidas na Figura 3.48:

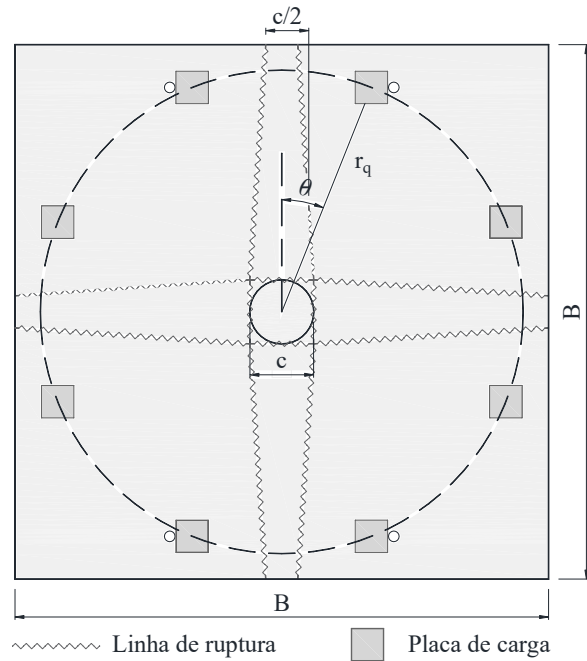


Figura 3.48 – Mecanismo de colapso

Tabela 3.4 – Resistência a flexão das lajes

| Modelos | $d_{12,5}$ (mm) | $d_{6,0}$ (mm) | $\rho_{12,5}$ (%) | $\rho_{6,0}$ (%) | f_c (MPa) | $f_{y, 12,5}$ (MPa) | $f_{y, 6,0}$ (MPa) | V_{flex} (kN) |
|--------------|--------------------|-------------------|----------------------|---------------------|----------------|------------------------|-----------------------|--------------------|
| RSP28 | 239 | 227 | 0,41 | 0,10 | 48 | 584 | 697 | 1404 |
| BD28 - P1 | 250 | 238 | 0,38 | 0,10 | 48 | 584 | 697 | 1413 |
| BD28 - P2 | 255 | 242 | 0,37 | 0,09 | 48 | 584 | 697 | 1418 |
| BD28 - P3 | 255 | 242 | 0,37 | 0,09 | 48 | 584 | 697 | 1418 |
| BD1 | 243 | 231 | 0,40 | 0,10 | 45 | 577 | 627 | 1358 |
| BD2 | 257 | 244 | 0,36 | 0,09 | 45 | 577 | 627 | 1374 |
| SS1 | 234 | 221 | 0,43 | 0,11 | 45 | 577 | 627 | 1346 |
| SS2 | 249 | 235 | 0,39 | 0,10 | 45 | 577 | 627 | 1364 |
| BD3 | 244 | 231 | 0,40 | 0,10 | 47 | 577 | 627 | 1361 |
| BD4 | 255 | 243 | 0,37 | 0,09 | 47 | 577 | 627 | 1374 |
| SS1 3º Série | 239 | 227 | 0,41 | 0,11 | 47 | 577 | 627 | 1355 |

onde d é a altura útil; ρ é a taxa de armadura total da laje; f_c é a resistência à compressão do concreto, f_y é a tensão de escoamento das armaduras

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais de 11 lajes ensaiadas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília. Serão apresentadas as informações de propriedades mecânicas de materiais, cargas últimas, deslocamentos verticais, deformações na armadura de flexão, na armadura de cisalhamento, na superfície do concreto, mapa de fissuração, superfície e o modo de ruptura das lajes.

4.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

4.1.1. Concreto

São apresentados nas Tabela 4.1 a média dos resultados realizados em três corpos de prova de concreto resultantes dos ensaios de compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do concreto

| Série | Lote | Idade* (dias) | f_c (MPa) | $f_{t,D}$ (MPa) | E_c (GPa) |
|----------|-------------|------------------|----------------|--------------------|----------------|
| 1ª Série | Pré-moldado | 102 | 57 | 3,5 | 29,7 |
| | Complemento | 44 | 48 | 3,8 | 25,9 |
| 2ª Série | Pré-moldado | 80 | 35 | 3,6 | 28,3 |
| | Complemento | 51 | 45 | 3,8 | 28,6 |
| 3ª Série | Pré-moldado | 82 | 35 | 3,6 | 28,3 |
| | Complemento | 53 | 47 | 3,0 | 28,6 |

*Na data dos ensaios

4.1.2. Aço

Para cada diâmetro utilizado na confecção das armaduras das lajes foram ensaiadas três amostras de corpo de prova, com comprimento de 500 mm, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6892 (2013). A Tabela 4.2 apresenta a média dos resultados à tração dos aços utilizados na confecção das lajes.

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas do aço

| Série | Propriedade | Barras | | | | | |
|------------------|----------------------|------------------|------------------|--------|--------|---------|---------|
| | | 6,0 mm (Tela) | 8,0 mm (Tela) | 6,3 mm | 8,0 mm | 10,0 mm | 12,5 mm |
| 1ª Série | f_{ysm} (MPa) | 697 | 644 | 622 | 558 | 553 | 584 |
| | E_{sm} (GPa) | 195 | 195 | 198 | 195 | 193 | 189 |
| | ϵ_{ysm} (‰) | 3,6 | 3,3 | 3,1 | 2,9 | 2,9 | 3,1 |
| 2ª e 3ª Série | f_{ysm} (MPa) | 627 | 681 | - | 675 | 618 | 577 |
| | E_{sm} (GPa) | 190 | 194 | - | 196 | 193 | 183 |
| | ϵ_{ysm} (‰) | 3,3 | 3,5 | - | 3,4 | 3,2 | 3,1 |

Sendo, f_{ysm} a tensão média de escoamento do aço; E_{sm} o módulo de elasticidade médio e ϵ_{ysm} a deformação específica média no escoamento.

4.2. COMPORTAMENTO DAS LAJES

Para facilitar no processo de análise, as lajes previamente divididas em quatro grupos de acordo com as variáveis do programa experimental foram comparadas diretamente entre si, dentro e fora de seu respectivo grupo de análise. Na Tabela 4.3 é apresentado o resumo dos grupos e comparações formadas de acordo com os parâmetros em comum e variáveis, na Figura 4.1 é rerepresentado o resumo das características de todas lajes ensaiadas.

Tabela 4.3 – Lajes e seus parâmetros analisados

| Grupo | Laje | Em comum | Variável |
|-------|--------------------|---|--|
| 1 | RSP28 vs BD28-P1 | Armação de flexão | Maciça x <i>BubbleDeck</i> sem pré laje |
| | RSP28 vs BD28-P2 | Armação de flexão | Maciça x <i>BubbleDeck</i> com pré laje |
| | BD28-P1 vs BD28-P2 | Distribuição de esferas | Utilização de pré-laje |
| 1 e 2 | RSP28 vs BD28-P3 | Armação de flexão | Maciça x <i>BubbleDeck</i> com pré laje e armadura de cisalhamento |
| | BD28-P2 vs BD28-P3 | Distribuição de esferas / Pré-laje | Utilização de armadura de cisalhamento padrão BD |
| 2 | BD1 vs BD2 | Distribuição de esferas / Padrão e distribuição da armadura de cisalhamento | Utilização de pré-laje |
| 3 | SS1 vs SS2 | Distribuição da armadura de cisalhamento | Utilização de pré-laje e ancoragem da armadura cisalhamento |
| | SS1 vs BD3 | Padrão, distribuição e ancoragem da armadura de cisalhamento | Maciça x <i>BubbleDeck</i> |
| 3 e 4 | BD3 vs BD4 | Distribuição de esferas / Padrão e distribuição da armadura de cisalhamento | Utilização de pré-laje e ancoragem da armadura cisalhamento |
| 4 | SS2 vs BD4 | Padrão, distribuição e ancoragem da armadura de cisalhamento | Maciça x <i>BubbleDeck</i> |

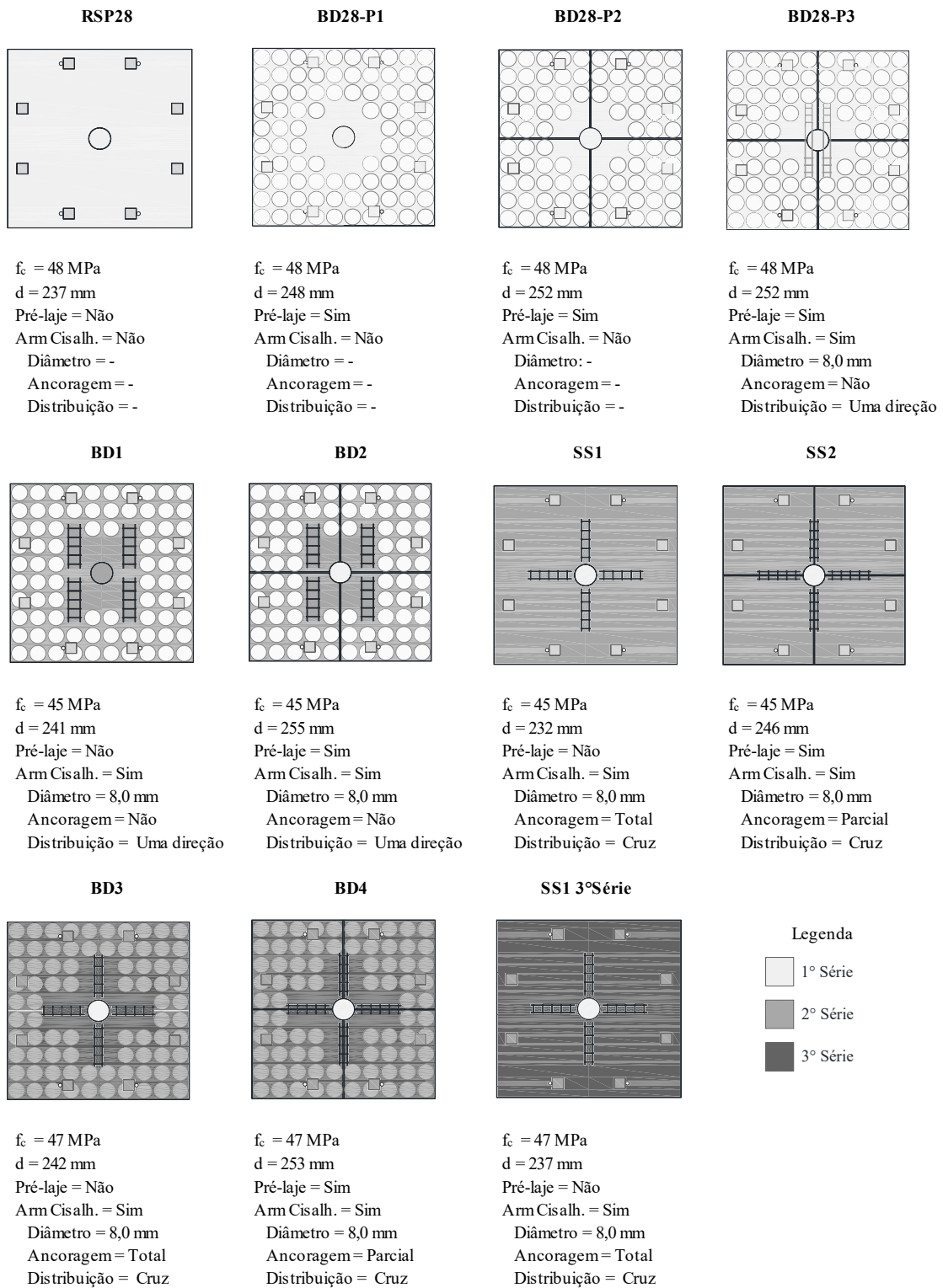


Figura 4.1 – Resumo das características das lajes ensaiadas

4.2.1. Carga de ruptura

As capacidades de carga dos modelos ensaiados são apresentadas na Tabela 4.4, sendo esta a soma da carga aplicada pelos atuadores hidráulicos, o peso próprio dos modelos e equipamentos do sistema de aplicação de carga utilizados durante a realização dos ensaios.

Tabela 4.4 – Cargas de Ruptura.

| Modelos | V_u (kN) | V_u / V_{ref} |
|--------------|------------|-----------------|
| RSP28 | 855 | - |
| BD28 - P1 | 639 | 75% |
| BD28 - P2 | 648 | 76% |
| BD28 - P3 | 693 | 81% |
| BD1 | 817 | 79% |
| BD2 | 833 | 80% |
| SS1 | 1041 | - |
| SS2 | 987 | - |
| BD3 | 995 | 95% |
| BD4 | 846 | 86% |
| SS1 3ª Série | 1048 | - |

onde V_u é a carga última atingida durante o ensaio; V_u / V_{ref} é a relação entre a carga última experimental e a carga última referente ao seu modelo de referência; Dado: Peso próprio da laje maciça + equipamento = 49 kN; Peso próprio da laje *BubbleDeck* + equipamento = 37 kN.

Comparando-se as cargas últimas, observa-se que as lajes tipo *BubbleDeck* atingiram cargas inferiores quando comparadas com a carga de ruptura da laje maciça, conforme o esperado. As reduções de carga variaram entre 5%, para o Grupo 3 (SS1 vs BD3) e 25% para o Grupo 1 (laje BD28-P1 vs RSP28).

Para as lajes BD1 e BD2, que não possuem uma laje de referência para comparação direta, decidiu-se apresentar os resultados em relação as lajes SS1 e SS2, respectivamente. Nestas lajes a redução de carga mais acentuada foi vista na laje BD1, com valor de 21%.

Estudos experimentais de HELD (2002) mostram que a resistência à punção de lajes *BubbleDeck*, em que os moldes de plástico são posicionados até a face do pilar, pode ser reduzida em até 33% em relação à resistência ao cisalhamento de uma laje maciça de mesma espessura. No caso das lajes analisadas que representa um modelo intermediário entre uma região preenchida totalmente com vazios e uma região maciça, demonstra-se

que os valores da capacidade de carga das lajes ensaiadas foram satisfatórios, com redução máxima de 25%

No que diz respeito à utilização de pré-laje, as lajes do Grupo 1 (laje BD28-P1 vs BD28-P2) e Grupo 2 (laje BD1 vs BD2) apresentaram comportamento semelhante quanto à capacidade de carga, o que evidencia que o sistema construtivo não interferiu em perdas ou ganho de resistência para lajes que tem esse item como única variável. Aqui se considera que o problema com a célula de carga ocorrido na 1ª Série de ensaios não inviabiliza o comparativo para esta variável entre estas lajes do Grupo 1.

Além disso, observou-se que a distribuição e ancoragem da armadura de cisalhamento afeta a capacidade última das lajes. Isto pode ser constatado ao comparar diretamente a capacidade de carga da laje BD3, que é cerca de 11% e 14% mais resistente que as das lajes BD4 e BD1, respectivamente. Tal comportamento está relacionado com o bom desempenho da armadura de cisalhamento das lajes do Grupo 3, que era ancorada na armadura de flexão principal superior e inferior além de ser distribuída nas duas direções (em formato Cruz). Já a laje BD4, do Grupo 4, obteve um menor rendimento, possivelmente devido a sua forma de ancoragem, aqui denominada de parcial.

4.2.2. Deslocamentos verticais

Os deslocamentos das lajes foram medidos com 12 LVDTs posicionados na face superior das lajes ensaiadas, conforme apresentado no Capítulo 3. As leituras foram realizadas a cada passo de carga. Na Figura 4.2 à Figura 4.12 são apresentados os deslocamentos verticais de cada laje na direção Sul – Norte (S-N) e na direção Oeste - Leste (O-L).

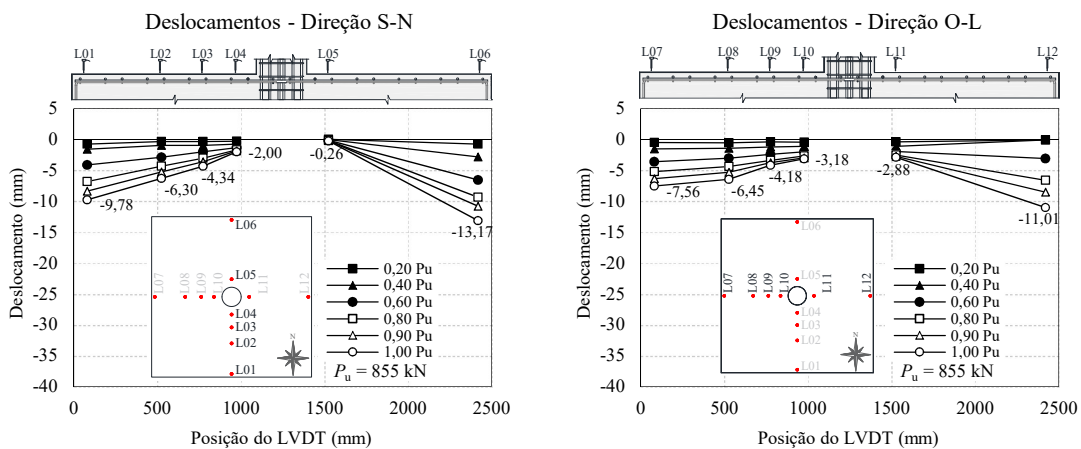


Figura 4.2 – Deslocamentos verticais da laje RSP28

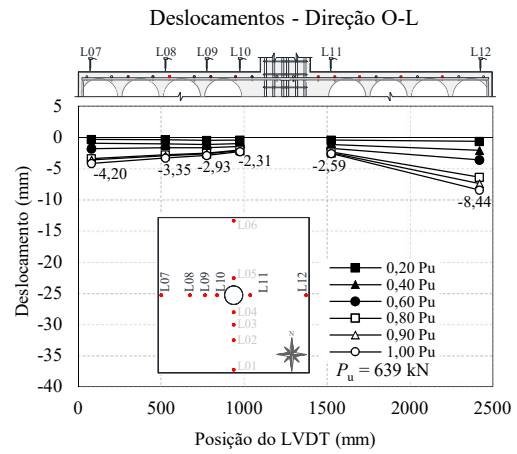
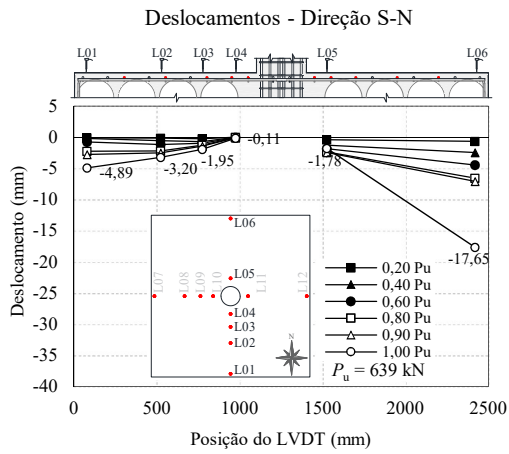


Figura 4.3 – Deslocamentos verticais da laje BD28-P1

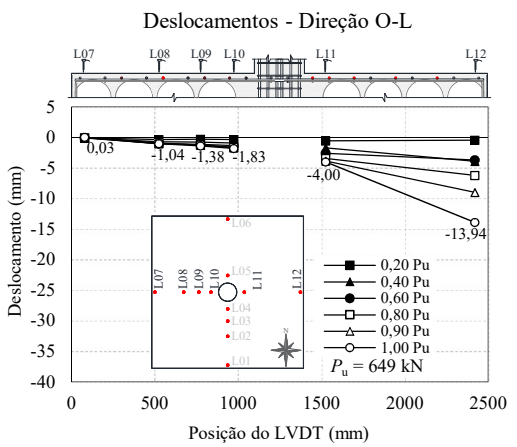
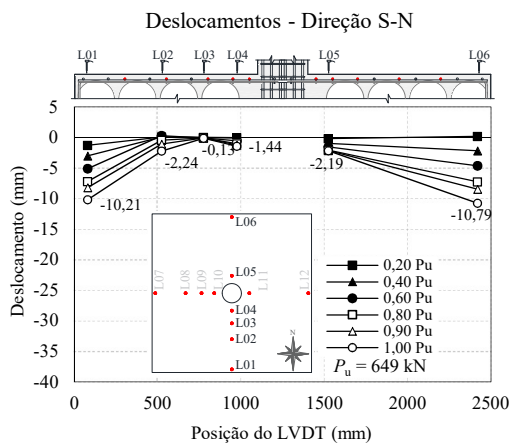


Figura 4.4 – Deslocamentos verticais da laje BD28-P2.

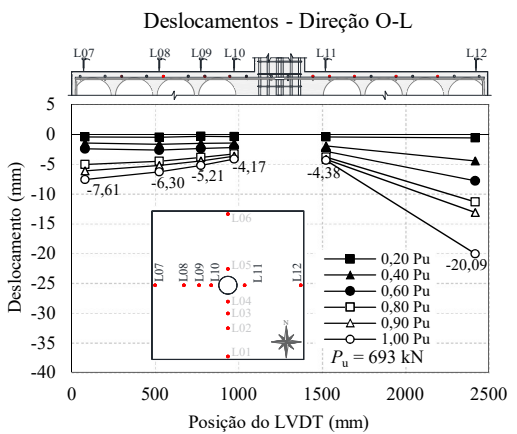
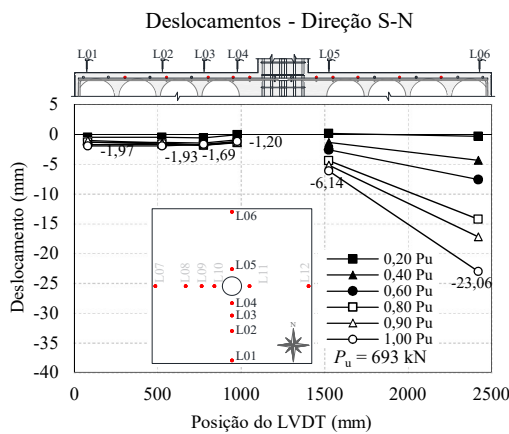


Figura 4.5 – Deslocamentos verticais da laje BD28-P3.

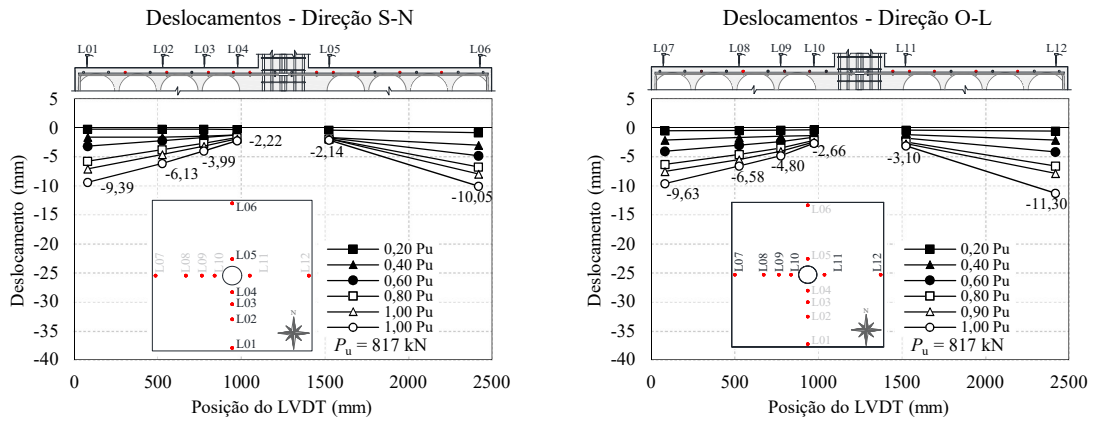


Figura 4.6 – Deslocamentos verticais da laje BD1.

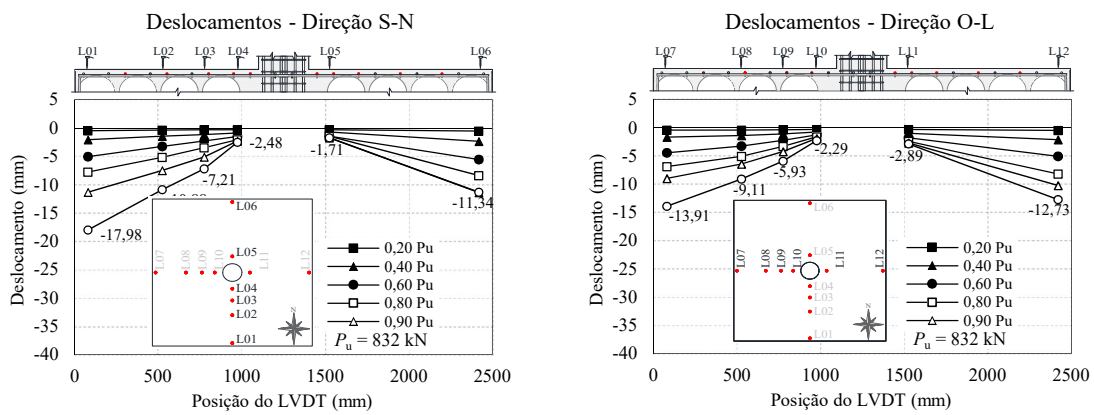


Figura 4.7 – Deslocamentos verticais da laje BD2.

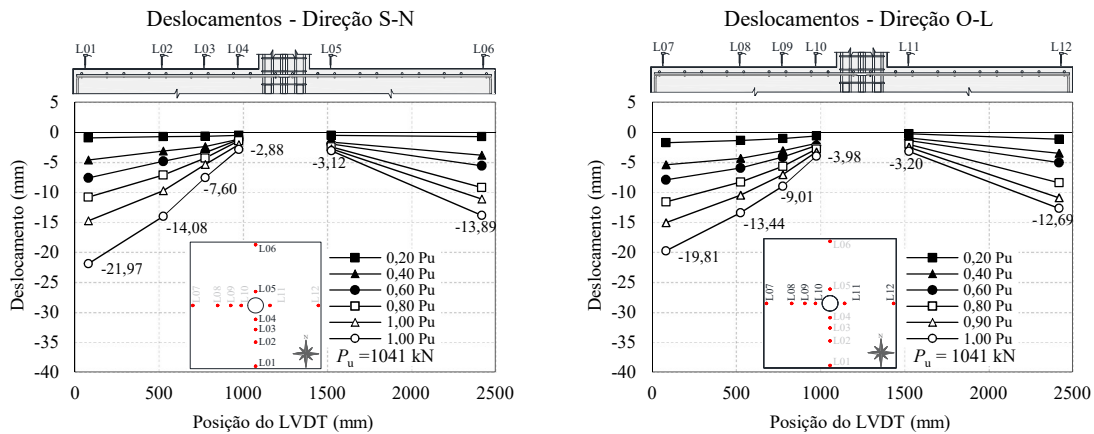


Figura 4.8 – Deslocamentos verticais da laje SS1.

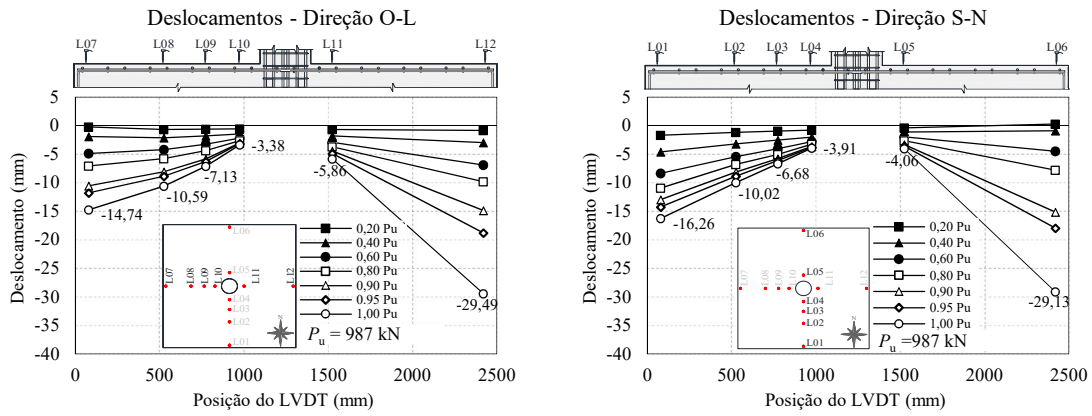


Figura 4.9 – Deslocamentos verticais da laje SS2.

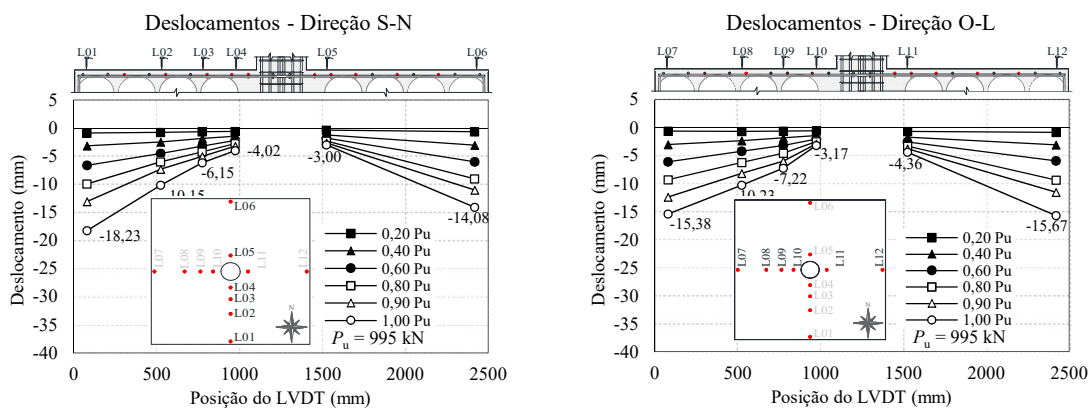


Figura 4.10 – Deslocamentos verticais da laje BD3.

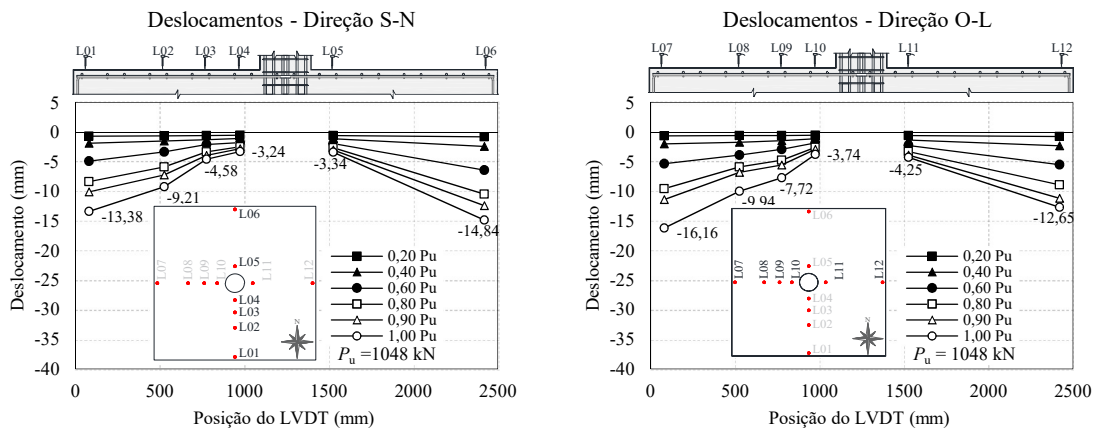


Figura 4.11 – Deslocamentos verticais da laje BD4.

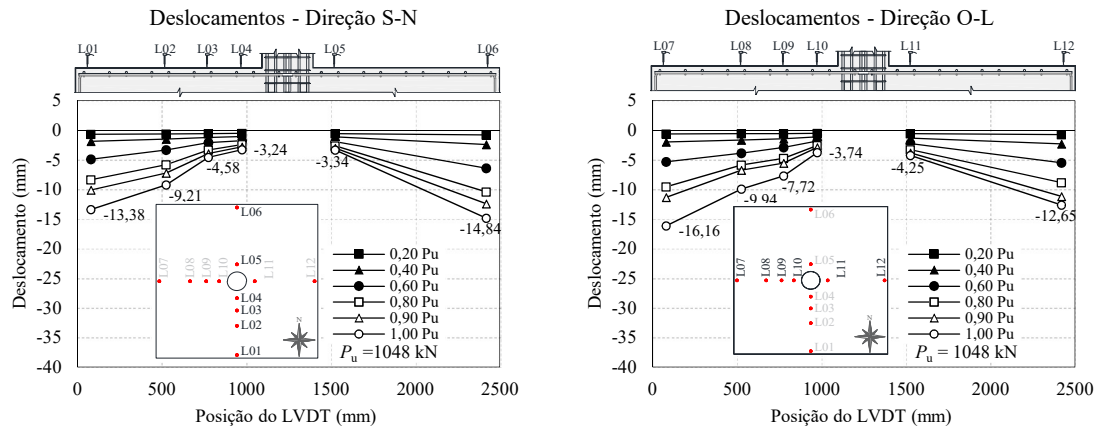


Figura 4.12 – Deslocamentos verticais da laje SS1 3ª Série.

Nos resultados das Figura 4.2 à Figura 4.12 se nota um padrão predominantemente simétrico de deslocamento na maioria das lajes, à exceção das lajes da 1ª Série de concretagem. Essa assimetria de deslocamentos, que foi corrigida nas lajes da 2ª e 3ª série de concretagem, está relacionada ao travamento do pilar no pórtico de ensaio e instabilidade do sistema de carregamento que utiliza quatro atuadores hidráulicos com controle independente para aplicação de carga. Outro problema específico da 1ª Série de concretagem, e corrigido na demais séries, foi o manuseio inadequado de alguns LVDTs que não apresentaram leitura durante o ensaio: LVDT L05 da laje RSP28, L04 da laje BD28-P1 além do LVDT L03 e L07 da laje BD28-P2. Na 2ª Série de ensaios, a laje SS2 apresentou um comportamento simétrico até o nível de carga em torno de 95% de P_u . Porém, na ruptura apresentou grandes deslocamentos na direção Norte e Leste, devido à natureza brusca da ruptura.

A relação carga deslocamento médio é representada na Figura 4.13. Os deslocamentos plotados são a média dos valores medidos por quatro LVDT's (L01, L06, L07 e L12) posicionados na linha central da laje a uma distância de 1131 mm do centro do pilar às bordas das direções Norte, Sul, Leste e Oeste.

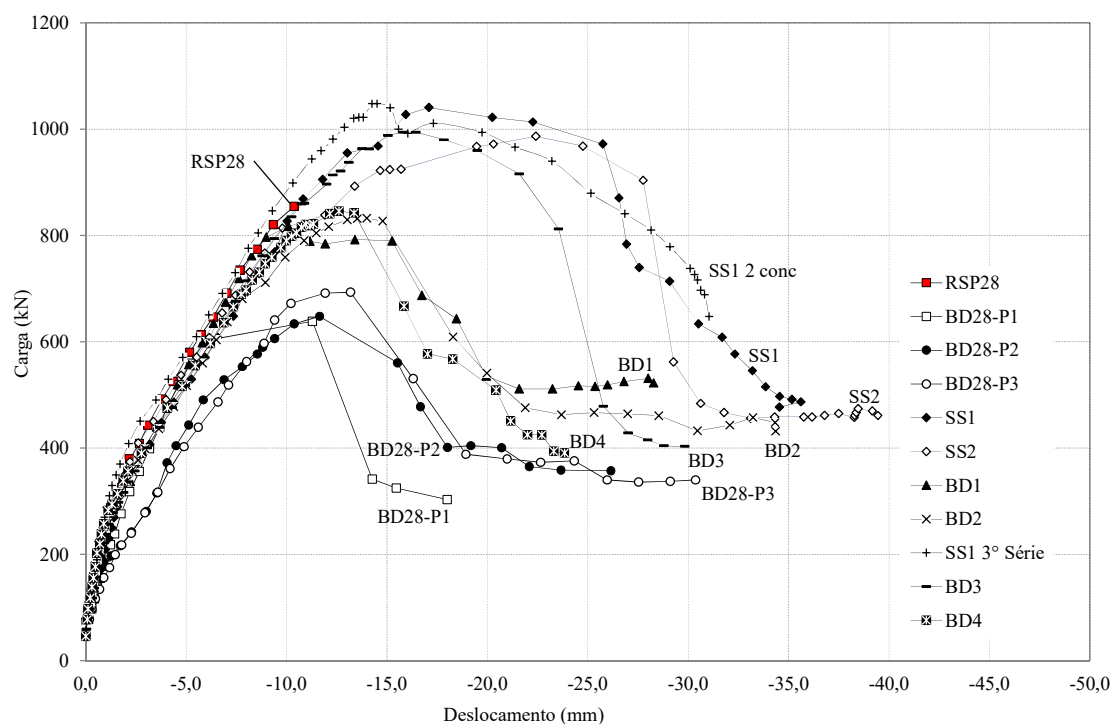


Figura 4.13 – Deslocamentos verticais médios de todas lajes

Da análise da Figura 4.13, se observa que o deslocamento vertical nas bordas aumenta proporcionalmente até a formação das primeiras fissuras na face tracionada da laje, para um nível de carga em torno de 350 kN. Na formação das fissuras notamos claramente uma mudança de rigidez na curva carga-deslocamento, posteriormente o deslocamento aumenta linearmente. Ao se formarem novas fissuras, uma segunda queda de rigidez é notada nas curvas. Esta carga coincide com a transição na inclinação da curva dos gráficos de deformação do aço tracionado, item 4.2.4.

Excetuando as lajes BD28-P2 e BD28-P3, todas as lajes tiveram o comportamento semelhante para o mesmo nível de carregamento. Nestas duas lajes se percebe de forma mais clara o problema ocorrido com o equipamento durante os ensaios da 1ª série de concretagem.

Analisando as lajes do grupo 2 (BD1 vs BD2) e grupo 3 vs 4 (BD3 vs BD4), observou-se que as lajes possuem um deslocamento médio bem semelhante para cada passo de carga, permitindo a constatar que o método executivo não interferiu na rigidez do modelo.

Na comparação direta das lajes *BubbleDeck* vs Maciça dos grupos 1, 3 e 4 verifica-se que os vazios não interferem na rigidez até a fissuração, uma vez que os deslocamentos foram semelhantes para todas lajes. A partir da formação das primeiras fissuras, o deslocamento

médio, para um mesmo nível de carga, das lajes com vazios era ligeiramente superior ao das lajes maciças. Isso mostra que a rigidez dos modelos *BubbleDeck* foi menor do que o da laje maciça, porém não foi possível quantificar a proporção entre elas.

4.2.3. Deformações na superfície do concreto

As deformações específicas no concreto foram medidas com extensômetros posicionados na superfície inferior das lajes, na região adjacente ao pilar. Os extensômetros utilizados foram da marca *Kyowa* modelo KC-70-120-A1-11, e posicionados de forma a registrar as deformações radiais e tangenciais no concreto.

As posições dos extensômetros para cada laje variaram em função das interferências causadas pelo pré-moldado, conforme o caso. Na Figura 4.14 à Figura 4.22 são apresentados os resultados da leitura de deformações na superfície do concreto de todas as lajes.

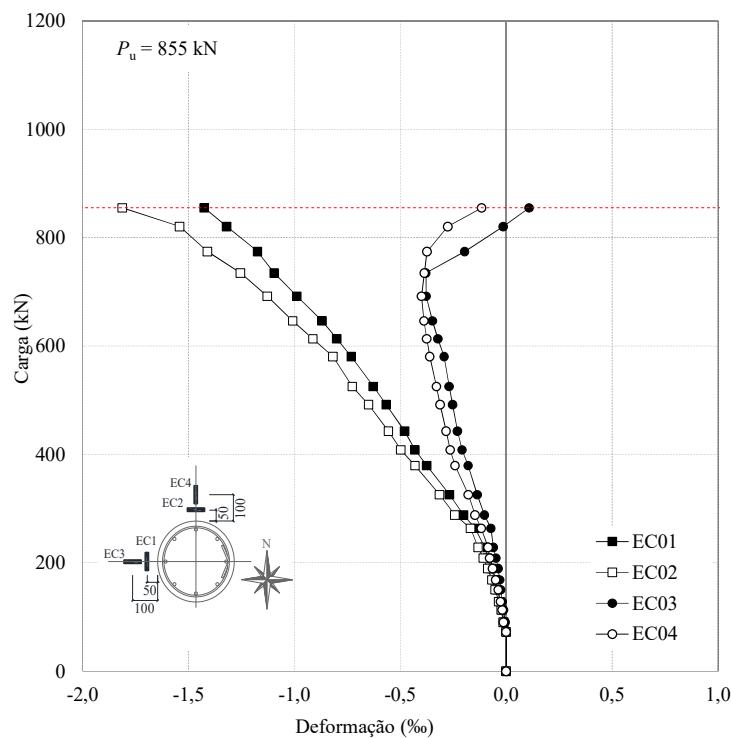


Figura 4.14 – Deformações na superfície do concreto da laje RSP28

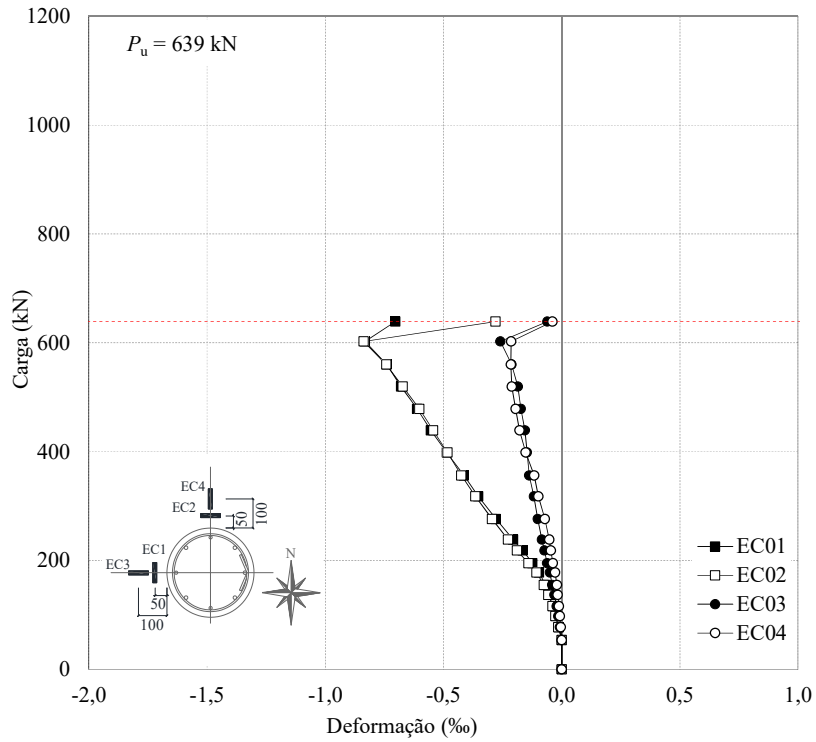


Figura 4.15 – Deformações na superfície do concreto da laje BD28-P1.

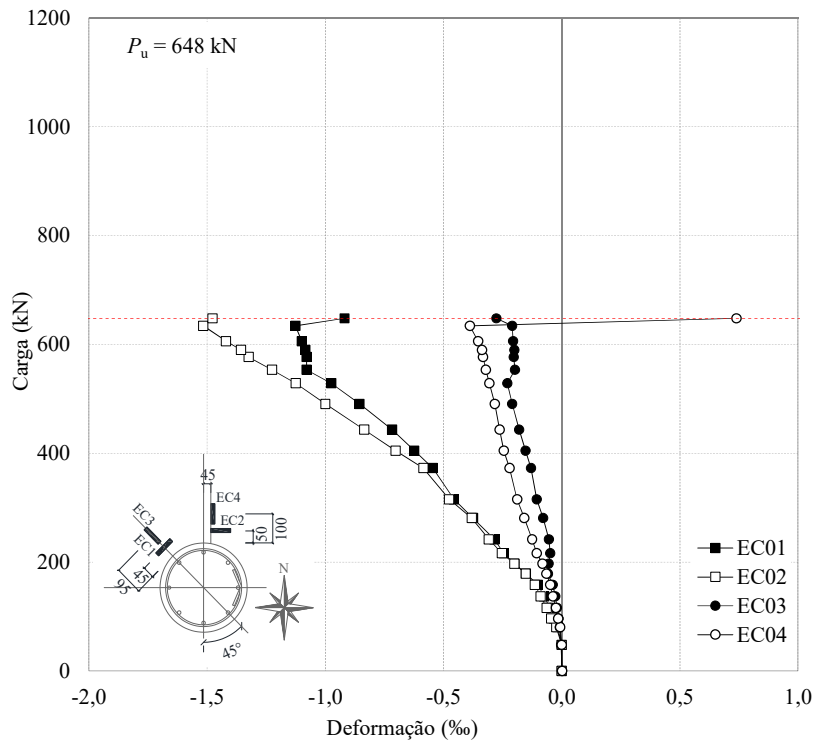


Figura 4.16 – Deformações na superfície do concreto da laje BD28-P2.

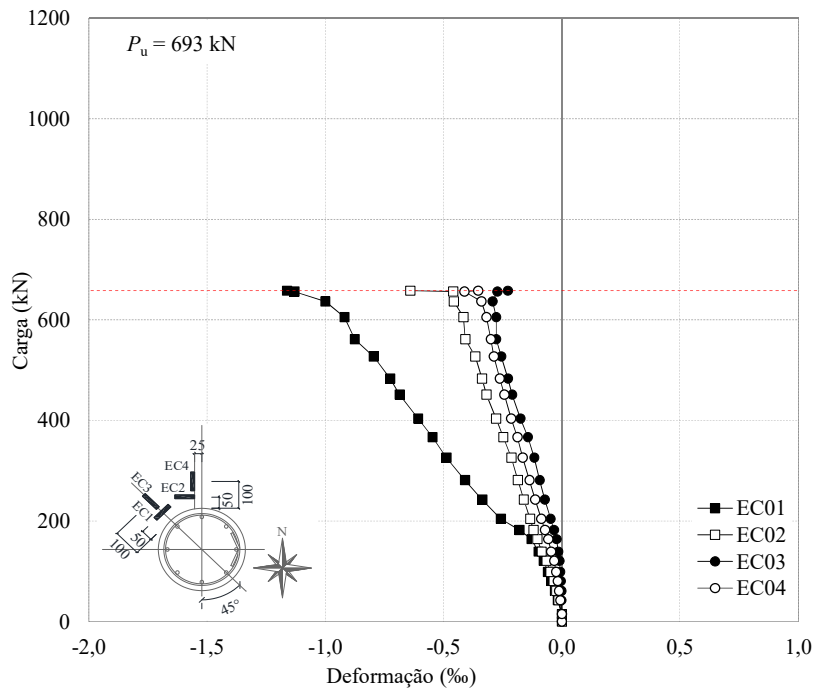


Figura 4.17 – Deformações na superfície do concreto da laje BD28-P3.

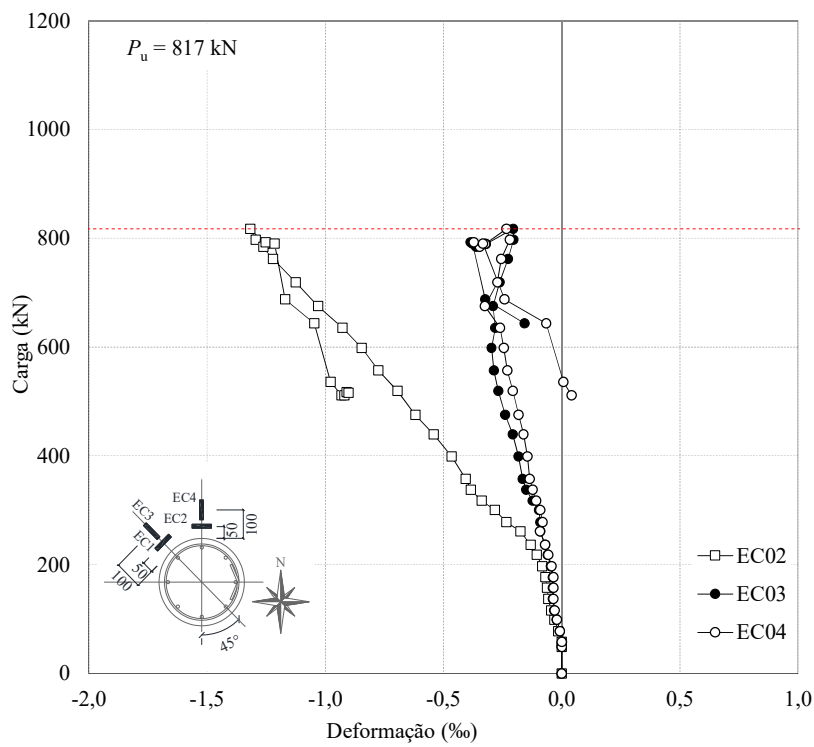


Figura 4.18 – Deformações na superfície do concreto da laje BD1.

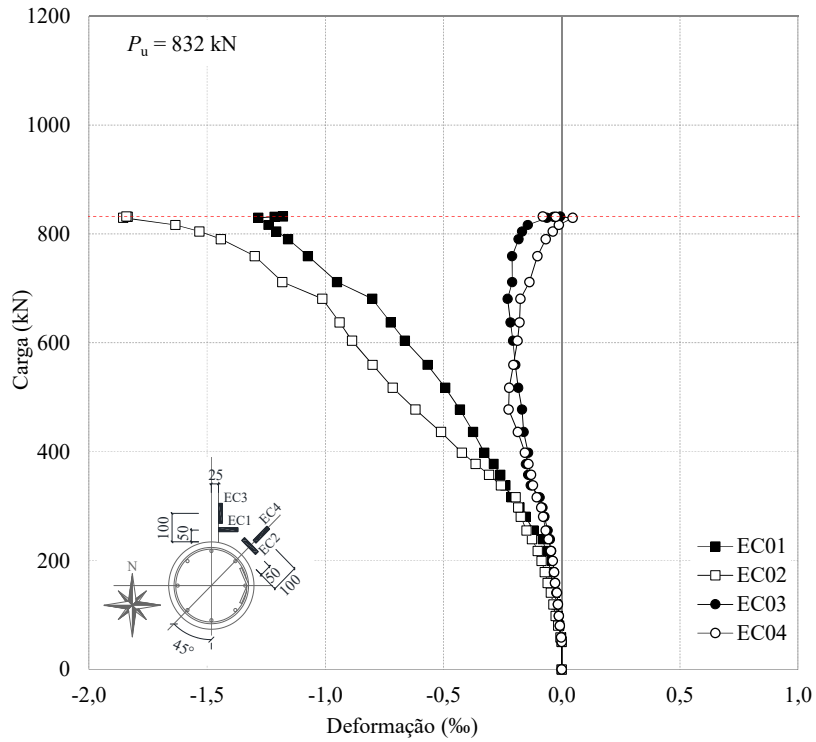


Figura 4.19 – Deformações na superfície do concreto da laje BD2.

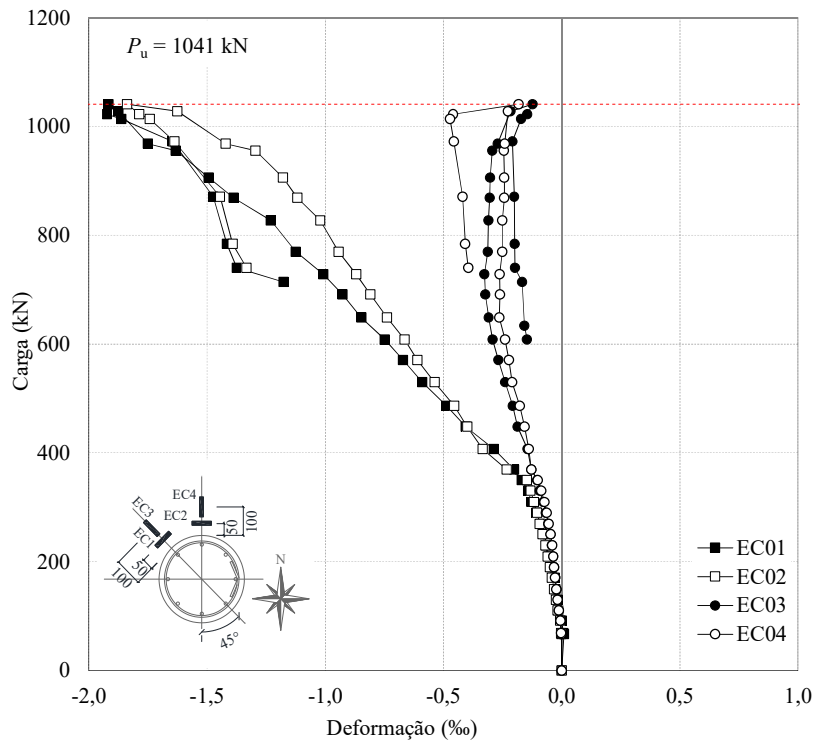


Figura 4.20 – Deformações na superfície do concreto da laje SS1

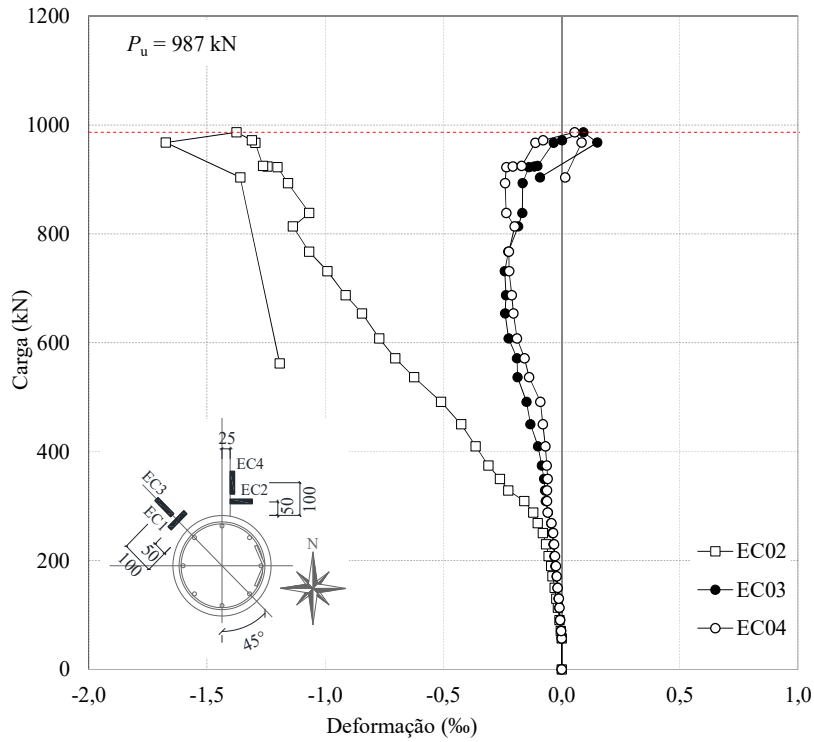


Figura 4.21 – Deformações na superfície do concreto da laje SS2

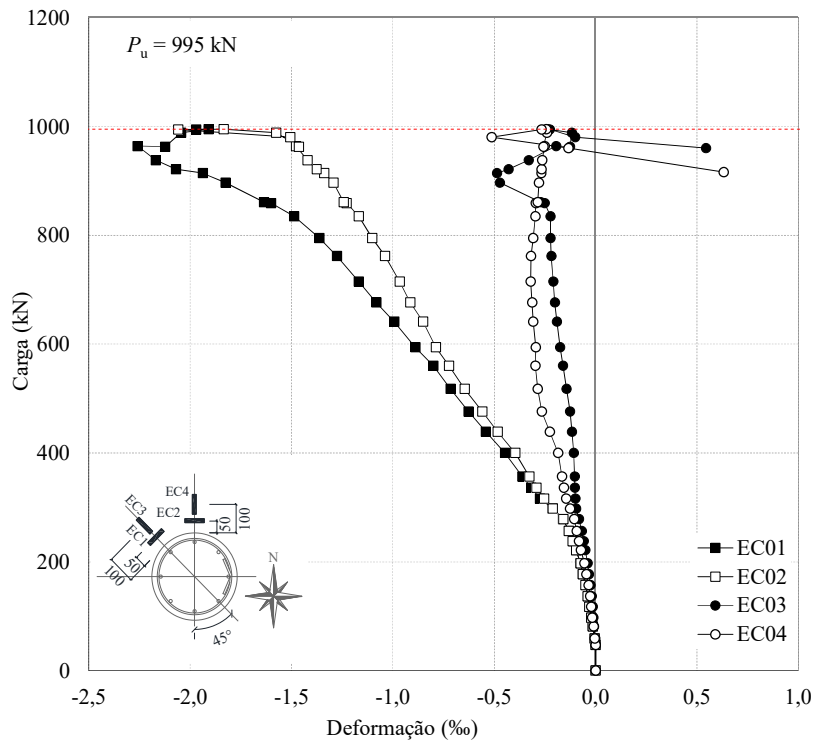


Figura 4.22 – Deformações na superfície do concreto da laje BD3

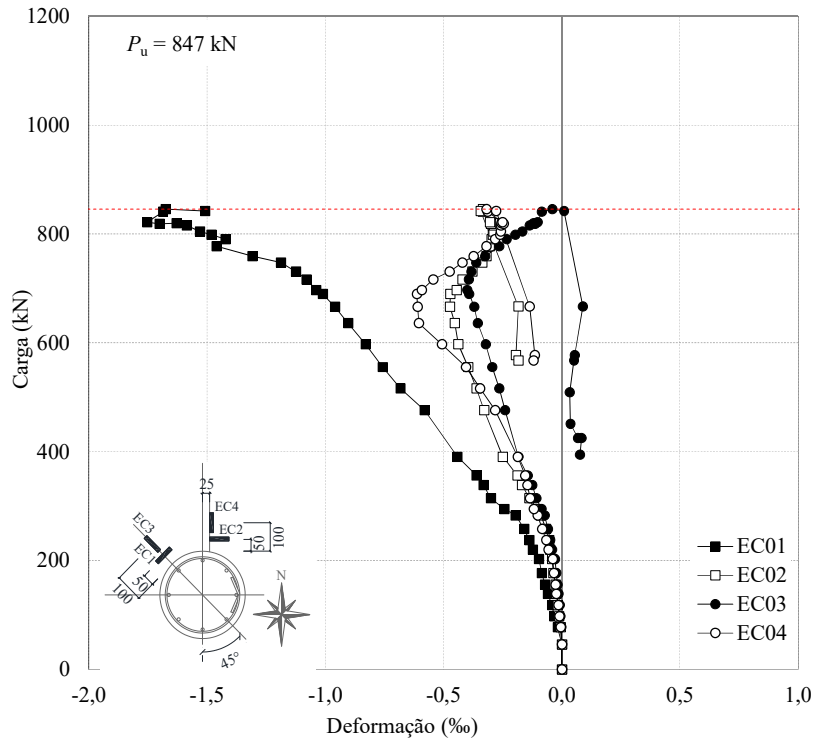


Figura 4.23 – Deformações na superfície do concreto da laje BD4

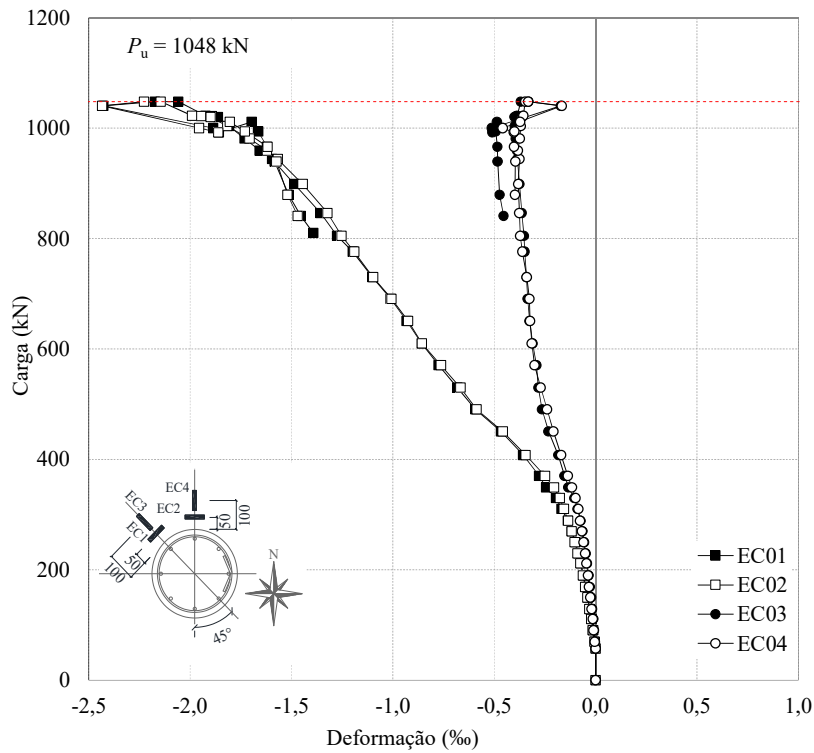


Figura 4.24 – Deformações na superfície do concreto da laje SS1 3ª Série

De um modo geral, as análises das figuras permitiram afirmar que o comportamento da relação carga x deformação na direção radial e tangencial permanece similar até o

surgimento das primeiras fissuras de flexão. Após esta etapa inicial, as deformações crescem em taxas diferentes, onde as deformações tangenciais apresentam maiores valores que as deformações radiais. Estas por sua vez, diminuem com carregamentos em torno de $\approx 70\%Pu$, podendo inclusive ser registrado deformações de tração. Este comportamento foi demonstrado experimentalmente por diversos autores, inclusive em demais pesquisas desenvolvidas na Universidade de Brasília [MORAES NETO (2013); OLIVEIRA (2013); SANTOS (2014)].

Segundo MUTTONI (2008), a constatação de deformações radiais de tração na face comprimida da laje, próximo ao pilar, ocorre pouco antes da ruptura por punção. Este fenômeno pode ser explicado devido ao desenvolvimento da fissura crítica de cisalhamento que gera a formação de uma biela em forma de cotovelo com um elemento de tração nas proximidades do pilar, na Figura 4.25 é representado este comportamento.

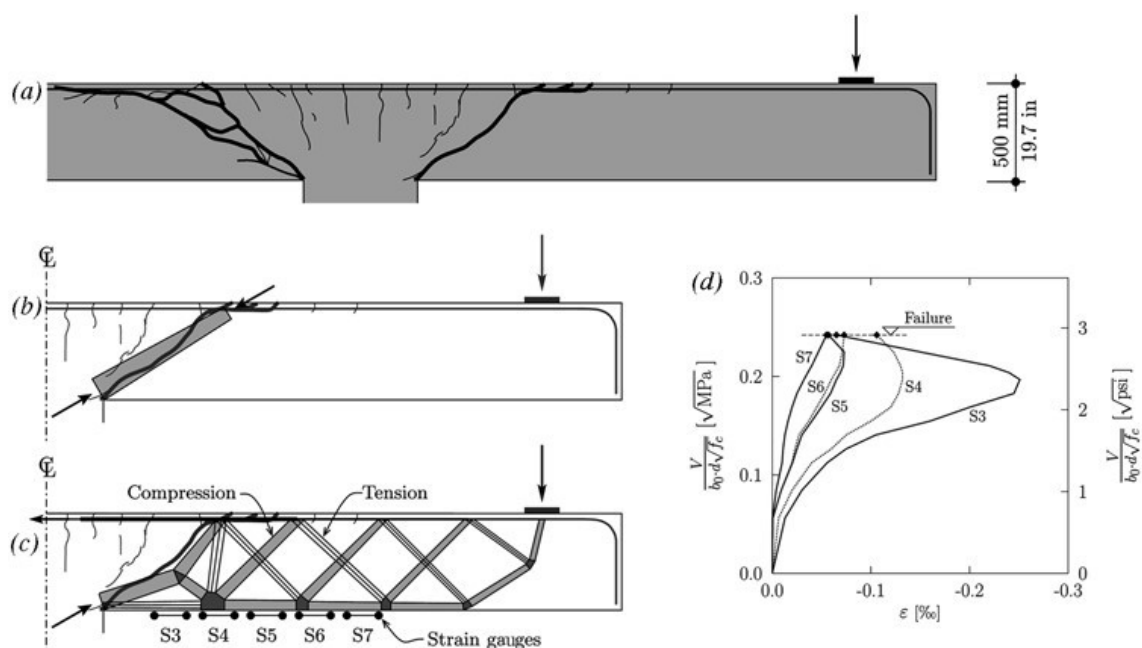


Figura 4.25 – Modelo de bielas e tirantes para ruptura por punção (MUTTONI, 2008)

É importante ressaltar que em algumas regiões, o posicionamento do extensômetro tangencial EC2 e do extensômetro radial EC4 variou em função da interferência causada pela pré-laje, para os demais extensômetros a distância permaneceu constante.

Dos resultados apresentados, as maiores deformações foram registradas na direção tangencial da laje SS1 3ª Série e BD3, com valores de 2,43 % e 2,25 %, respectivamente. Nos demais modelos, nenhuma deformação atingiu 2,00 %.

Na Figura 4.26 estão apresentados os resultados das deformações tangenciais para as lajes do grupo de análise, dos quais se nota um comportamento bem similar até um nível de carregamento em torno de 800 kN. Esse comportamento indica que tanto o método construtivo (*BubbleDeck* vs. Maciça), quanto a utilização de pré-laje não interferem significativamente nestas deformações.

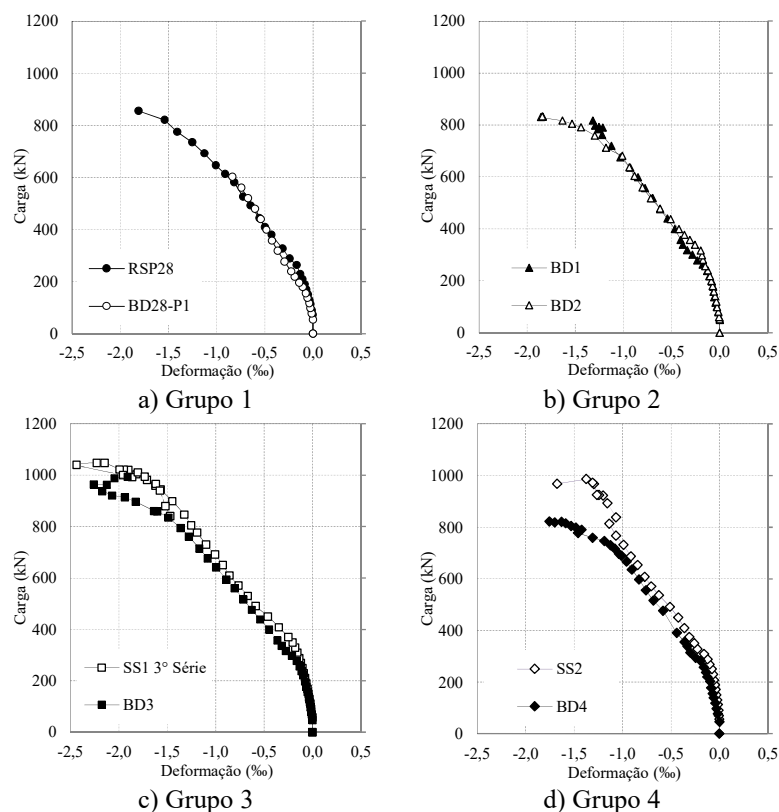
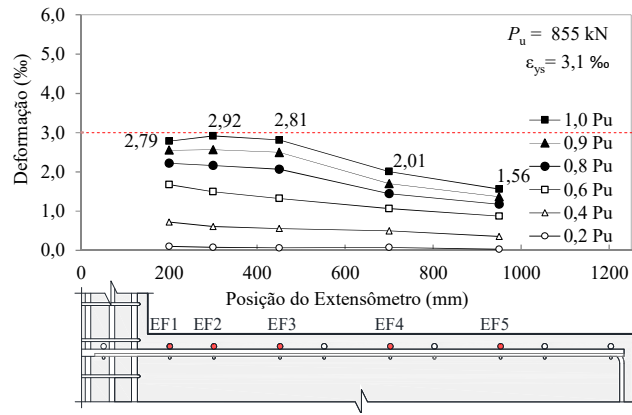


Figura 4.26 – Deformações na superfície do concreto dos grupos de análise

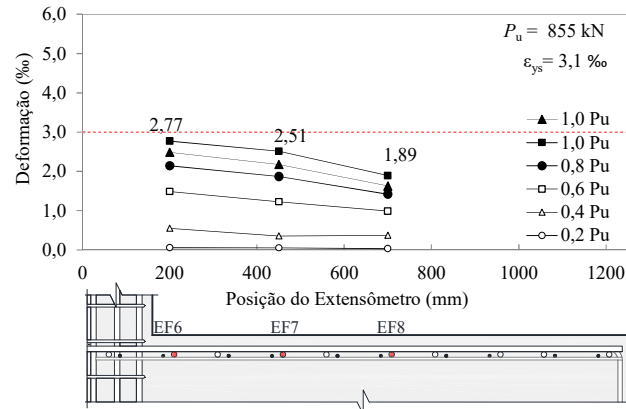
4.2.4. Deformações nas armaduras de flexão

Nas lajes da 1ª Série as deformações nas armaduras de flexão foram monitoradas em cinco pontos distintos na malha superior da armadura principal, direção Leste-Oeste, e 3 pontos na malha inferior da armadura principal, direção Sul-Norte, totalizando oito pontos de leitura. Para as lajes da Série 2 e 3, foram monitorados apenas seis pontos na malha superior em uma direção. Essa mudança levou em consideração a pequena variação entre os resultados dos pontos de leitura equivalentes da 1ª Série.

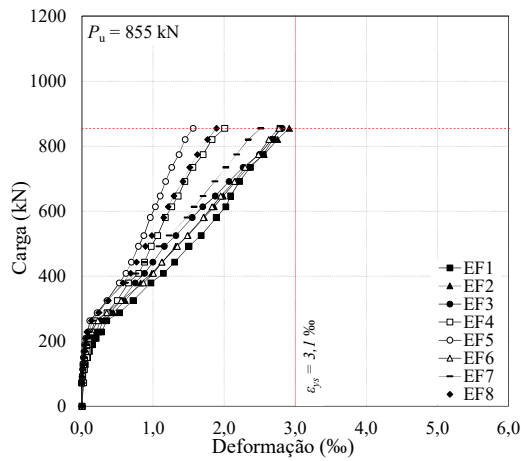
Na Figura 4.27 à Figura 4.37 são apresentados gráficos das deformações nas armaduras de flexão superiores da laje em função da posição do extensômetro na barra. Nestes gráficos são visualizadas as deformações para diferentes estágios de carregamento dos extensômetros EF1 à EF6.



a) Gráfico deformação vs. posicionamento - Extensômetros EF1 à EF5

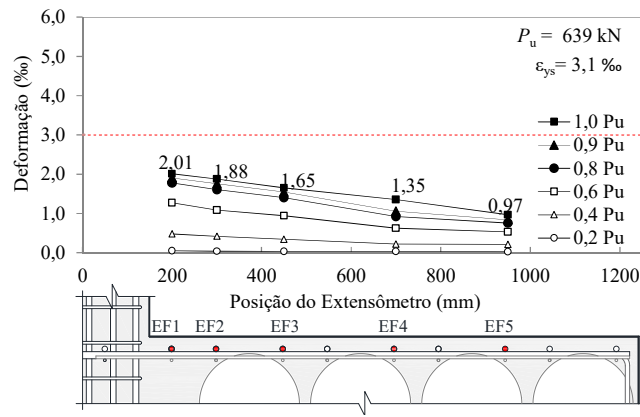


b) Gráfico deformação vs. posicionamento - Extensômetros EF6 à EF8

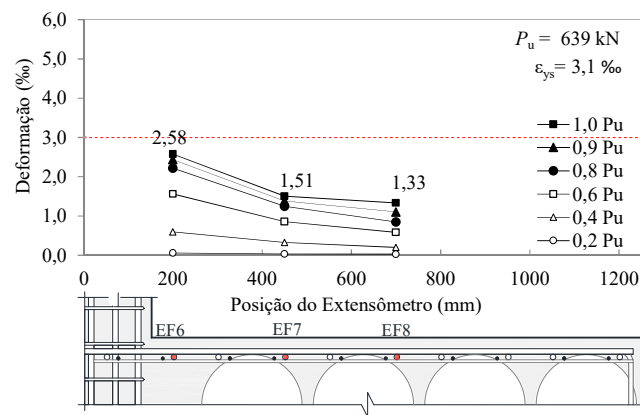


c) Curva carga vs. deformação

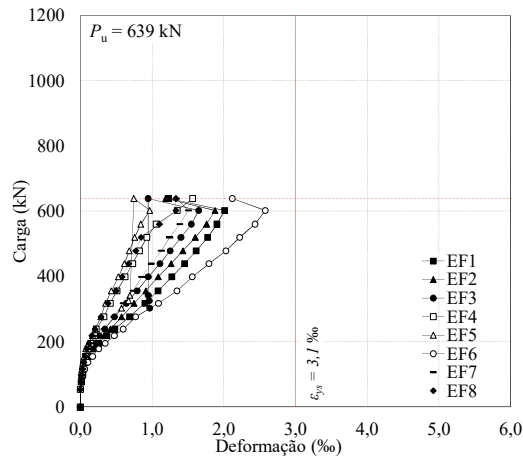
Figura 4.27 – Deformações nas armaduras de flexão da laje RSP28



a) Gráfico deformação vs. posicionamento - Extensômetros EF1 à EF5

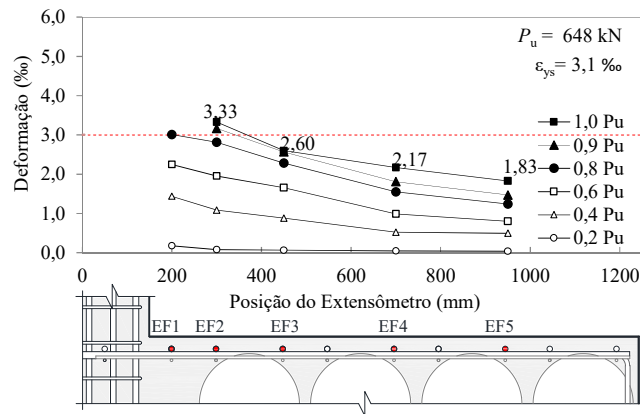


b) Gráfico deformação vs. posicionamento - Extensômetros EF6 à EF8

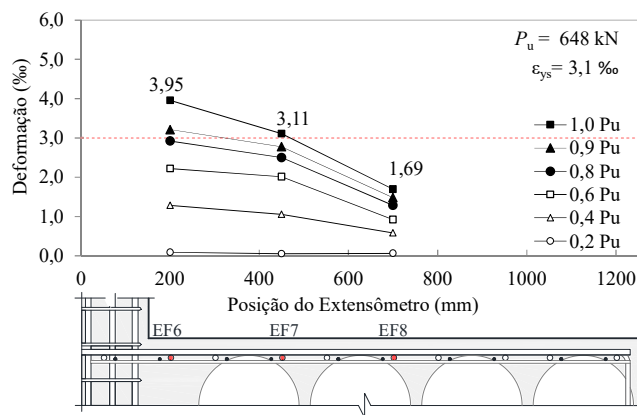


c) Curva carga vs. deformação

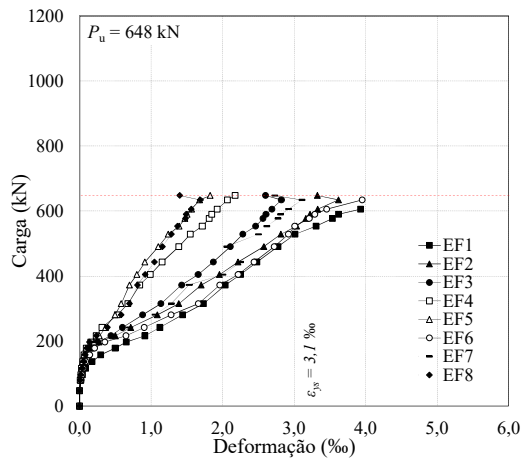
Figura 4.28 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28-P1



a) Gráfico deformação vs. posicionamento - Extensômetros EF1 à EF5

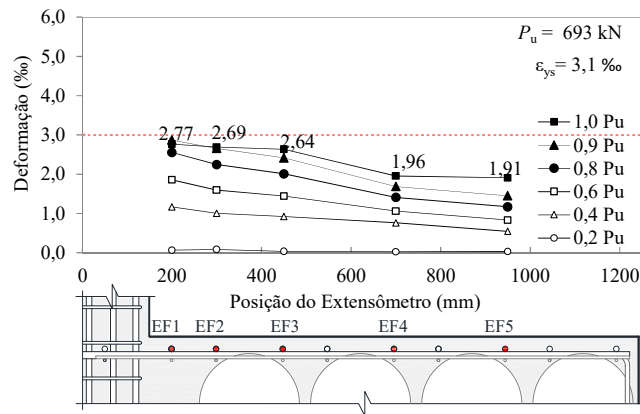


b) Gráfico deformação vs. posicionamento - Extensômetros EF6 à EF8

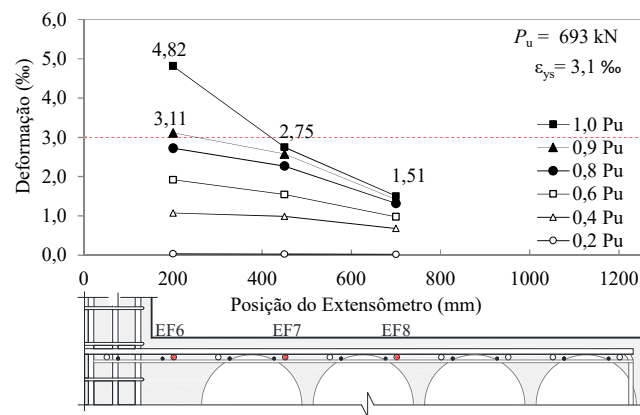


c) Curva carga vs. deformação

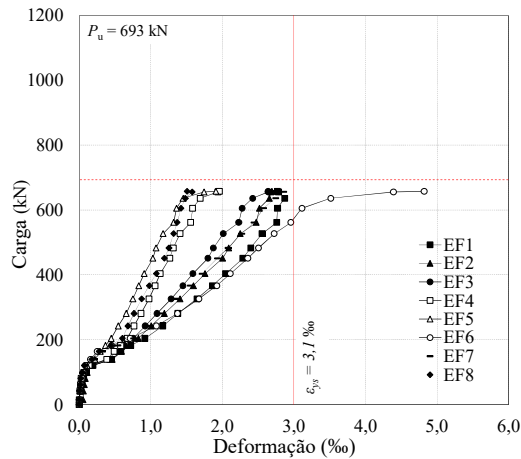
Figura 4.29 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28-P2



a) Gráfico deformação vs. posicionamento - Extensômetros EF1 à EF5

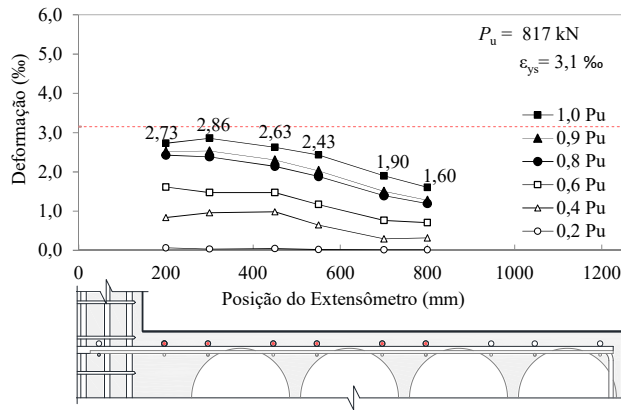


b) Gráfico deformação vs. posicionamento - Extensômetros EF6 à EF8

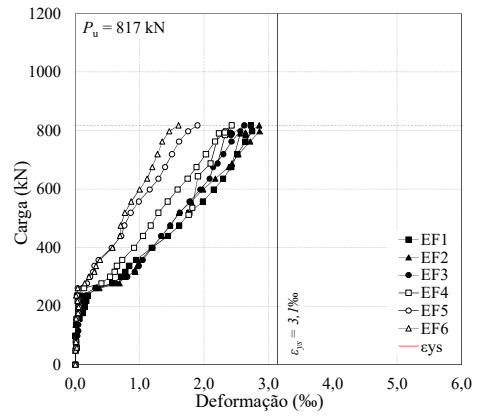


c) Curva carga vs. deformação

Figura 4.30 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD28-P3

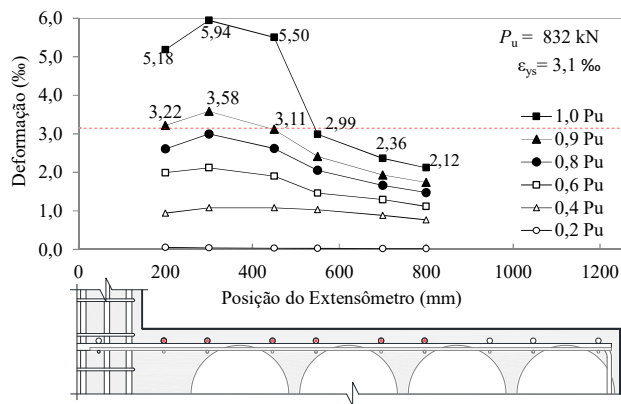


a) Gráfico deformação vs. posicionamento

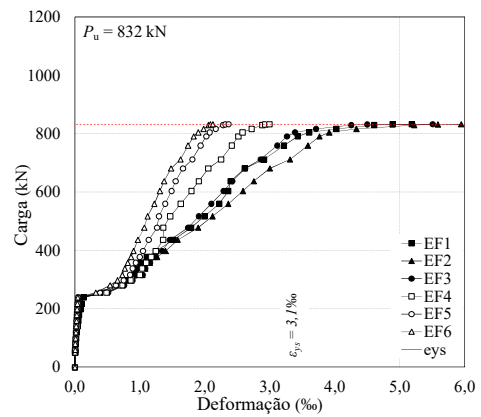


b) Curva carga vs. deformação

Figura 4.31 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD1

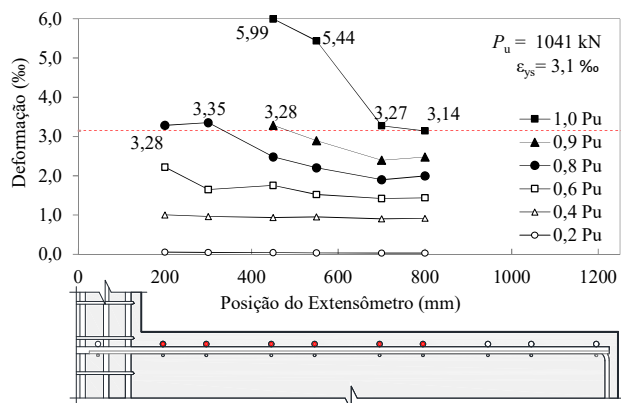


a) Gráfico deformação vs. posicionamento

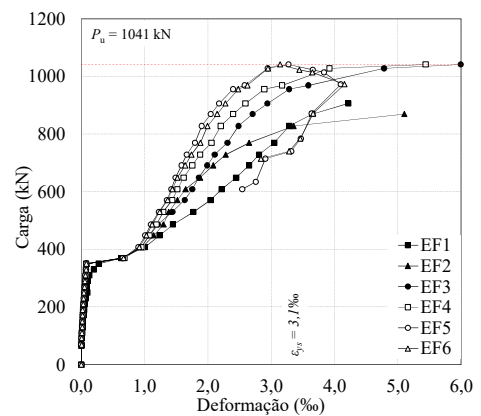


b) Curva carga vs. deformação

Figura 4.32 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD2

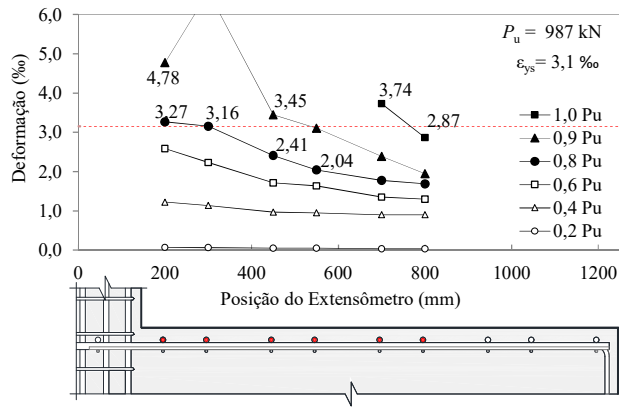


a) Gráfico deformação vs. posicionamento

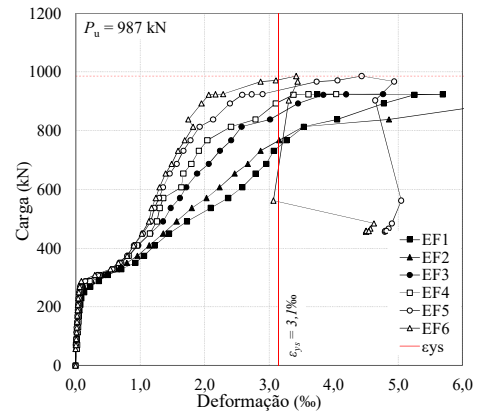


b) Curva carga vs. deformação

Figura 4.33 – Deformações nas armaduras de flexão da laje SS1

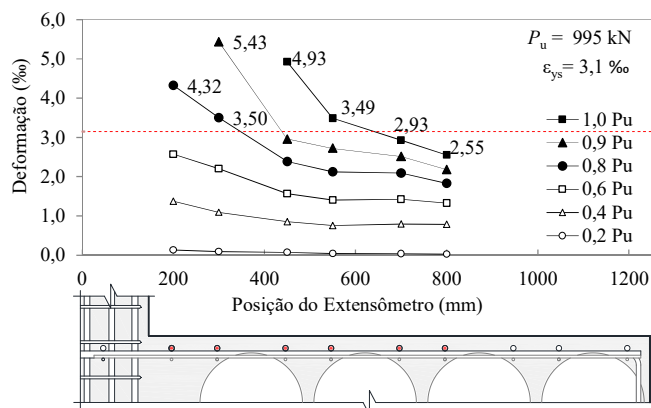


a) Gráfico deformação vs. posicionamento

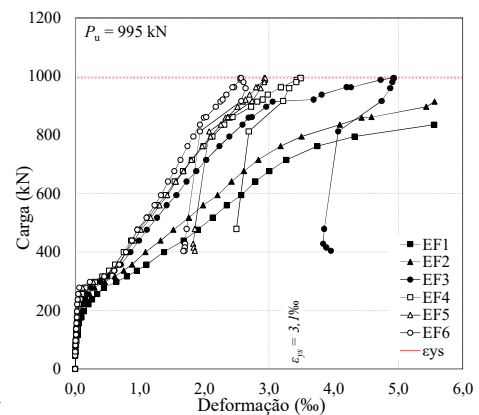


b) Curva carga vs. deformação

Figura 4.34 – Deformações nas armaduras de flexão da laje SS2

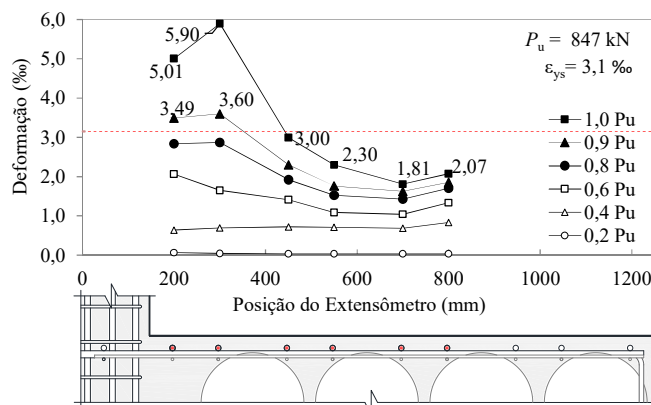


a) Gráfico deformação vs. posicionamento

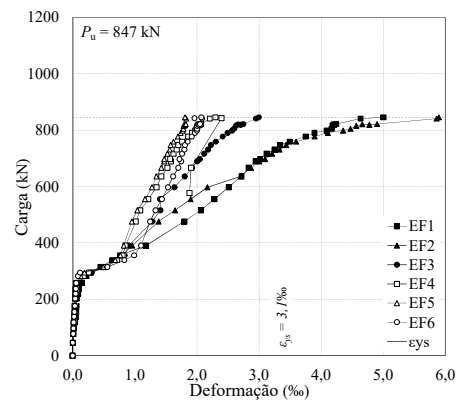


b) Curva carga vs. deformação

Figura 4.35 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD3



a) Gráfico deformação vs. posicionamento



b) Curva carga vs. deformação

Figura 4.36 – Deformações nas armaduras de flexão da laje BD4

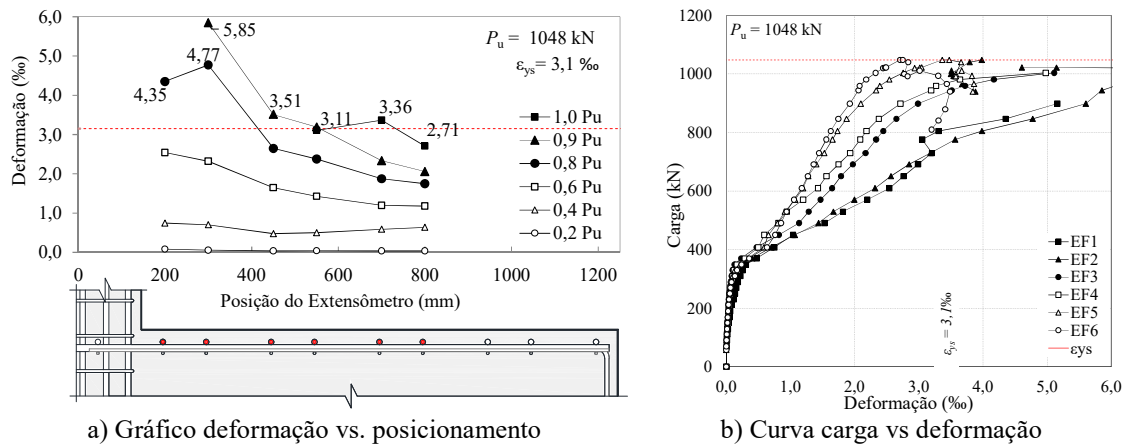


Figura 4.37 – Deformações nas armaduras de flexão da laje SS1 3ª Série

Na Tabela 4.5 são apresentadas as deformações das barras no momento da ruptura, com destaque para os valores hachurados das barras que atingiram a deformação de escoamento. Para as lajes da 1ª Série estão apresentados apenas os valores para as três primeiras barras, devido aos pontos de instrumentação serem coincidentes com os das demais séries.

Na Figura 4.38 estão apresentados os resultados das deformações para o extensômetro EF1 para as lajes do grupo de análise, notando-se um comportamento bem similar até os últimos níveis de carga.

Tabela 4.5 – Deformação máxima das armaduras

| Modelos | Deformação das armaduras (%) | | | | | |
|--------------|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|-------|
| | EF1 | EF2 | EF3 | EF4 | EF5 | EF6 |
| RSP28 | 2,79* | 2,92* | 2,81* | - | - | - |
| BD28 - P1 | 2,01 | 1,88 | 1,65 | - | - | - |
| BD28 - P2 | >> ϵ_{ys} | 3,33 | 2,60 | - | - | - |
| BD28 - P3 | 2,77 | 2,69 | 2,64 | - | - | - |
| BD1 | 2,73* | 2,86* | 2,63 | 2,43 | 1,90 | 1,60 |
| BD2 | 5,18 | 5,94 | 5,50 | 2,99 | 2,36 | 2,12 |
| SS1 | >> ϵ_{ys} | >> ϵ_{ys} | 5,99 | 5,44 | 3,27 | 3,14 |
| SS2 | >> ϵ_{ys} | >> ϵ_{ys} | >> ϵ_{ys} | >> ϵ_{ys} | 3,74 | 2,87* |
| BD3 | >> ϵ_{ys} | >> ϵ_{ys} | 4,93 | 3,49 | 2,93* | 2,55 |
| BD4 | 5,01 | 5,90 | 3,00 | 2,30 | 1,81 | 2,07 |
| SS1 3ª Série | >> ϵ_{ys} | >> ϵ_{ys} | >> ϵ_{ys} | 3,11 | 3,36 | 2,71* |

*Deformação superior a 90% de ϵ_{ysm} . Onde >> ϵ_{ys} representa os casos de deformações muito maiores que as deformações de escoamento

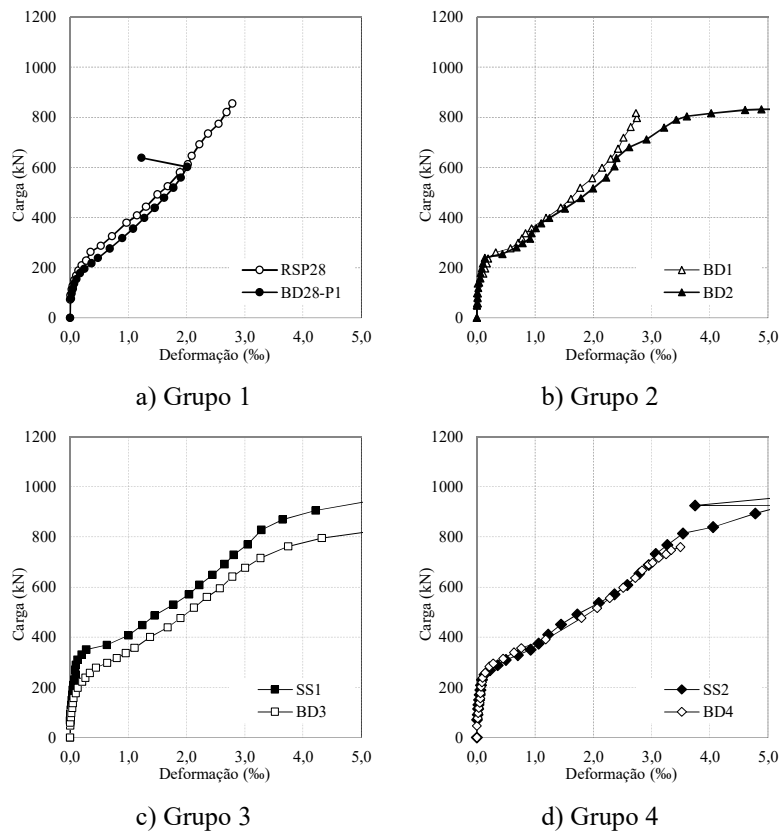


Figura 4.38 – Deformações nas armaduras de flexão dos grupos de análise

Da análise dos dados, constatamos que para as lajes dos grupos 1 e 2, as armaduras de flexão principal tiveram baixos níveis de deformação, à exceção da BD2 onde escoaram quatro barras mais próximas ao pilar e da laje BD28-P2 com dois extensômetros escoando em uma direção.

Já as lajes dos grupos 3 e 4, apresentaram um elevado nível de solicitação à flexão, com a maior parte das barras escoando na ruptura. Na laje SS1, seis barras escoaram na ruptura e na laje SS2 escoaram cinco barras instrumentadas próximas ao pilar, o que colabora para que estas lajes tenham uma ruptura mista entre punção e flexão. Na laje BD3 quatro barras apresentaram deformação acima do limite de escoamento, enquanto para laje BD4 duas barras escoaram na ruptura. Já na laje maciça SS1 3ª Série, cinco das seis barras instrumentadas apresentaram deformações superiores à de escoamento.

4.2.5. Deformações nas armaduras de cisalhamento

Dentre as lajes que continham armadura de cisalhamento os resultados das deformações nos estribos observadas nos ensaios para diferentes estágios de carregamento estão apresentados na Figura 4.39 à Figura 4.46.

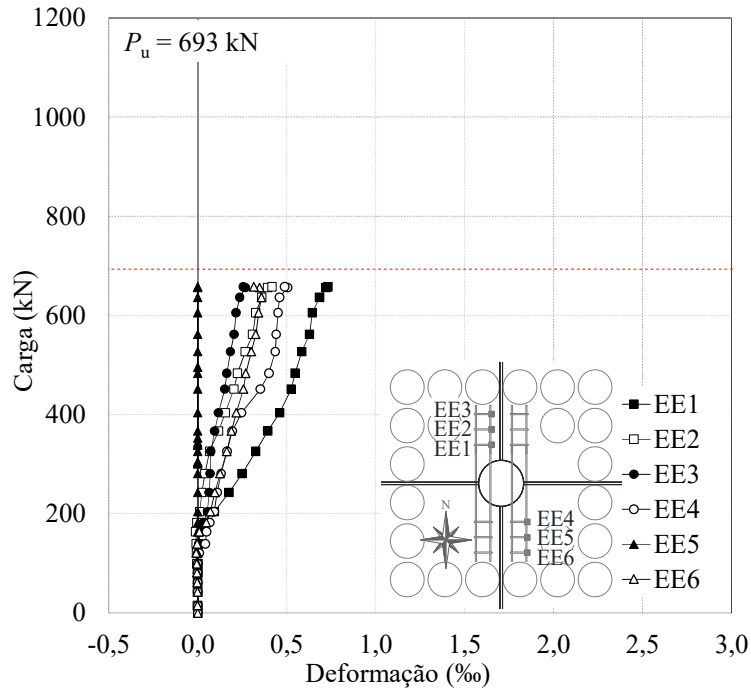


Figura 4.39 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da laje BD28-P3

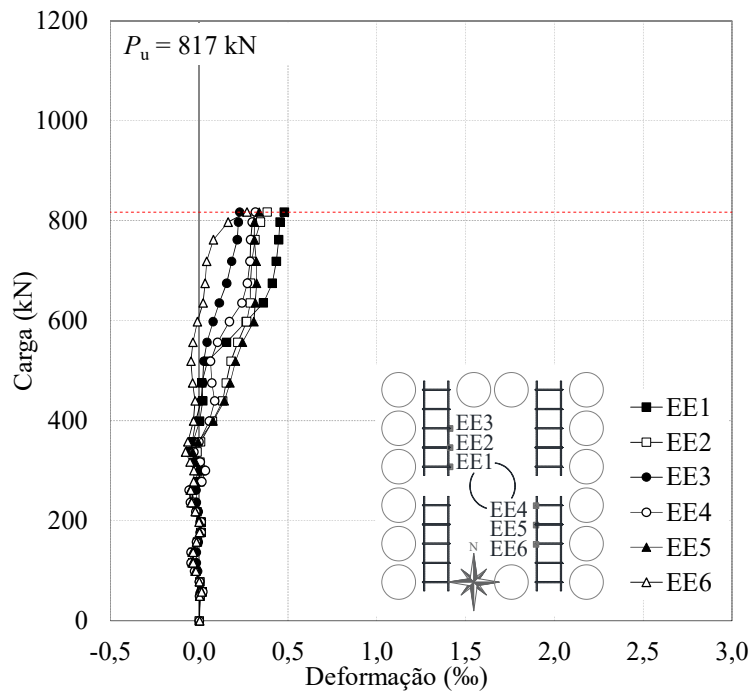


Figura 4.40 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da laje BD1

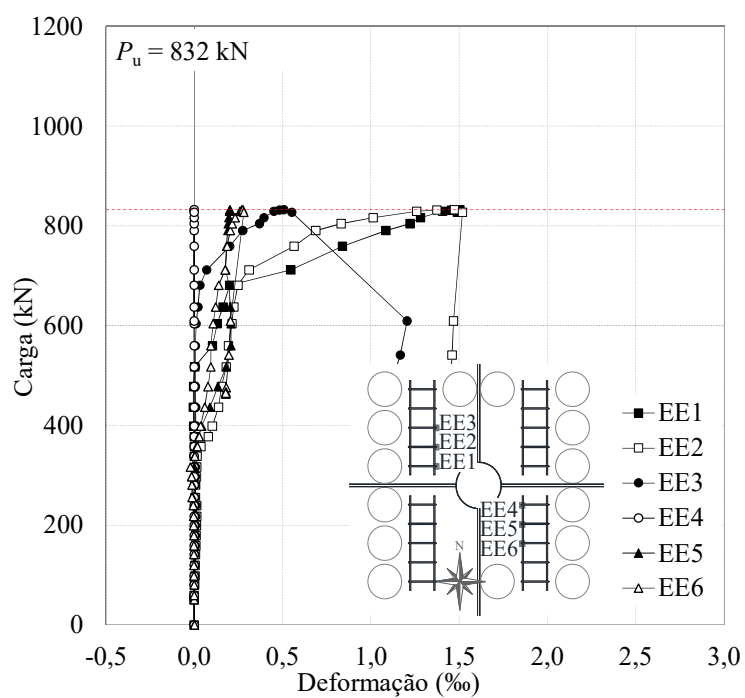


Figura 4.41 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da laje BD2

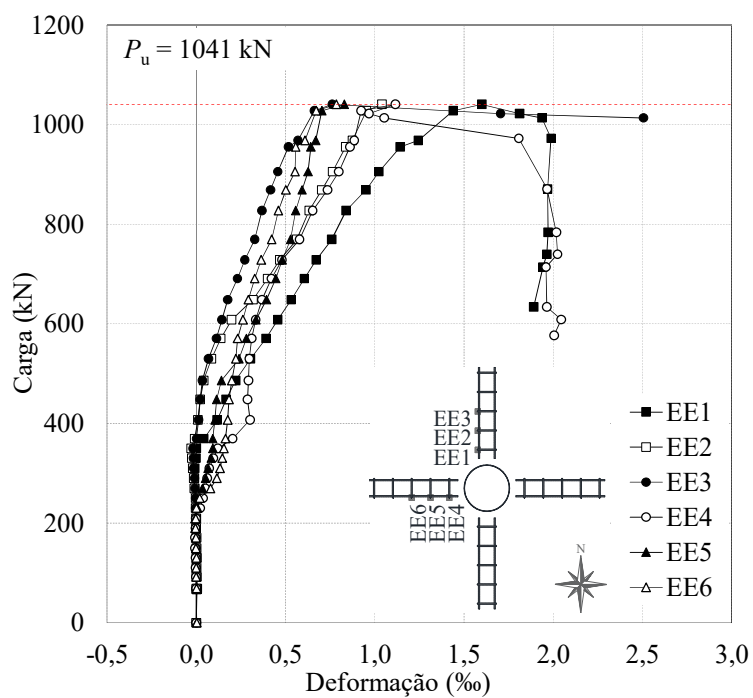


Figura 4.42 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da laje SS1

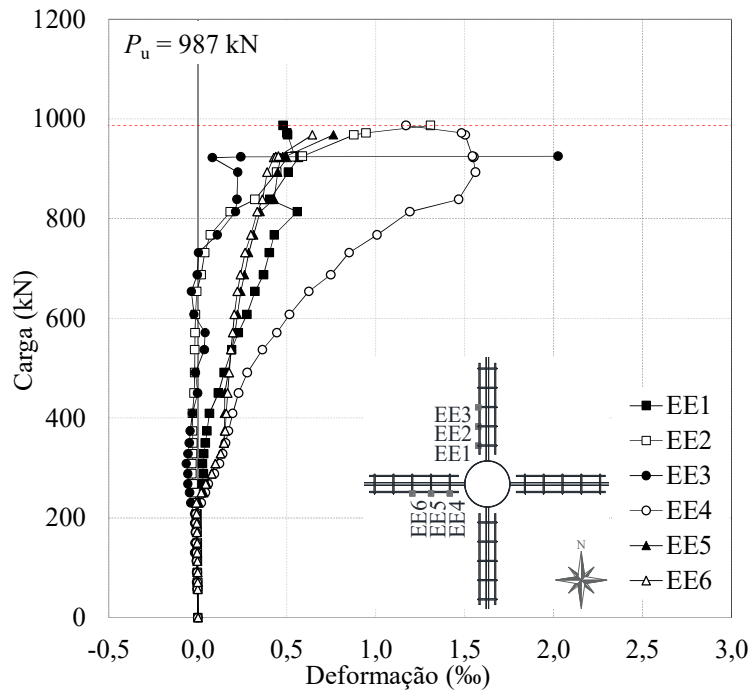


Figura 4.43 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da laje SS2

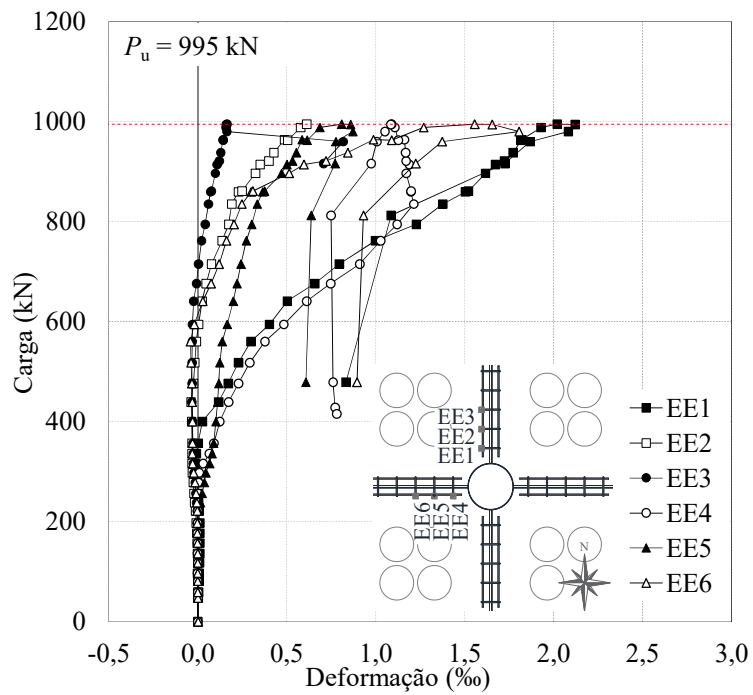


Figura 4.44 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da laje BD3

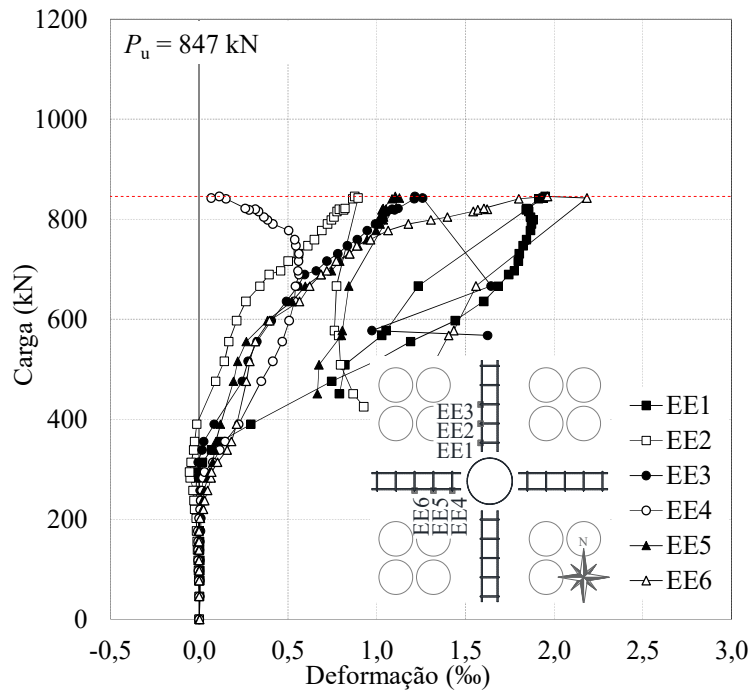


Figura 4.45 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da laje BD4

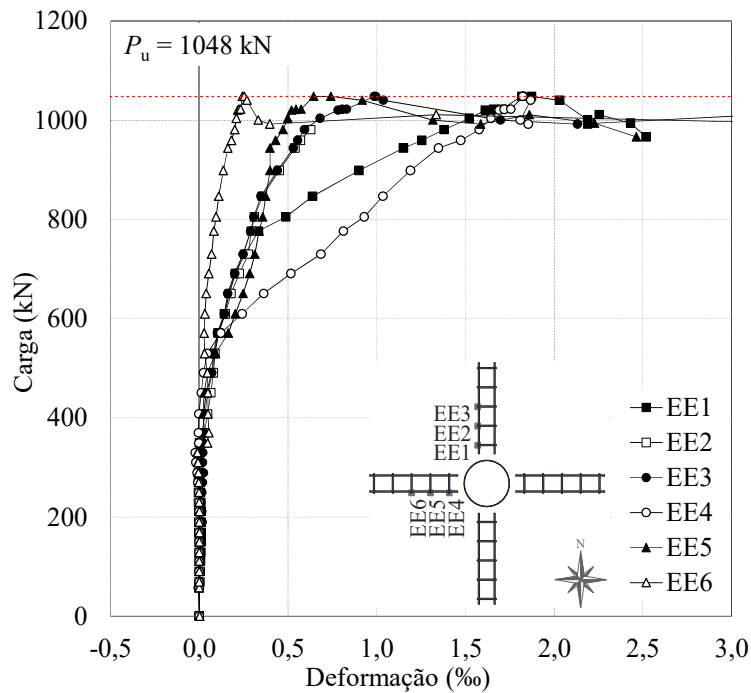


Figura 4.46 – Deformações nas armaduras de cisalhamento da laje SS1 3ª Série

Na Figura 4.47 estão apresentados os resultados das deformações do extensômetro EE1 para as lajes do grupo de análise, dos quais se nota um comportamento similar entre lajes com a mesma disposição de esferas. As deformações mais significativas foram observadas nas lajes do Grupo 3, tendo valor máximo de 2,02 % para laje BD3, não sendo registrado escoamento em nenhum caso.

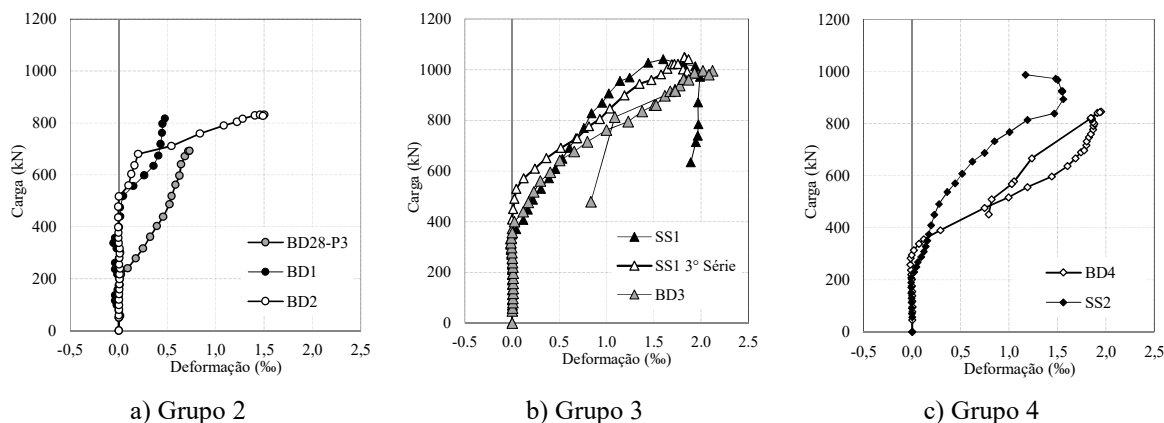


Figura 4.47 – Deformações nas armaduras de cisalhamento de todas as lajes

Para as lajes do Grupo 2 - com estribos posicionados entre as telas de aço, sem ancoragem na armadura de flexão principal e distribuídos em uma direção - a armadura foi pouco efetiva para baixos níveis de carregamento, sendo iniciada sua solicitação para cargas em torno de 500 kN (60% de P_u), com deformação máxima de 0,47 ‰ e 1,50 ‰ para laje BD1 e BD2, respectivamente. Para a laje BD28-P3 apesar das armaduras serem solicitadas para um menor nível de carga, 200 kN (29% de P_u) a deformação máxima foi baixa, 0,73 ‰. Estes dados indicam que o comportamento se deve à falta de ancoragem e distribuição da armadura.

Nas lajes do Grupo 4 – ancoragem parcial da armadura de cisalhamento – se utilizou de estribos fechados apoiados no pré-moldado e ancorados na armadura de flexão principal. Para estas lajes, a armadura de cisalhamento passou a ser efetiva em menores níveis de carga, cerca de 250 kN (27% de P_u), atingindo até 1,56 ‰ e 1,94 ‰ de deformação máxima para laje SS2 e BD4, respectivamente.

Analisando o Grupo 3 – ancoragem total da armadura de cisalhamento – onde os estribos foram posicionados a partir da face inferior da laje até o topo da armadura de flexão principal e distribuídos em forma de cruz, vê-se que os estribos começaram a ser solicitados para cargas superiores às do Grupo 4, em torno de 350 kN (35% de P_u), e as deformações máximas foram as maiores dentre todos tipos de estribos analisados, com 1,97 ‰, 1,87 ‰ e 2,12 ‰ para laje SS1, SS1 3ª Série e BD3, respectivamente.

Os dados apresentados nesta pesquisa indicam uma melhora de rendimento dos estribos conforme se otimiza gradualmente a forma de ancoragem, passando de sem ancoragem (Grupo 2), para ancoragem parcial (Grupo 4) e por fim ancoragem total (Grupo 3). Porém, pesquisas de ALBRECHT *et al.*, (2012) e BEUTEL (1999) relatam ser prática comum

disposições alternativas de armadura de cisalhamento que não envolvem completamente as barras de tração, mas facilitam a instalação de reforço, bem como aceleram a construção.

Adicionalmente, estudos realizados por PÉREZ CALDENTEY *et al.*, (2013) indicam que, apesar de não cumprir os requisitos específicos da maioria das normas de projeto, os estribos verticais que não ancoram diretamente nas armaduras longitudinais tracionadas, podem atuar como uma opção de reforço admissível, pois limitam a abertura da fissura crítica de cisalhamento.

4.2.6. Mapa de fissuração

Devido à simetria das lajes estudadas, o processo de mapeamento das fissuras foi realizado apenas na metade das lajes durante a realização dos ensaios, semiplano oeste. O processo consistiu na inspeção visual ininterrupta da face tracionada à medida que o carregamento aumentava continuamente.

Para cargas de até $\approx 70\%$ de P_u , confirmada a abertura de uma fissura, era assinalado na superfície da laje o ponto inicial e final desta e o nível de carga em que ocorreu. Nos estágios finais de carregamento, onde a laje se encontra com elevados níveis de degradação, não era possível realizar a marcação devido a velocidade com que se dava o surgimento de novas fissuras e abertura das existentes. Ao final do ensaio eram demarcadas as fissuras nos demais quadrantes e reforçada a demarcação no quadrante já assinalado.

Os mapas de fissuração das lajes são mostrados nas Figura 4.48 à Figura 4.58, cada figura apresenta o padrão de fissuração com o carregamento para níveis de carregamento pós-ruptura.

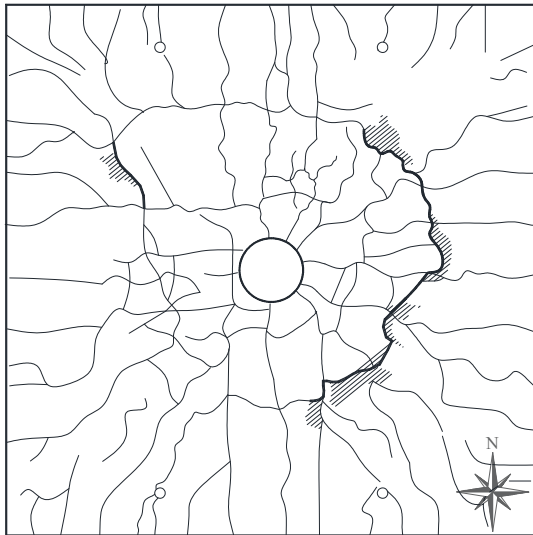


Figura 4.48 – Mapa de fissuração da laje RSP28

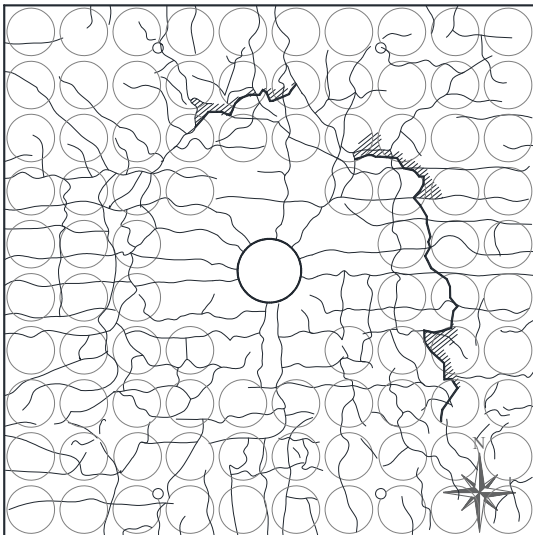


Figura 4.49 – Mapa de fissuração da laje BD28P1

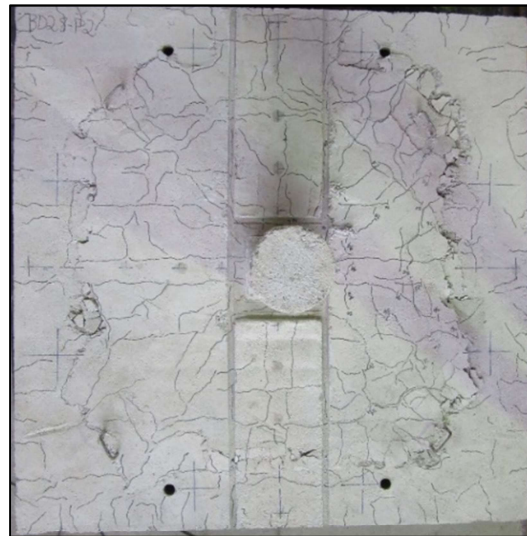
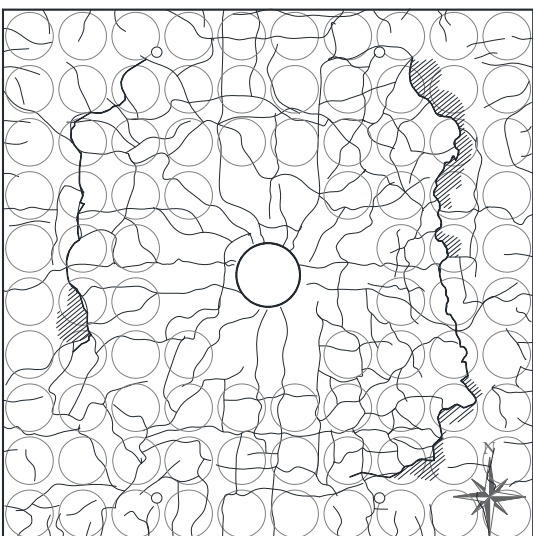


Figura 4.50 – Mapa de fissuração da laje BD28-P2

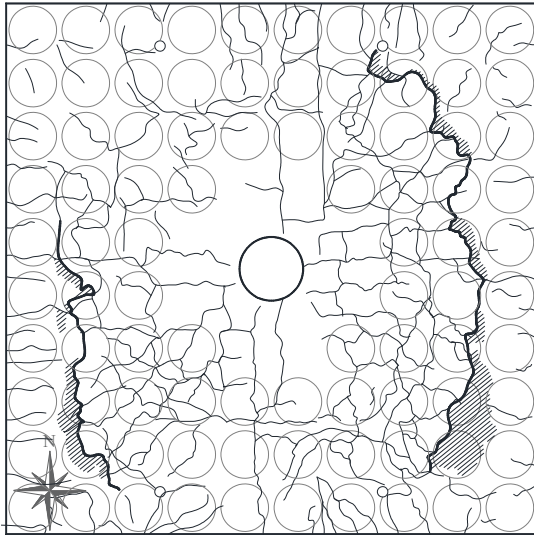


Figura 4.51 – Mapa de fissuração da laje BD28-P3

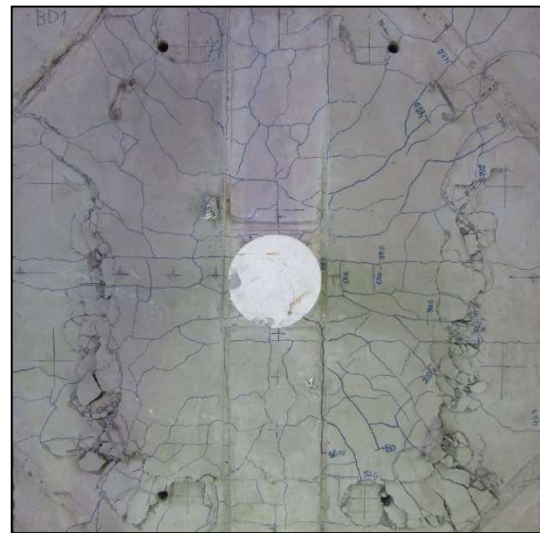
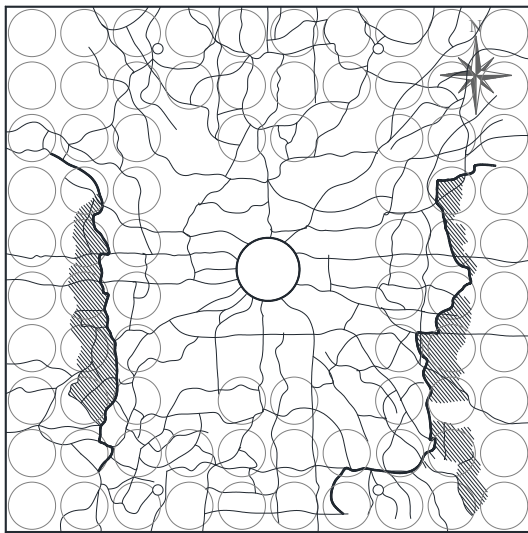


Figura 4.52 – Mapa de fissuração da laje BD1

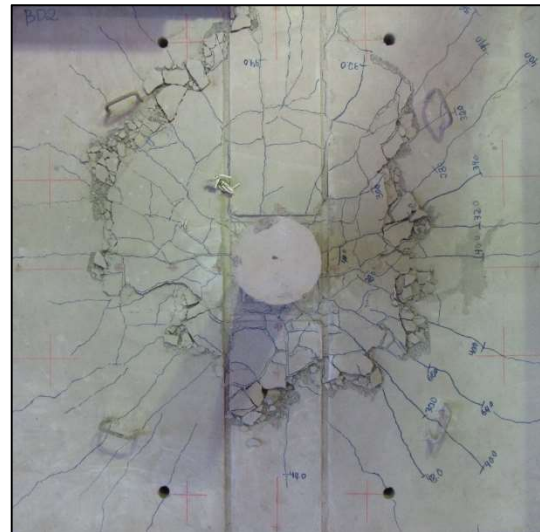
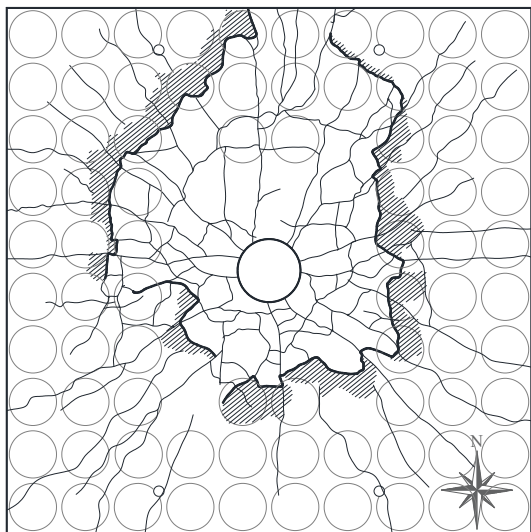


Figura 4.53 – Mapa de fissuração da laje BD2

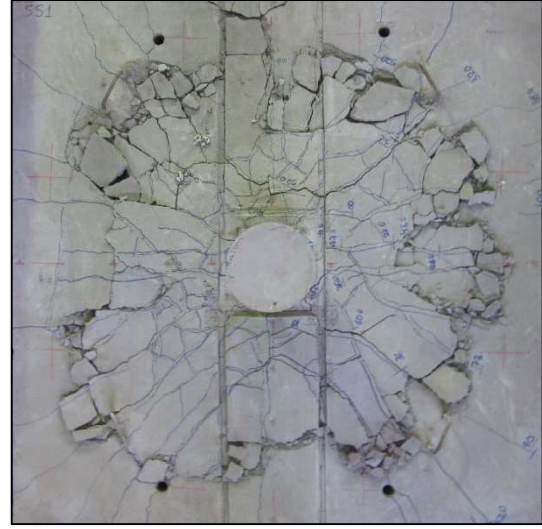
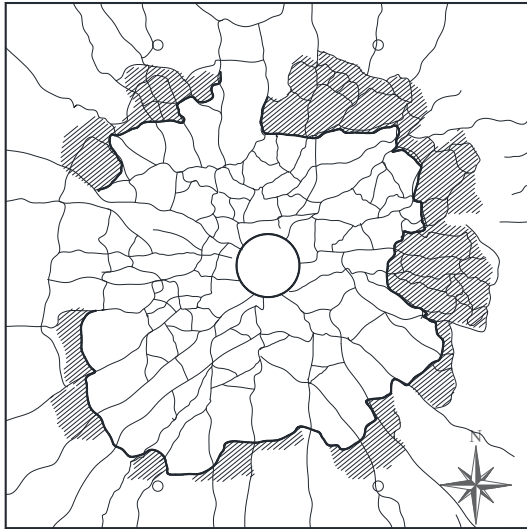


Figura 4.54 – Mapa de fissuração da laje SS1

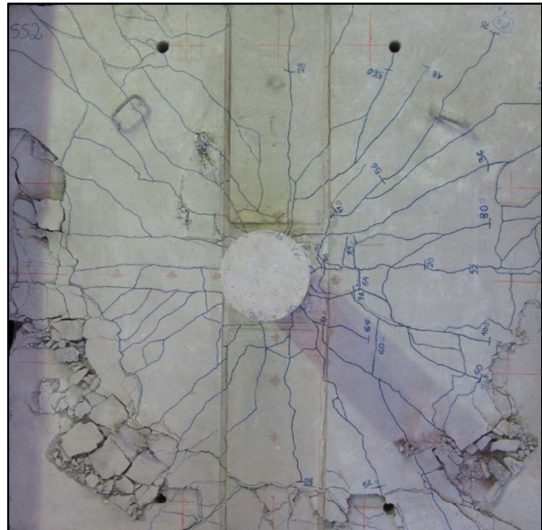
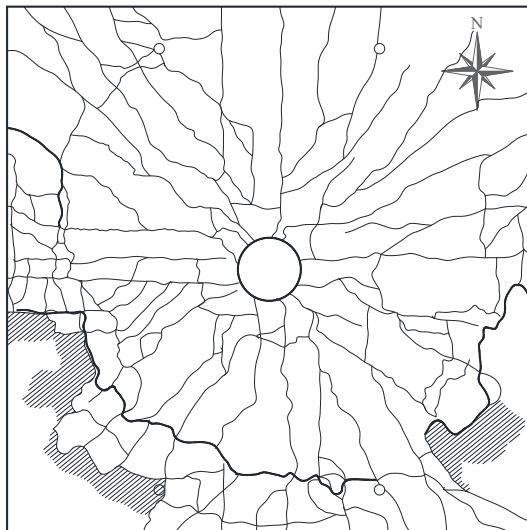


Figura 4.55 – Mapa de fissuração da laje SS2

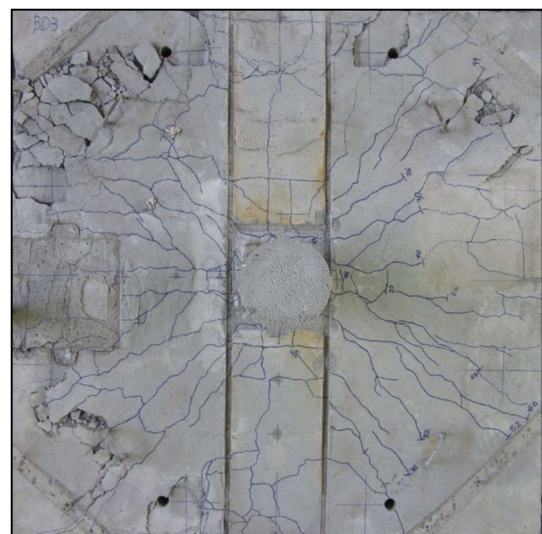
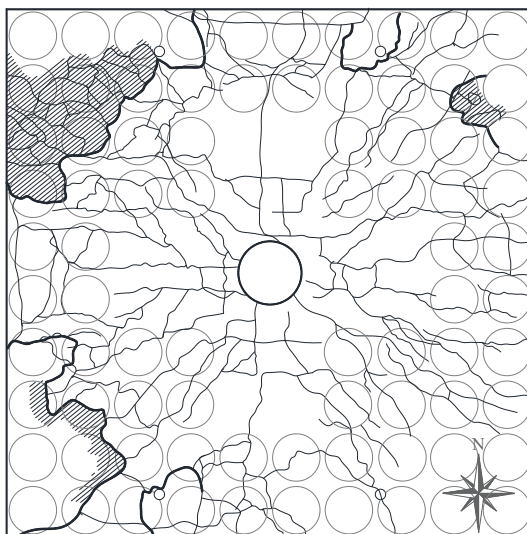


Figura 4.56 – Mapa de fissuração da laje BD3

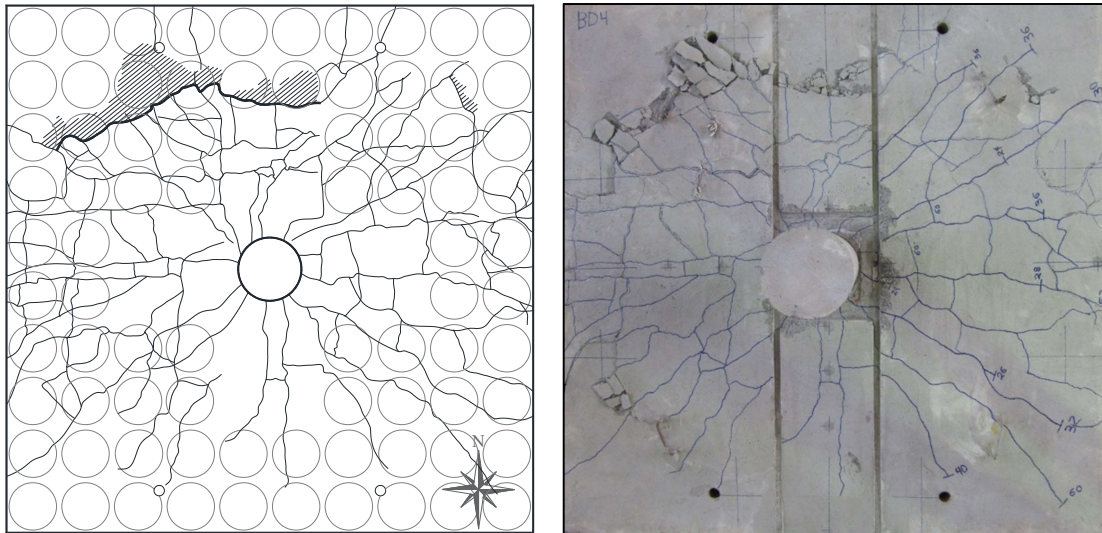


Figura 4.57 – Mapa de fissuração da laje BD4

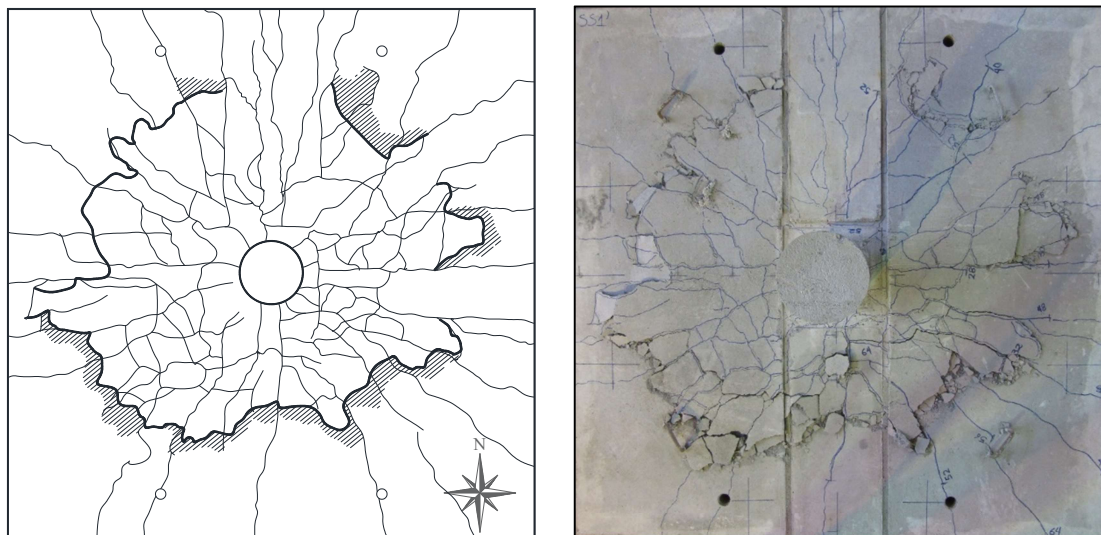


Figura 4.58 – Mapa de fissuração da laje SS1 3ª Série

Foi constatado que as lajes começaram a fissurar em um nível de carga médio de 28% de P_u e que estas se propagaram radialmente ao redor do pilar até em média 63~70% de P_u , momento este em que surgiram as primeiras fissuras tangenciais. Após este nível de carga, 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, confirmando-se a formação do tronco de cone ou tronco de pirâmide de punção, quando identificado.

Geralmente, para identificação do tronco de cone/pirâmide de punção recomenda-se cortar as lajes transversalmente. Para as lajes que este serviço não foi executado não é possível afirmar com segurança sua localização e inclinação. O que se pode dizer, com

base nos mapas de fissuração é que a conformação das fissuras visíveis na superfície superior do concreto sugere a formação do cone de punção em todas lajes ensaiadas.

4.2.7. Superfície de ruptura

Para identificação da superfície de ruptura e sua equivalente inclinação as lajes foram cortadas após os ensaios. Devido à simetria do carregamento apenas o quadrante Noroeste foi selecionado para este serviço, conforme esquematizado na Figura 4.59. De um total de 11 lajes foram selecionadas cinco lajes, sendo uma laje do Grupo 1, uma laje do Grupo 2, duas lajes do Grupo 3 e uma laje do Grupo 4 – laje BD28-P2, BD1, BD3, SS1 e BD4. O procedimento de corte das peças foi realizado pela empresa especializada HP Eletrotécnica, ver procedimento na Figura 4.60.

Nas Figura 4.61 a Figura 4.64 são apresentadas as seções das lajes que visam esclarecer a inclinação que a superfície de ruptura atinge a armadura superior das lajes. Para o caso das lajes *BubbleDeck* foi adicionada a inclinação desta superfície quando esta intercepta as esferas, para ambos os casos o ângulo de inclinação foi obtido a partir da superfície visualmente mais evidente.

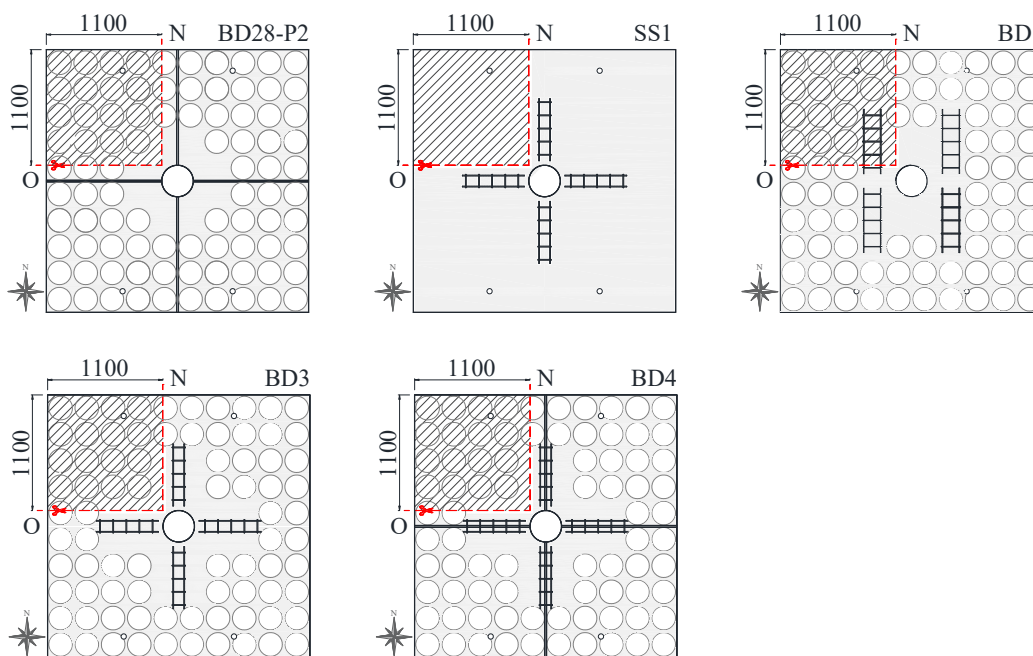


Figura 4.59 – Posição de corte das lajes



a) Posicionamento do equipamento

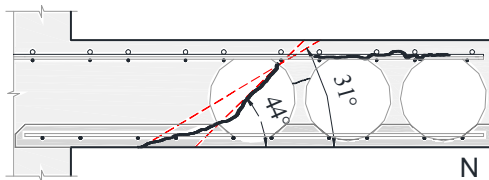


b) Execução do serviço de corte

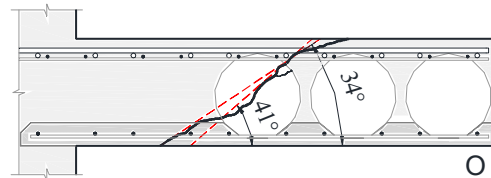


c) Lajes cortadas

Figura 4.60 – Serviço especializado de corte



a) Corte face Norte



b) Corte face Oeste



c) Visão geral do corte

Figura 4.61 – Secção de corte da laje BD28-P2.

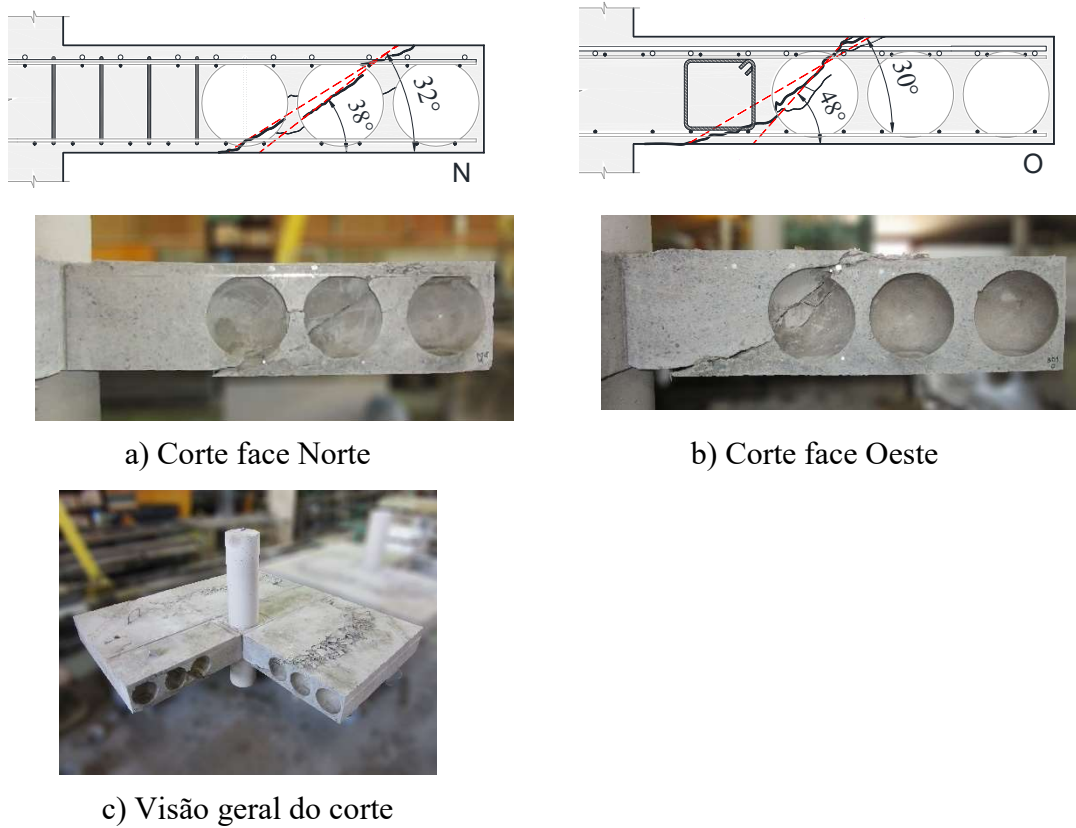


Figura 4.62 – Secção de corte da laje BD1.

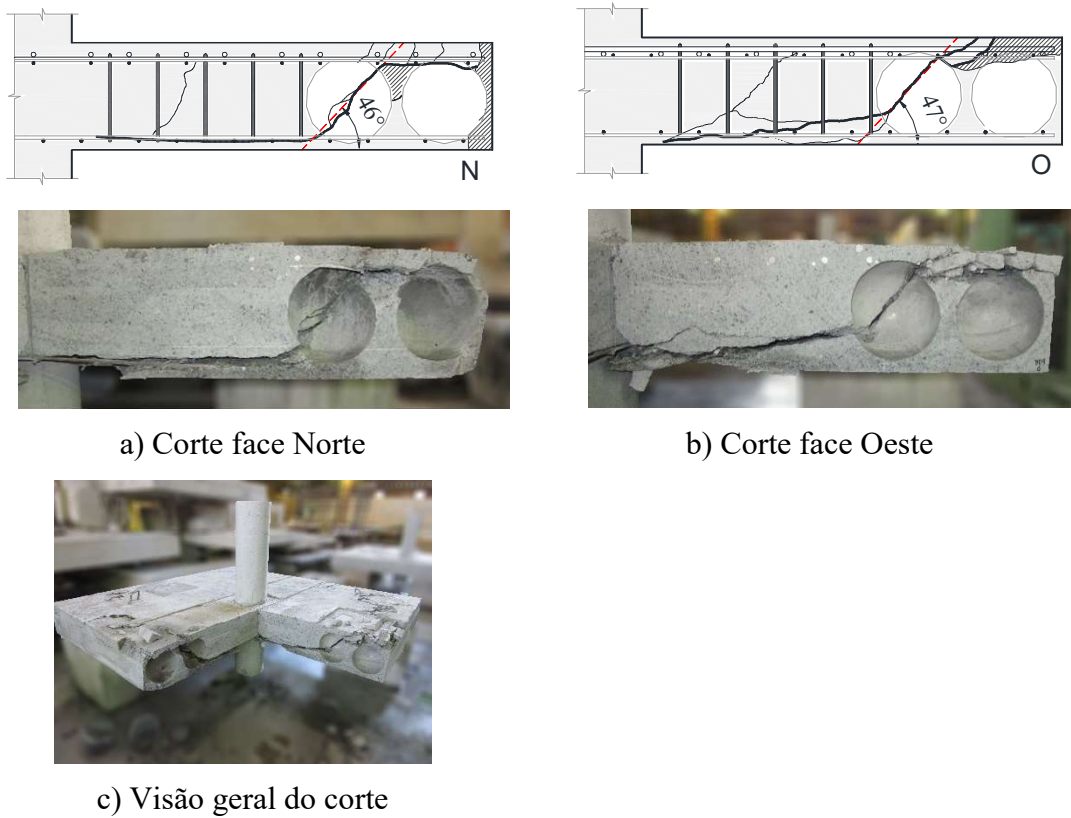


Figura 4.63 – Secção de corte da laje BD3.

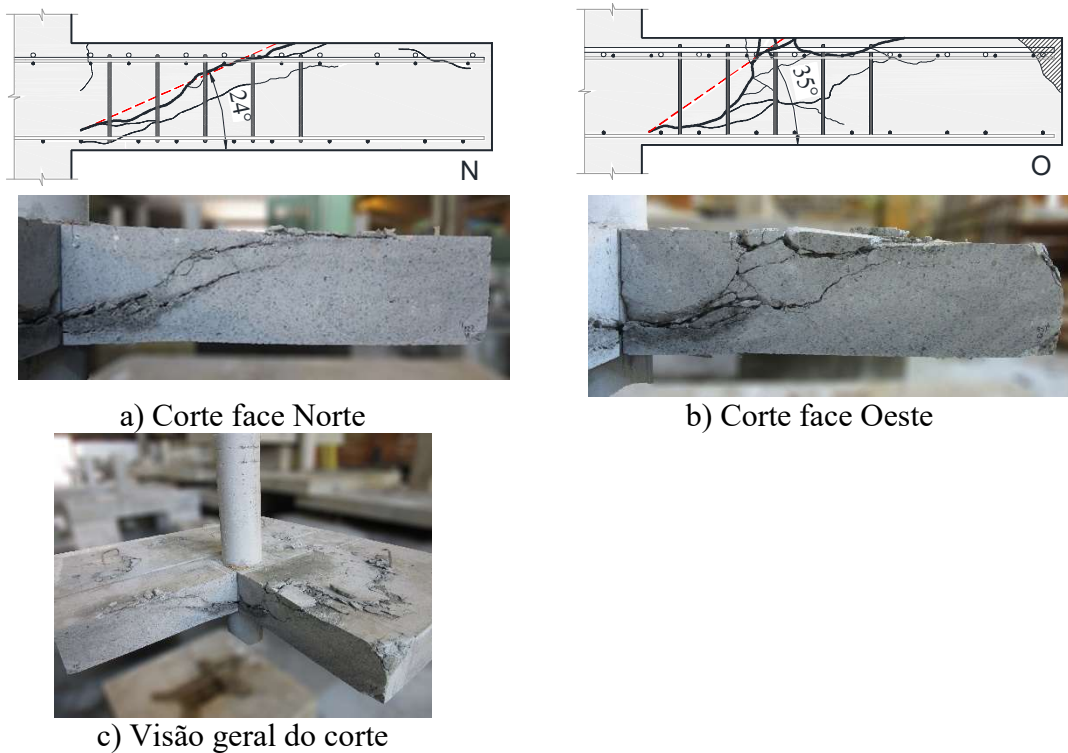


Figura 4.64 – Secção de corte da laje SS1 3ª Série.

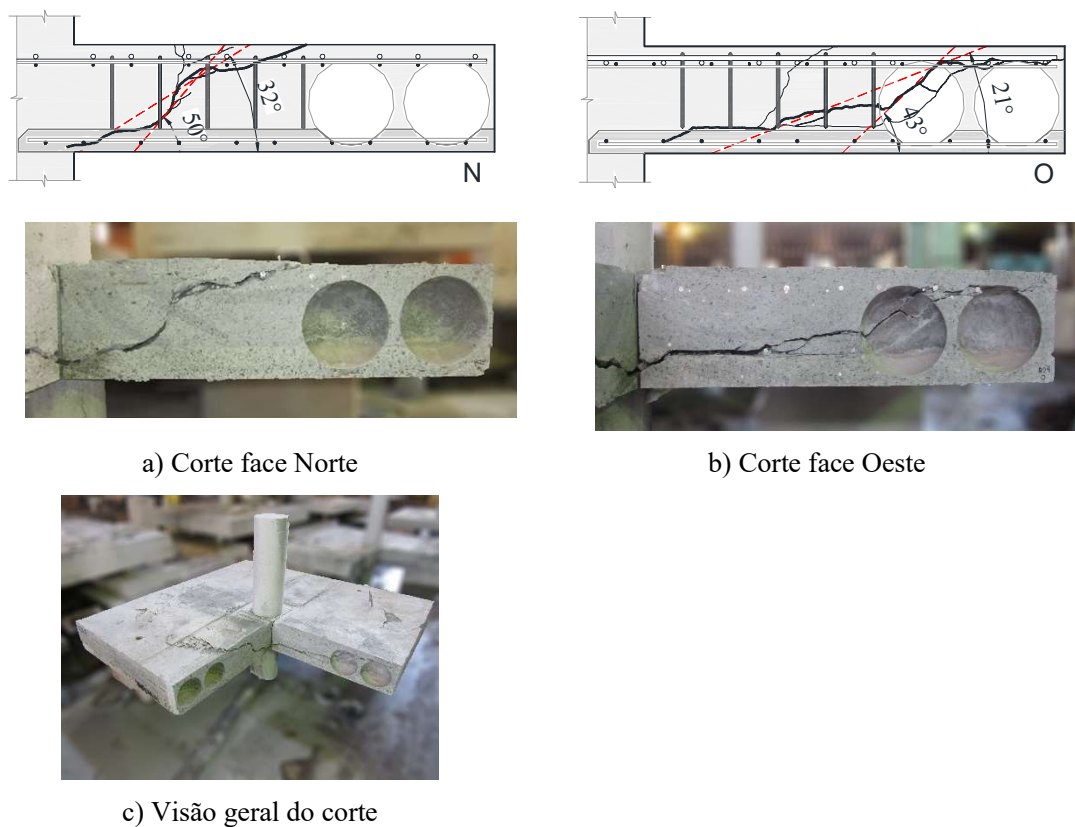


Figura 4.65 – Secção de corte da laje BD4

Na Tabela 4.6 se tem um resumo dos principais resultados, onde DT significa que a ruptura passa dentro da região armada ao cisalhamento; FR representa quando a ruptura

passa fora da região armada ao cisalhamento; NV quando a ruptura passa na nervura de lajes *BubbleDeck* sem armadura de cisalhamento; e DT/FR é uma ruptura assimétrica e passa por ambas as regiões, dentro e fora da área reforçada.

Tabela 4.6 – Inclinação das fissuras após o serviço de corte

| Laje | Superfície de Ruptura | Inclinação θ (°) | | Média θ (°) | Inclinação nas esferas φ (°) | | Média φ (°) |
|--------------|-----------------------|-------------------------|-------|--------------------|--------------------------------------|-------|---------------------|
| | | Norte | Oeste | | Norte | Oeste | |
| RSP28 | - | - | - | - | - | - | - |
| BD28 - P1 | NV* | - | - | - | - | - | - |
| BD28 - P2 | NV | 31 | 34 | 32,5 | 44 | 41 | 42,5 |
| BD28 - P3 | FR* | - | - | - | - | - | - |
| BD1 | FR | 32 | 30 | 31 | 38 | 48 | 43 |
| BD2 | DT/FR* | - | - | - | - | - | - |
| SS1 | DT/FR* | - | - | - | - | - | - |
| SS2 | FR* | - | - | - | - | - | - |
| BD3 | FR | 46 | 47 | 46,5 | 46 | 47 | 46,5 |
| BD4 | DT/FR | 32 | 21 | 26,5 | 50 | 43 | 46,5 |
| SS1 3ª Série | DT | 24 | 35 | 29,5 | - | - | - |

*Superfície de ruptura determinada visualmente a partir do mapa de fissuração.

Por meio dos serviços de corte das lajes foi possível identificar com precisão a inclinação da superfície de ruptura, uma vez que as demarcações na superfície superior da laje não representam a real base do tronco de cone de punção das lajes, mas sim a cobertura de concreto que foi sacada. Para as lajes *BubbleDeck* esse comportamento é mais evidente, uma vez que a fissura se estende na interface entre a cobertura de concreto e o topo da esfera até a borda da laje. Portanto, a real posição da superfície de ruptura, a ser determinada de forma exata pelo corte dos modelos, pode diferir daquela determinada de forma visual.

Para todas lajes, o ângulo de inclinação foi obtido a partir da superfície visualmente mais evidente, que se estende da face comprimida da laje até a superfície de tração. Para algumas lajes deste programa experimental, as fissuras iniciaram com determinada inclinação e sofreram variação ao longo da altura da laje. Essa variação se deu principalmente quando a fissura atingia as esferas ou a interface entre pré-laje e núcleo. Para as lajes *BubbleDeck* se nota uma tendência clara da superfície de ruptura passar pela primeira linha de esferas cruzada por ela, com uma inclinação média de 44,6°, o que é uma importante observação experimental que corrobora com dados de outros pesquisadores.

Para a laje do Grupo 1, BD28-P2, a superfície de ruptura estende-se da face comprimida até a armadura superior formando um ângulo médio de $32,5^\circ$, alterando sua inclinação quando passa pela esfera para $43,5^\circ$. A laje do Grupo 2, BD1, apresenta uma ruptura fora da região reforçada ao cisalhamento, a fissura parte da base da última camada de estribos e se estende pela esfera com uma inclinação de $43,0^\circ$.

As duas lajes do Grupo 3 – BD3 e SS1 – são as que apresentam de forma mais clara a inclinação média das fissuras, com valores de $43,5^\circ$ e $29,5^\circ$, respectivamente. Com posição de ruptura fora da região com armadura de cisalhamento para a laje BD3 e ruptura passando dentro da área reforçada pela laje SS1.

A laje do Grupo 4 – BD4 – apresentou um comportamento particular em relação às demais, apresentando uma ruptura assimétrica. Para este modelo, a posição da superfície de ruptura foi caracterizada como passando dentro da região armada ao cisalhamento na orientação Norte e fora desta região na direção Oeste. O ângulo médio para esta superfície de ruptura foi de $46,5^\circ$ na região com esferas.

Na direção Norte da laje BD4 a ruptura se iniciou na face comprimida e se estendeu diretamente até a face superior, já para a direção Oeste se vê uma separação clara na interface pré-laje e núcleo central de concreto. Isto pode ser explicado pela disposição das treliças, que tem como uma de suas funções garantir aderência total da concretagem. Esses elementos foram dispostos em planta na direção Sul-Norte, ver esquema na Figura 4.66, portanto nesta direção foi mais efetiva garantindo aderência entre os concretos lançados. Na direção Oeste, a treliça não contribuiu para aderência da mesma maneira e a fissura desenvolveu um caminho preferencial na interface pré-laje e núcleo, alterando a direção a partir da última camada de armadura de cisalhamento. Para melhor entendimento, na Figura 4.66 é possível visualizar as seções de corte das lajes com a treliça sobreposta.

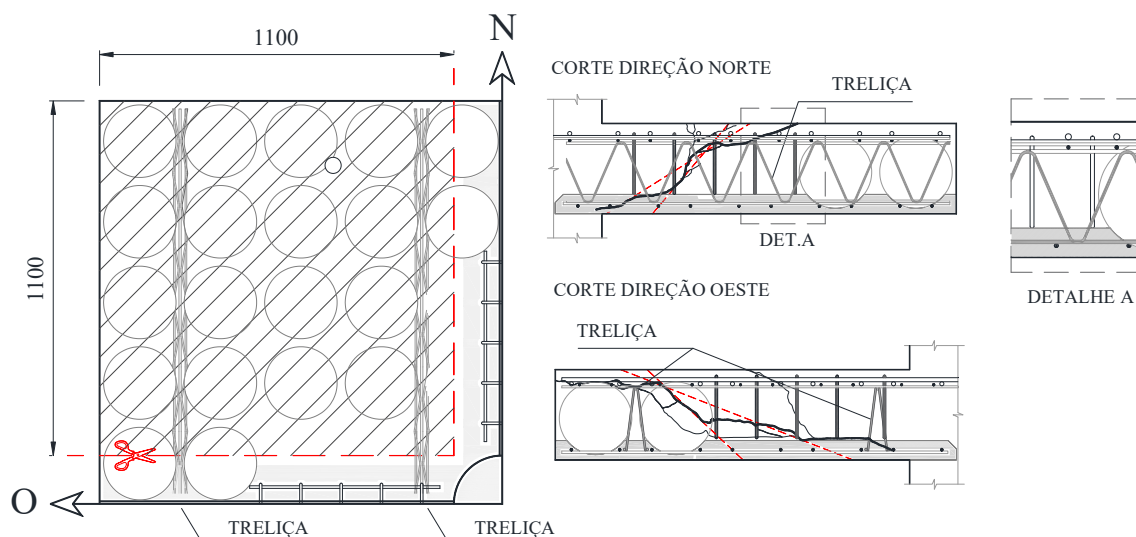


Figura 4.66 – Detalhe da seção de corte da laje BD4.

4.2.8. Modo de ruptura

A classificação do modo de ruptura das lajes foi realizada segundo a observação do comportamento das lajes durante os ensaios, levando-se em consideração: O deslocamento, observando se as lajes que apresentaram perda na capacidade portante ou mantiveram o mesmo nível de carga até o fim dos ensaios; deformação no concreto na direção radial e tangencial, verificando deformações tangenciais próximas à de esmagamento do concreto ou radiais que apresentam o comportamento indicado por MUTTONI (2008) de deformações de tração na face inferior da laje; deformação nas armaduras de flexão para avaliar seu grau de solicitação; mapa de fissuração; superfície de ruptura das lajes; e por fim, foi comparada a carga última experimental (V_u) com a carga resistente à flexão (V_{flex}), calculada utilizando o método das linhas de ruptura.

Foram definidos basicamente dois modos de ruptura: punção e flexo-punção. O critério de determinação do modo de ruptura por punção foi estabelecido atribuindo maior relevância a visualização do cone de punção, que ocorre de forma brusca. A ruptura por flexo-punção foi definida de acordo com os critérios de OLIVEIRA (2003) como sendo o modo onde as lajes apresentam um ou mais das seguintes características: predominância das fissuras de flexão, rotações elevadas, deformações nas armaduras de flexão superiores à de escoamento do aço utilizado, e cargas últimas próximas das cargas estimadas para ruptura por flexão.

Na Tabela 4.7 apresenta-se uma síntese dos principais dados experimentais que influenciaram no modo de ruptura das lajes e sua classificação final.

Tabela 4.7 – Classificação do modo de ruptura das lajes

| Série | Modelos | Deformação (%) | | | | | | | | V_u (kN) | V_{flex} (kN) | V_u / V_{flex} | Nível de Fissuração Radial* | Superfície de Ruptura | Modo de Ruptura |
|----------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------|------|----------|--------|---------------|--------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------|
| | | Armadura de flexão | | | | | | Concreto | | | | | | | |
| | | EF1 | EF2 | EF3 | EF4 | EF5 | EF6 | Tang. | Radial | | | | | | |
| 1ª Série | RSP28 | 2.79 | 2.92 | 2.81 | - | 2.01 | - | -1.81 | 0.11 | 855 | 1404 | 0.61 | 27% | - | Punção |
| | BD28 - P1 | 2.01 | 1.88 | 1.65 | - | 1.35 | - | -0.70 | -0.04 | 639 | 1413 | 0.45 | 28% | NV | Punção |
| | BD28 - P2 | >> ϵ_{ys} | 3.33 | 2.60 | - | 2.17 | - | -1.47 | -0.27 | 648 | 1418 | 0.46 | 24% | NV | Punção |
| | BD28 - P3 | 2.77 | 2.69 | 2.64 | - | 1.96 | - | -1.16 | -0.15 | 693 | 1418 | 0.49 | 24% | FR | Punção |
| 2ª Série | BD1 | 2.73 | 2.86 | 2.63 | 2.43 | 1.90 | 1.60 | -1.31 | -0.16 | 817 | 1358 | 0.60 | 29% | FR | Punção |
| | BD2 | 5.18 | 5.94 | 5.50 | 2.99 | 2.36 | 2.12 | -1.84 | 0.05 | 833 | 1374 | 0.61 | 26% | DT/FR | Punção |
| | SS1 | >> ϵ_{ys} | >> ϵ_{ys} | 5.99 | 5.44 | 3.27 | 3.14 | -1.91 | -0.14 | 1041 | 1346 | 0.77 | 32% | DT/FR | Flexo-Punção |
| | SS2 | >> ϵ_{ys} | >> ϵ_{ys} | >> ϵ_{ys} | >> ϵ_{ys} | 3.74 | 2.87 | -1.37 | 0.15 | 987 | 1364 | 0.72 | 25% | FR | Flexo-Punção |
| 3ª Série | BD3 | >> ϵ_{ys} | >> ϵ_{ys} | 4.93 | 3.49 | 2.93 | 2.55 | -2.26 | 0.63 | 995 | 1361 | 0.73 | 24% | FR | Flexo-Punção |
| | BD4 | 5.01 | 5.90 | 3.00 | 2.30 | 1.81 | 2.07 | -1.60 | 0.01 | 846 | 1374 | 0.62 | 33% | DT/FR | Punção |
| | SS1 3ª Série | >> ϵ_{ys} | >> ϵ_{ys} | >> ϵ_{ys} | 3.11 | 3.36 | 2.71 | -2.43 | -0.35 | 1048 | 1355 | 0.77 | 31% | DT | Flexo-Punção |

*O nível de fissuração radial foi baseado na alteração da rigidez inicial da curva carga-deformação das armaduras de flexão principal.

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

5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS MODELOS DE ENSAIO

Para verificar os resultados experimentais apresentados nesta pesquisa e para uma melhor compreensão do comportamento dos modelos de laje lisas, foram gerados modelos tridimensionais de elementos finitos de todas lajes. O programa FEMIX 4.0 foi empregado para simular o comportamento das lajes *BubbleDeck* e maciças. Neste capítulo são detalhadas as propriedades dos materiais utilizados, as condições de contorno, a interação entre os constituintes e a comparação dos resultados experimentais com as simulações numéricas.

5.1. PROGRAMA FEMIX 4.0

FEMIX é um programa de computador baseado no método de elementos finitos que começou a ser desenvolvido em 2000 por Álvaro Azevedo, Joaquim Barros e José Sena Cruz. A partir de 2002 passou a contar com a colaboração de outros autores e, ao longo dos anos, tem sido validado em diversas publicações (BARROS *et al.*, 2017; SENA CRUZ, 2004; TEIXEIRA *et al.*, 2015; VENTURA GOUVEIA, 2011).

O FEMIX tem uma grande biblioteca de tipos de elementos disponíveis, nomeadamente: os elementos sólidos tridimensionais, casca de Mindlin e de Ahmad, elementos de placas e diversos outros elementos de barra com ou sem deformação por esforço transversal. Esta biblioteca de elementos finitos é complementada por um conjunto de pontos, linhas e superfícies de molas que modelam o contato elástico com os apoios e também alguns tipos de elementos de interface para modelar o contato entre elementos. Elementos de linha embebidos podem ser adicionados a outros tipos de elementos para modelar armaduras e barras de reforço. Todos esses tipos de elementos podem ser incluídos simultaneamente na mesma análise.

A análise pode ser estática ou dinâmica e o comportamento do material pode ser linear ou não linear. Na mesma análise não linear, vários modelos não-lineares podem ser considerados simultaneamente, permitindo a combinação de concreto armado com armadura e elementos de reforço, que apresentam leis constitutivas não lineares distintas. Elementos de interface com leis de atrito apropriadas e molas não-lineares também podem ser considerados simultaneamente. No FEMIX 4.0 podem ser efetuadas simulações não lineares por controle de força ou deslocamento. Neste trabalho foi utilizado controle de deslocamento para as simulações efetuadas.

O programa está estruturado em três módulos, no primeiro, denominado Prefemix, se faz a leitura/validação de um arquivo de texto, seguida da gravação de arquivos binários com a informação já validada. No segundo, denominado Femix, são lidos os referidos arquivos binários, feito o cálculo dos resultados com base no MEF e gravação de arquivos binários contendo todos os resultados desta fase, que pode ser linear ou não linear. Por fim no módulo Posfemix são gerados diversos tipos de resultados com base na informação proveniente dos módulos anteriores. (AZEVEDO e BARROS, 2000).

A seguir serão tratadas as leis que governam o comportamento físico dos materiais envolvidos nas análises.

5.2. MODELOS CONSTITUTIVOS

No FEMIX para representação dos materiais, foram utilizados os elementos não-lineares `_NLMM111` para o concreto, `_NLMM201` para as armaduras de aço e o `_NLSMM102` para os elementos pontuais de mola. As cargas foram aplicadas com o recurso `FACE_LOADS`. A descrição completa destes modelos pode ser encontrada nas pesquisas de SENA-CRUZ (2004) e VENTURA GOUVEIA (2011). Aqui é fornecida uma breve descrição deste modelo para uma compreensão abrangente sobre as análises realizadas e os valores adotados para seus parâmetros.

5.2.1. Concreto

Para simular o comportamento de estruturas de concreto no FEMIX, utilizou-se o modelo *3D multidirectional fixed smeared crack model* (MDFSCM), exposto de forma completa no trabalho de VENTURA GOUVEIA (2011). A descrição do MDFSCM é restrita ao caso do concreto fissurado, no domínio de um ponto de integração (IP) de um elemento finito. De acordo com MDFSCM os vetores de deformação no concreto são dados pela Equação 5.1.

$$\Delta \underline{\varepsilon} = \Delta \underline{\varepsilon}^{co} + \Delta \underline{\varepsilon}^{cr} \quad \text{Equação 5.1}$$

onde $\Delta \underline{\varepsilon}$, $\Delta \underline{\varepsilon}^{co}$ e $\Delta \underline{\varepsilon}^{cr}$ são os vetores de deformação incremental no concreto fissurado, no concreto intacto e na fissura distribuída, respectivamente. A lei constitutiva no concreto fissurado é indicada na Equação 5.2.

$$\Delta \underline{\sigma} = \left(\underline{D}^{co} - \underline{D}^{co} \left[\underline{T}^{cr} \right]^T \left(\underline{D}^{cr} + \underline{T}^{cr} \underline{D}^{co} \left[\underline{T}^{cr} \right]^T \right)^{-1} \underline{T}^{cr} \underline{D}^{co} \right) \Delta \underline{\varepsilon} \quad \text{Equação 5.2}$$

onde \underline{D}^{co} é a matriz constitutiva de acordo com a lei de Hooke, dependente do Módulo de elasticidade (E_c) e coeficiente de poisson (ν_c), \underline{T}^{cr} é a matriz de transformação entre entidades no sistema de coordenada das fissuras formadas no ponto de integração IP (diversas fissuras podem ser formadas no MDFSCM, de acordo com o critério adotado para sua formação) e o sistema global de coordenadas (ver Figura 5.1), e \underline{D}^{cr} representa a matriz constitutiva nas fissuras formadas no IP, conforme Equação 5.3.

$$\underline{D}^{cr} = \begin{bmatrix} D_n^{cr} & 0 & 0 \\ 0 & D_{t_1}^{cr} & 0 \\ 0 & 0 & D_{t_2}^{cr} \end{bmatrix} \quad \text{Equação 5.3}$$

onde D_n^{cr} , $D_{t_1}^{cr}$ and $D_{t_2}^{cr}$ representa, respectivamente, a fratura em modo I (na direção \hat{n} , normal ao plano da fissura), modo II (na direção de deslizamento \hat{t}_1) e modo III (na direção de deslizamento \hat{t}_2) conforme representado na Figura 5.1. No modelo do concreto adotado entre fissuras é assumido um comportamento linear elástico, o que é aceitável para modelar o comportamento de lajes que falham em punção [BARROS (2016); BARROS *et al.* (2015)].

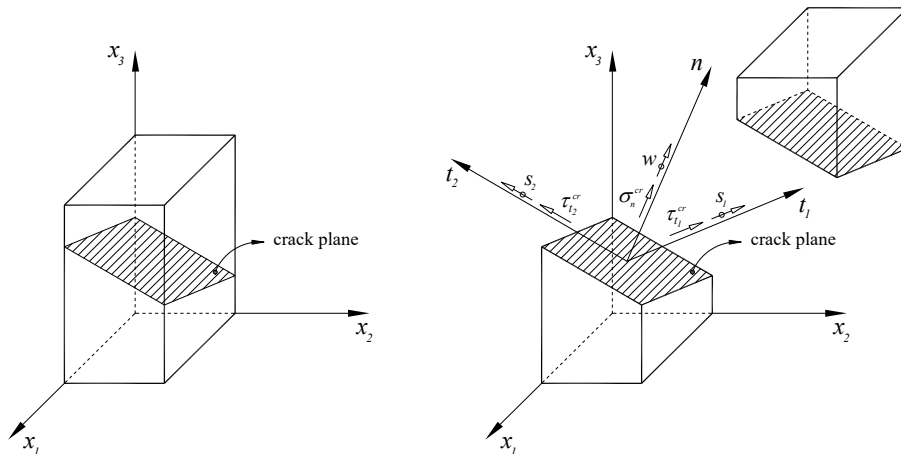


Figura 5.1 – Componentes de tensão, deslocamento e sistema de coordenadas local na fissura (para simplificar a representação, foi assumida somente uma fissura no IP).

Para modelar a fratura em módulo I, D_n^{cr} , o diagrama multilinear representado na Figura 5.2a foi utilizado, onde f_{ct} é a resistência à tração do concreto, G_f é a energia de

fratura do concreto em modo I, e l_b representa o comprimento da porção representativa do material no IP, onde G_{fl} é dissipado, numa tentativa de fornecer resultados independentes do refinamento da malha de elementos finitos (EF). Na presente simulação numérica l_b foi considerado igual a $\sqrt[3]{V_{IP}}$, onde V_{IP} é o volume no ponto de integração. Para modelar as componentes de cisalhamento na fissura ($D_{l_1}^{cr}$ e $D_{l_2}^{cr}$) foi adotado o diagrama *crack shear softening*, mostrado na Figura 5.2b.

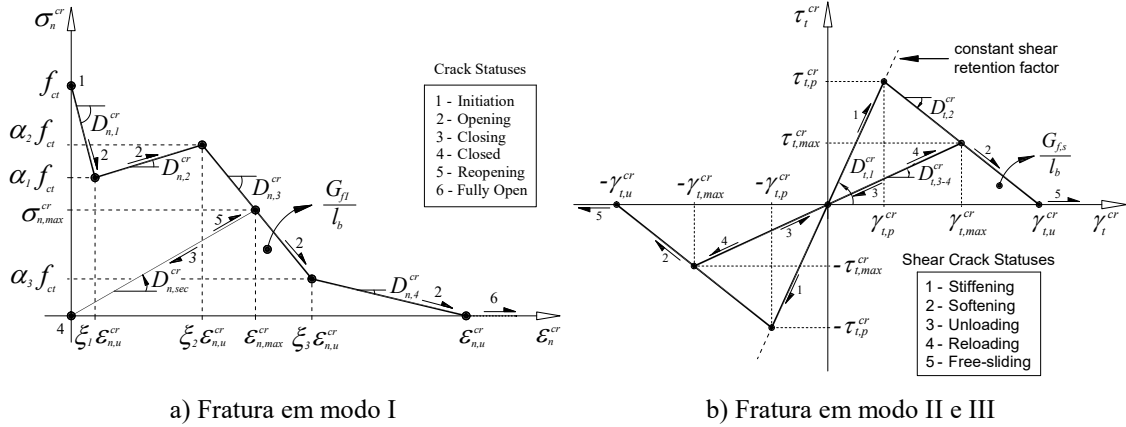


Figura 5.2 – Diagrama para simular o processo de fissuração.

Onde o modo de fratura em cisalhamento, $D_{l_i}^{cr} = \beta / (1 - \beta) G_c$, depende do valor atribuído ao fator de retenção de cisalhamento, $\beta \in]0, 1[$, e do módulo de cisalhamento no concreto elástico, $G_c = E_c / (2(1 + \nu_c))$. Outros parâmetros são a resistência ao cisalhamento na fissura, $\tau_{t,p}^{cr}$, a energia de fratura em modo II e III, $G_{f,s}$, (considerada igual para ambos modos), e o fator *crack band width*, na nomenclatura inglesa (assumido igual a aproximação adotada para definir l_b para a energia de fratura em modo I).

5.2.2. Aço

As barras de aço longitudinais são perfeitamente aderidas ao concreto por *embedding 3D two-node cable elements*. O comportamento à tração da armação longitudinal é representando no modelo da Figura 5.3. O comportamento da curva sobre tração e compressão é definido pelos pontos $PT1 = (\epsilon_{sy}, \sigma_{sy})$, $PT2 = (\epsilon_{sh}, \sigma_{sh})$ e $PT3 = (\epsilon_{su}, \sigma_{su})$, e pelo parâmetro p que define a forma do último braço da curva. Um braço linear de descarregamento e recarregamento, $E_s = \sigma_{sy} / \epsilon_{sy}$, é assumido nesta aproximação.

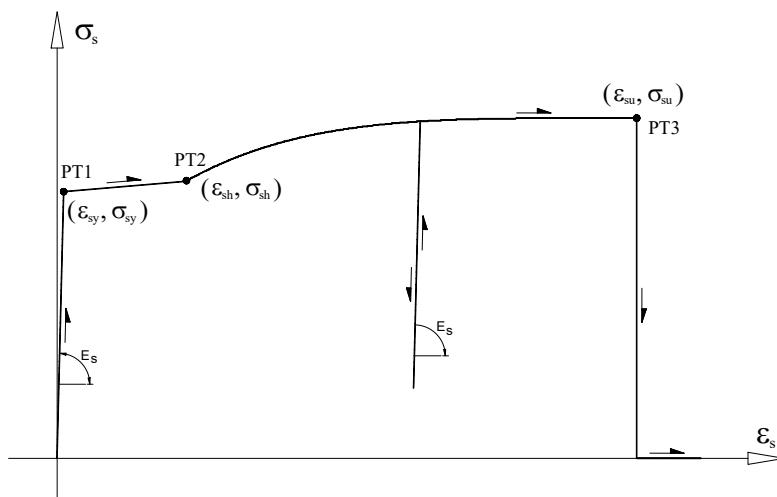


Figura 5.3 – Modelo constitutivo uniaxial para barras de aço.

5.2.3. Elementos pontuais de mola (*Point Spring*)

Sob o pilar foram utilizados elementos pontuais de mola com relação constitutiva não linear, cujo objetivo foi simular acomodação do pilar no início dos ensaios. A Figura 5.4 representa o diagrama bi-linear exponencial atribuído aos elementos *point spring*. Este diagrama é definido por três pontos e pelo parâmetro p usado na definição do terceiro ramo. Quando um valor unitário é atribuído a este parâmetro, o terceiro ramo é linear.

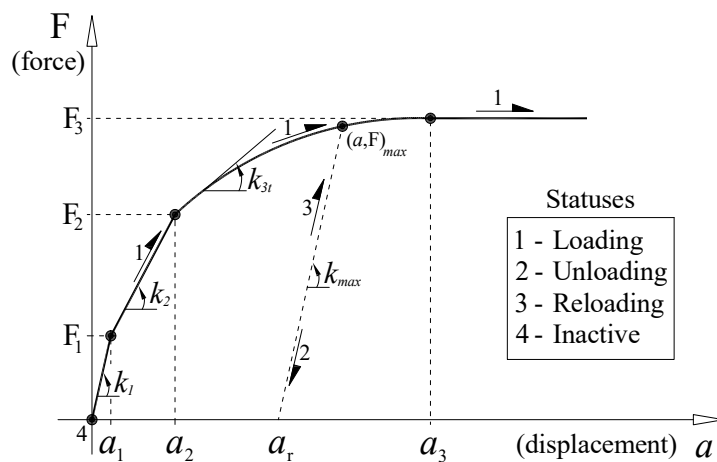


Figura 5.4 – Diagrama bilinear-exponencial força deslocamento.

5.3. DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Para geração da malha e visualização dos resultados numéricos foi utilizado o software GiD, versão 11.1.9d. O GiD é um pré e pós processador universal para simulações numéricas em ciência e engenharia, foi projetado para cobrir as necessidades no campo de simulação numérica do pré ao pós processamento, como: modelagem geométrica, definição efetiva de dados de análise, geração de malha, transferência de dados para software de análise, bem como a visualização de resultados numéricos.

No software FEMIX apenas é permitida a modelagem de elementos sólidos 3D utilizando elementos hexaédricos de 8 ou 20 nós, portanto para representação dos vazios deixados pelas esferas *BubbleDeck* foi necessário realizar uma simplificação de sua forma perfeitamente esférica com 225 mm de diâmetro, ver Figura 5.5a, para uma forma equivalente com elementos hexaédricos, conforme representado na Figura 5.5b. Desta forma, na geração da malha com o programa GiD, os elementos hexaédricos foram modelados com formato cúbico com 22,5 mm de lado e superpostos um ao outro, conformando assim um volume que se aproxima da forma de uma esfera, ver representação na Figura 5.5c.

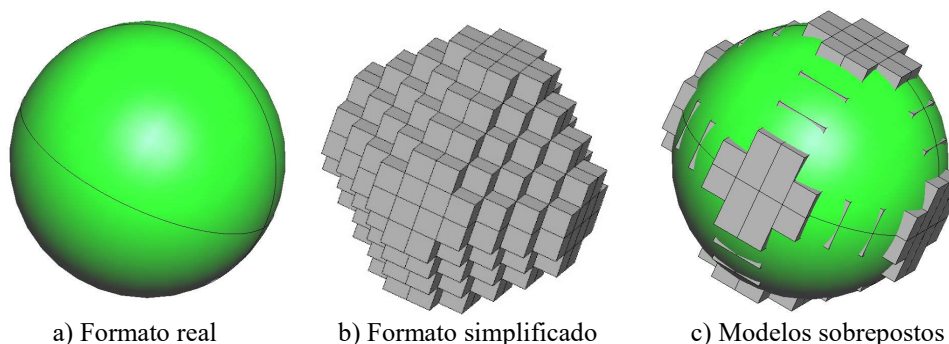


Figura 5.5 – Modelagem dos vazios

O modelo de elementos finitos, a carga e as condições de apoio usadas na simulação numérica do ensaio de punção das lajes *BubbleDeck* e maciça são mostradas na Figura 5.6 à Figura 5.8. Em ambos os modelos somente um quarto do painel é usado na simulação, devido à dupla simetria. As figuras representam tanto os apoios adotados na configuração experimental quanto os usados para garantir as condições de simetria. Foram excluídas do modelo numérico as seções superior e inferior do pilar além da armação de flexão da face inferior das lajes após testes que comprovaram sua baixa influência nos resultados.

Para a modelagem do concreto das lajes *BubbleDeck* foi utilizado elemento sólido hexaédrico de 8 nós e para lajes maciças se optou por elementos sólidos hexaédricos de 20 nós. Todas as armaduras de aço foram moldadas com o elemento de barra *Embedded Cable 3D*. No total se utilizou em torno de 42 mil elementos e 50 mil nós para lajes *BubbleDeck* e 5,8 mil elementos com 22 mil nós para lajes maciças.

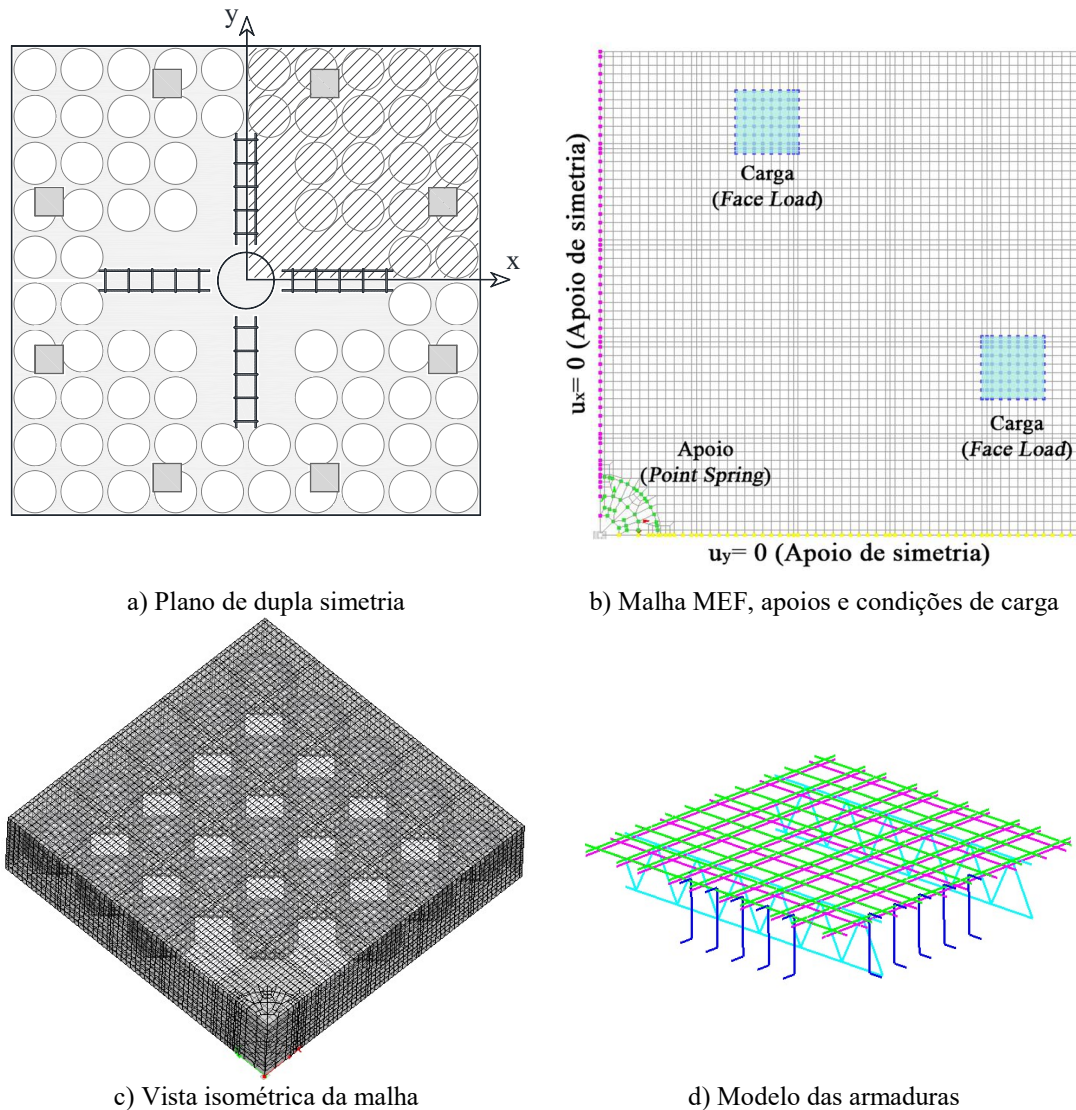


Figura 5.6 – Modelo das lajes *BubbleDeck*

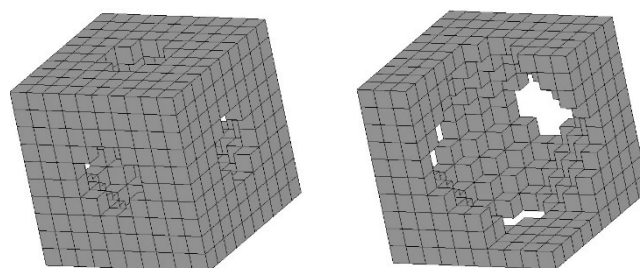


Figura 5.7 – Detalhe do modelo de uma região com esfera

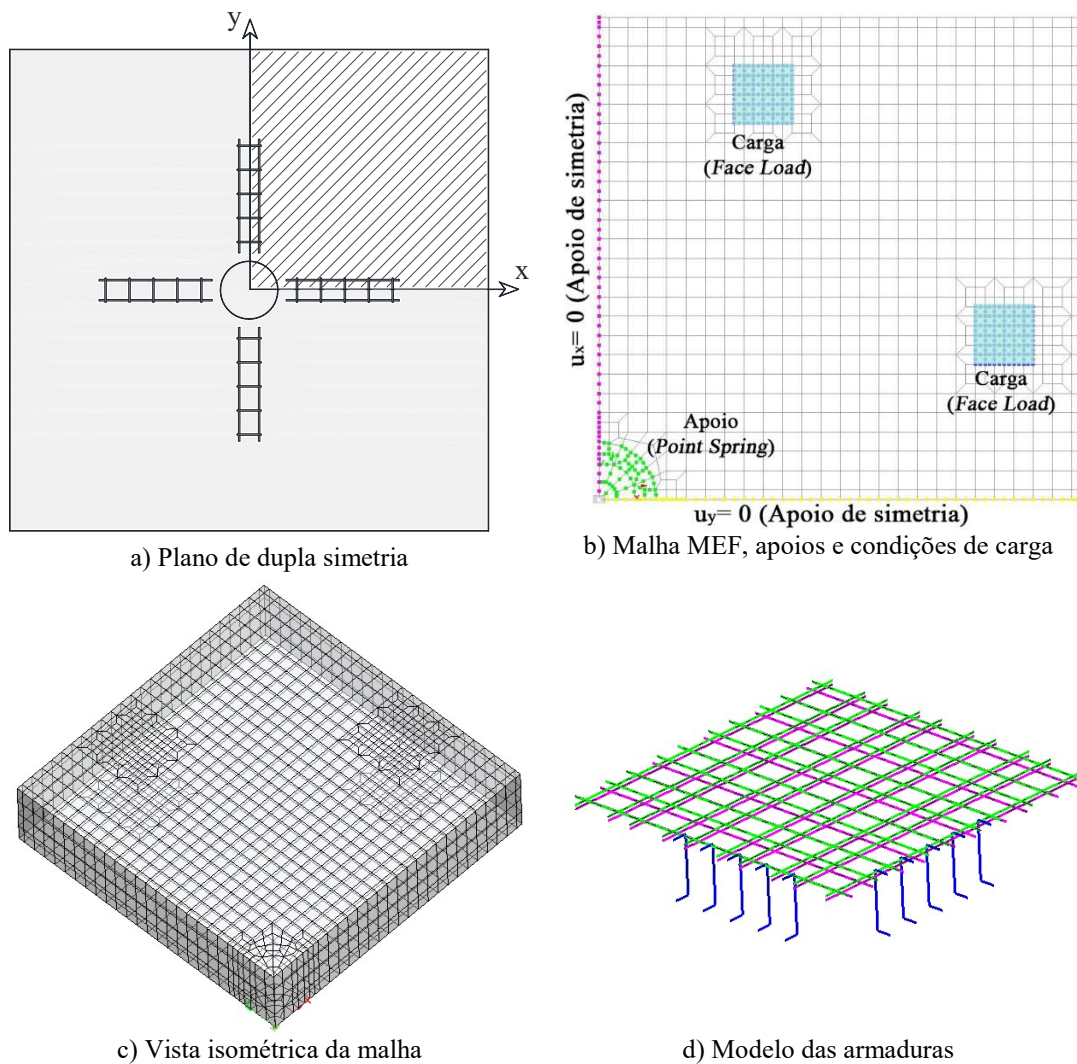


Figura 5.8 – Modelo das lajes maciças

5.4. PARÂMETROS DOS MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS

As propriedades mecânicas do concreto e do aço foram obtidas diretamente dos ensaios experimentais, cujos valores estão indicados no Capítulo 4. Porém, testes preliminares mostraram que as deformações do aço obtidas pelo modelo numérico, eram sistematicamente inferiores aos valores experimentais, a forma encontrada para melhorar os resultados neste aspecto foi reduzir o módulo de elasticidade do aço em 15% do valor equivalente experimental, que por sua vez se encontra abaixo do valor esperado, cerca de 210 GPa, os demais valores permaneceram inalterados. Os valores que definem o *trilinear tension-softening diagram* representados na Figura 5.2b estão indicados na Tabela 5.1 e foram obtidos por análise inversa pelo ajuste da resposta numérica das lajes de referência com sua correspondente experimental, os valores foram mantidos constantes para simulação numérica das lajes *BubbleDeck*. Uma vez que não existem resultados

experimentais para caracterização do *crack shear softening diagram*, estes valores também foram obtidos por análise inversa similar à estratégia adotada para os parâmetros do *concrete tensile softening model*. Na Tabela 5.1 também são incluídos os dados necessários para sua definição.

Tabela 5.1 – Valores adotados para o modelo constitutivo do concreto

| Propriedades | Valor |
|---|---|
| Coefficiente de Poisson (ν) | 0,10 |
| Módulo de elasticidade do concreto (E_c) | 25900 MPa (1ªSérie) 28600 MPa (2ªSérie) 28600 MPa (3ªSérie) |
| <i>Tri-linear tension –softening diagram</i> | $\sigma_{n1}^{cr} = 2,0 \text{ N/mm}^2$; $G_f = 0,07 \text{ N/mm}^2$ $\zeta_1 = 0,005$; $\alpha_1 = 0,4$; $\zeta_2 = 0,2$; $\alpha_2 = 0,15$ |
| Parâmetro que define a energia disponível para abertura de uma nova fissura no Modo I | $n = 2$ |
| Parâmetro que define <i>crack shear stress-crack shear strain softening diagram</i> | $\beta = 0,1$; $\tau_{t,p}^{cr} = 2,0 \text{ N/mm}^2$; $G_{fs} = 0,25 \text{ N/mm}^2$ |
| Largura de banda de fissuração [<i>Crack bandwidth (l_b)</i>] | Raiz cúbica do volume do ponto de integração |
| Ângulo entre fissuras (<i>Threshold angle</i>) | $\alpha_{th} = 30^\circ$ |
| Número máximo de fissuras por ponto de integração | 2 |

Baseado nos resultados carga vs deslocamento de testes preliminares dos modelos numéricos ser resolveu representar o contato entre o pilar e o pórtico de ensaio com elementos pontuais de mola (*points springs*, na nomenclatura inglesa). Esse modelo tem como objetivo simular uma eventual acomodação no início dos ensaios. Na Tabela 5.2 são apresentados os valores adotados, conforme representação da Figura 5.4.

Tabela 5.2 – Valores adotados para o modelo constitutivo das molas

| Propriedades | 1ª Série | 2ª e 3ªSérie |
|--------------|----------|--------------|
| nª molas | 32 | 56 |
| F1 (N) | 1197 | 684 |
| F2 (N) | 4788 | 2736 |
| F3 (N) | 24298 | 13884 |
| a1 (mm) | 0,500 | 0,500 |
| a2 (mm) | 1,250 | 1,250 |
| a3 (mm) | 2,326 | 2,326 |
| p | 1 | 1 |

5.5. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

5.5.1. Comportamento carga deslocamento - FEMIX

A comparação da carga aplicada versus deslocamento médio na borda das lajes obtidas experimentalmente e numericamente são representadas na Figura 5.9 e Figura 5.19. Estas figuras indicam uma boa previsão do MEF em termos de resposta carga-deslocamento. Por outro lado, o decaimento de carga observado experimentalmente devido à ruptura por punção não é capturado numericamente por dificuldades no processo de convergência numérica das simulações.

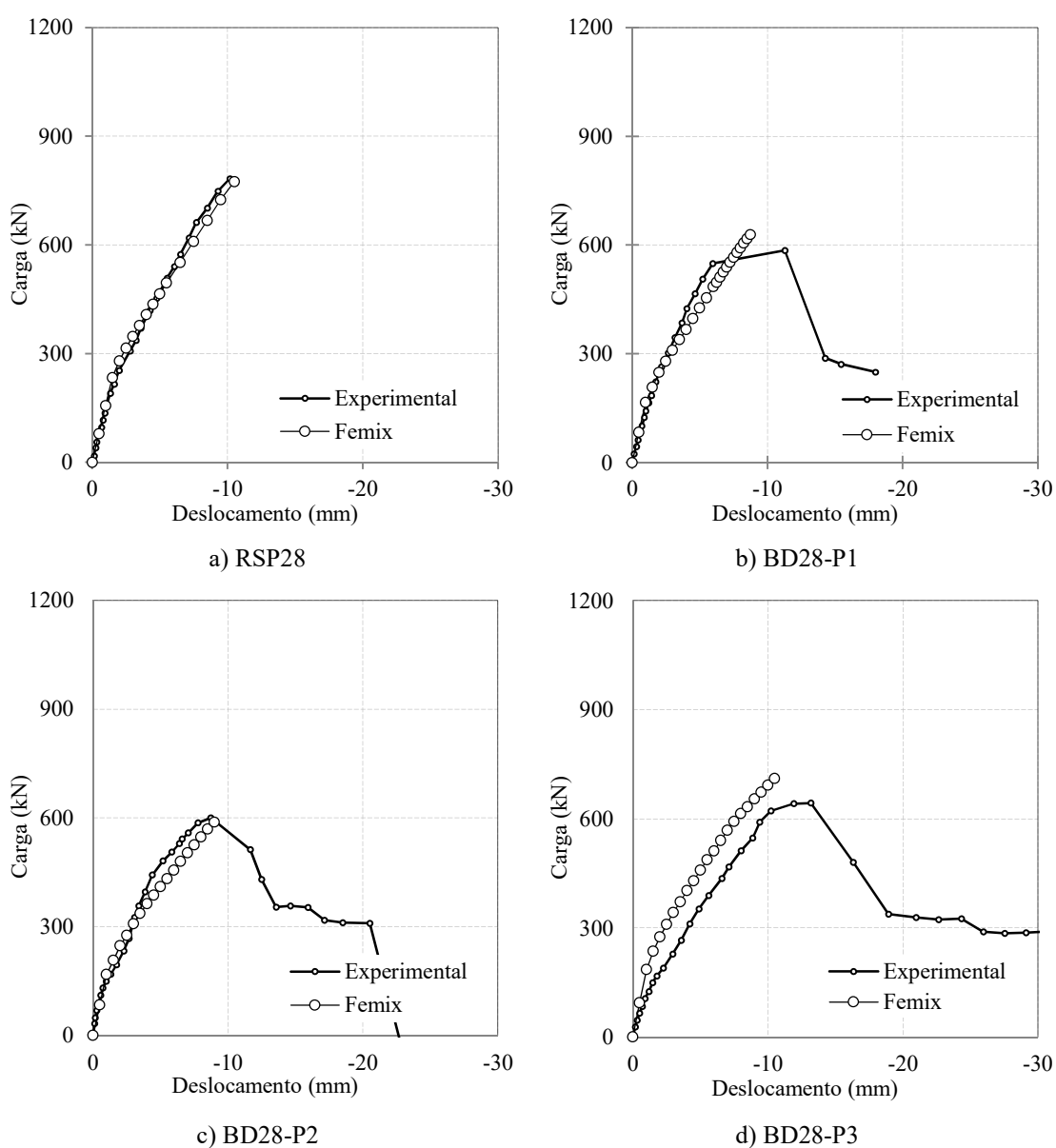
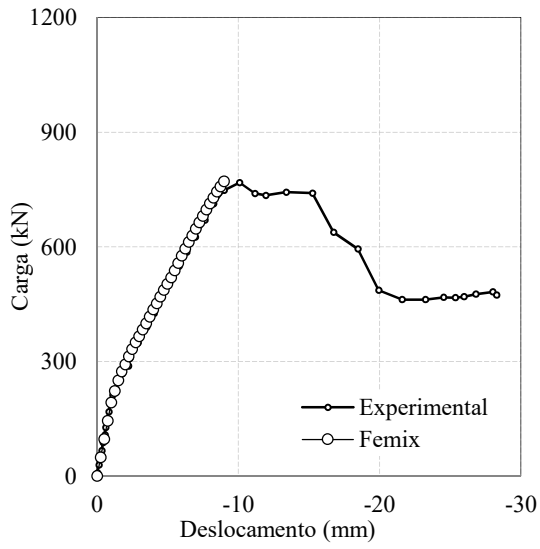
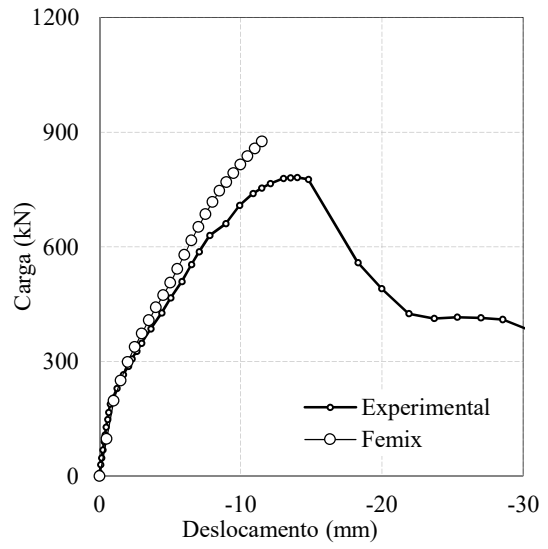


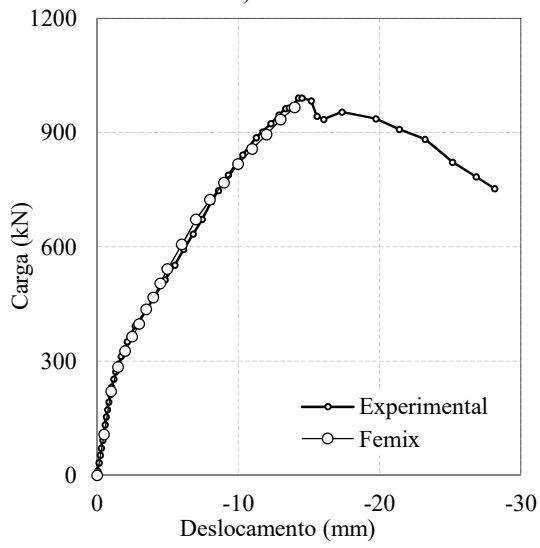
Figura 5.9 – Comparativo da relação carga vs deslocamento (Lajes RSP28, BD28-P1, BD28-P2 e BD28-P3)



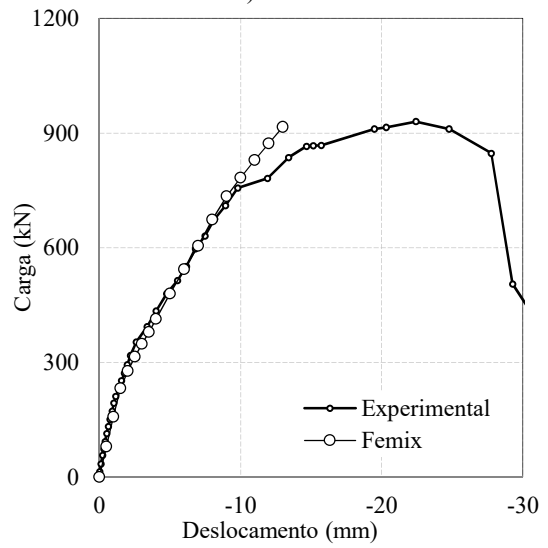
a) BD1



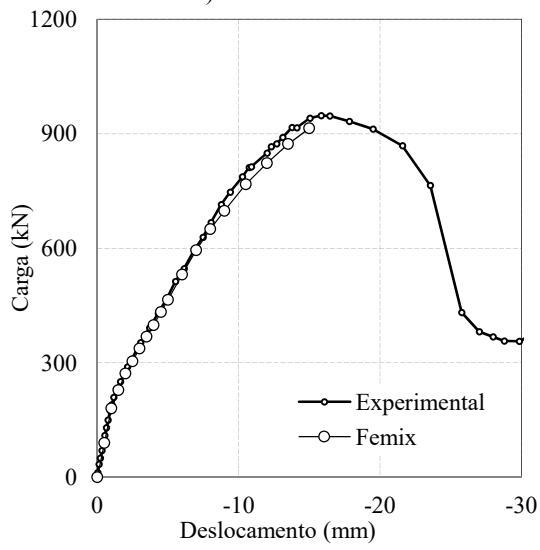
b) BD2



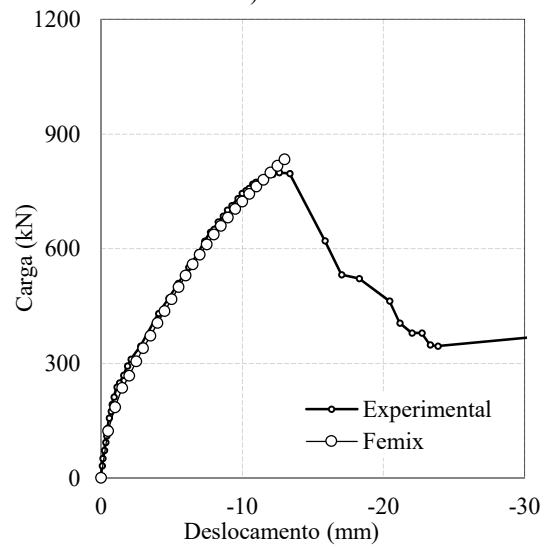
c) SS1 3ª Série



d) SS2



e) BD3



f) BD4

Figura 5.10 – Comparativo da relação carga vs deslocamento (Lajes BD1, BD2, SS1 3ª Série, BD3 e BD4)

As curvas numéricas para a maioria das lajes reproduzem bem os resultados experimentais. Porém, nas lajes *BubbleDeck* da 1ª Série de ensaios, é observada uma leve divergência entre as duas curvas, com o comportamento sendo coincidente para os primeiros níveis de carga e distanciando a partir de um nível de carga em torno de 50% Pu. Este comportamento é mais acentuado na laje BD28-P3, que apresenta valores discrepantes desde os primeiros níveis de carga. Considerando que o modelo numérico foi capaz de representar de maneira satisfatória todas lajes analisadas, podemos atribuir esse comportamento das lajes da 1ª Série de ensaio aos problemas com a célula de carga, descritos no capítulo 3.

5.5.2. Comportamento carga deformação nas armaduras principais - FEMIX

Para garantir a confiabilidade do modelo numérico, os valores da tensão e deformação das armaduras de aço obtidos no MEF foram comparados com os equivalentes valores experimentais do extensômetro mais solicitado, EF1. As Figura 6.7 a 6.10 mostram comparativamente os resultados, sendo evidente que as estimativas do modelo numérico estão em conformidade razoável com os resultados experimentais.

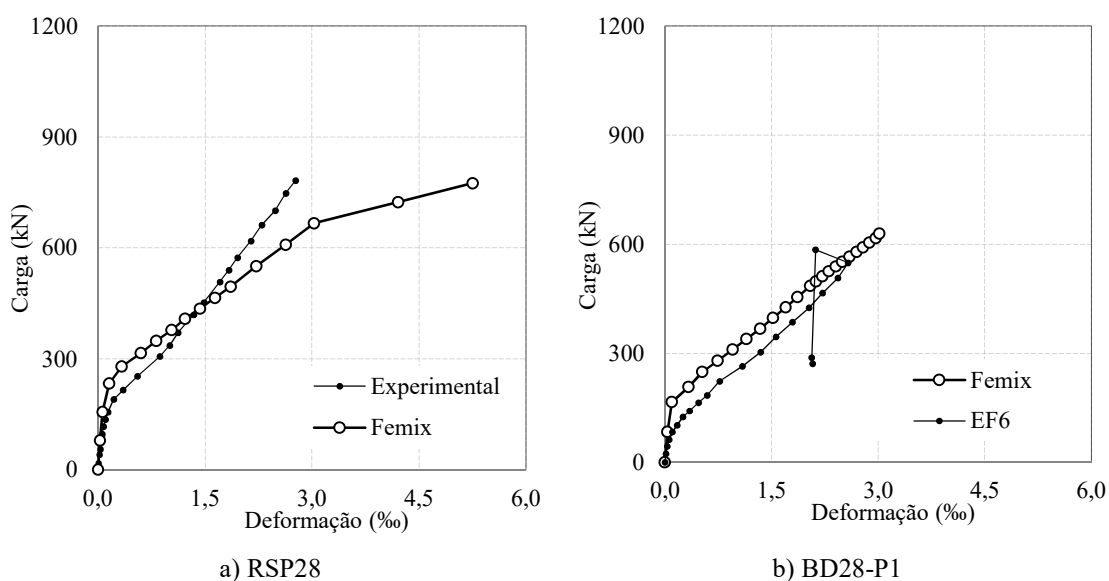


Figura 5.11 – Comparativo da relação carga vs deformação das armaduras principais (Lajes RSP28 e BD28-P1)

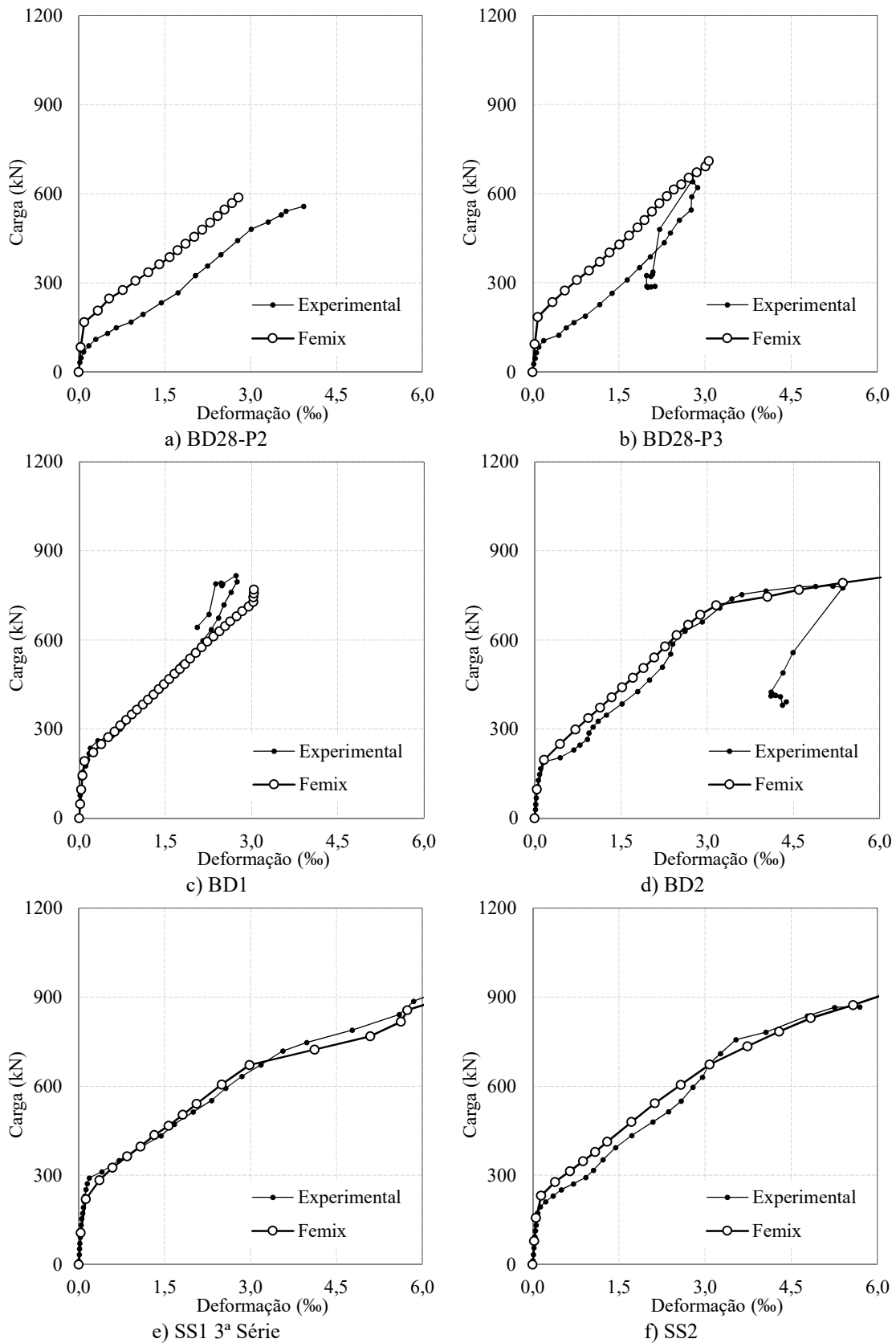


Figura 5.12 – Comparativo da relação carga vs deformação das armaduras principais (Lajes BD28-P2, BD28-P3, BD1, BD2, SS1 3ª Série e SS2)

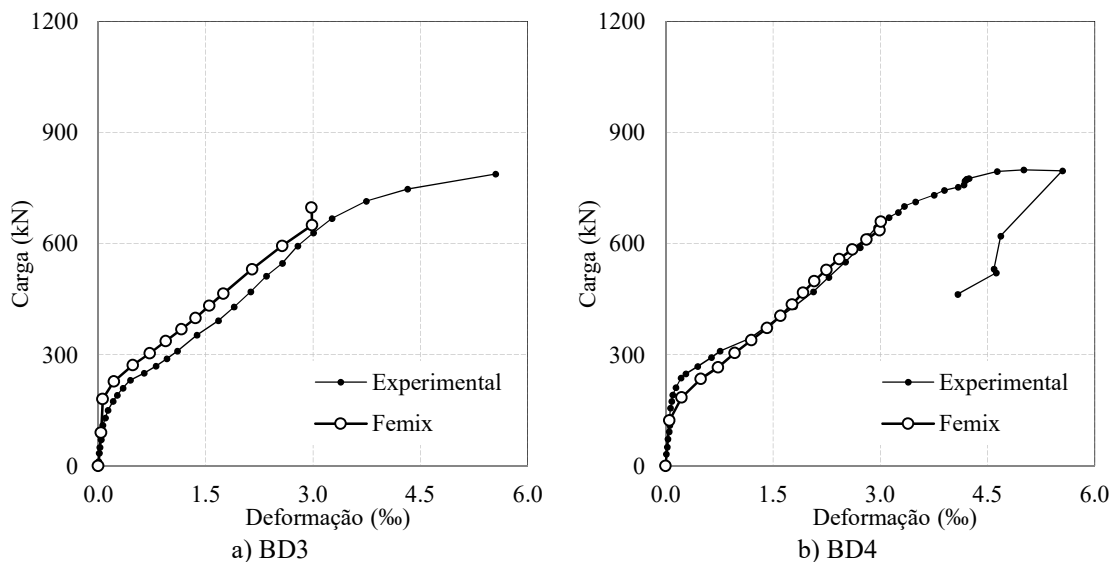


Figura 5.13 – Comparativo da relação carga vs deformação das armaduras principais (Lajes BD3 e BD4)

A boa performance de previsão do modelo nas simulações destas estruturas também são reveladas em termos de deformações da armadura principal para maioria das lajes. Porém, observa-se o mesmo comportamento nas lajes da 1ª Série de ensaios, com valores numéricos se distanciando dos observados experimentalmente. Este resultado corrobora com a ideia exposta para no item anterior.

Para as lajes BD3 e BD4, este modelo não captou de forma adequada as deformações do aço após seu escoamento. Para as demais lajes a previsão numérica representou de forma adequada as deformações do aço obtidas experimentalmente.

5.5.3. Comportamento carga deformação dos estribos - FEMIX

As comparações dos resultados numéricos com os dados experimentais das deformações nos estribos, no ponto EE1, estão representadas nas Figura 5.14 à Figura 5.15. Para as curvas analisadas, observou-se um comportamento razoavelmente semelhante apenas para alguns modelos, SS1 3ª Série, SS2 e BD4.

Este comportamento pode ser explicado pela característica dos modelos de fissuração distribuída, em que se tem um conceito de deformação média nas armaduras entre uma região íntegra e outra fissurada. Nestes modelos, em geral, o valor observado numericamente é inferior ao lido experimentalmente. Pois, quando um extensômetro colado na armadura estiver próximo há uma fissura real, esta deformação será significativamente superior à deformação da armadura em uma região íntegra.

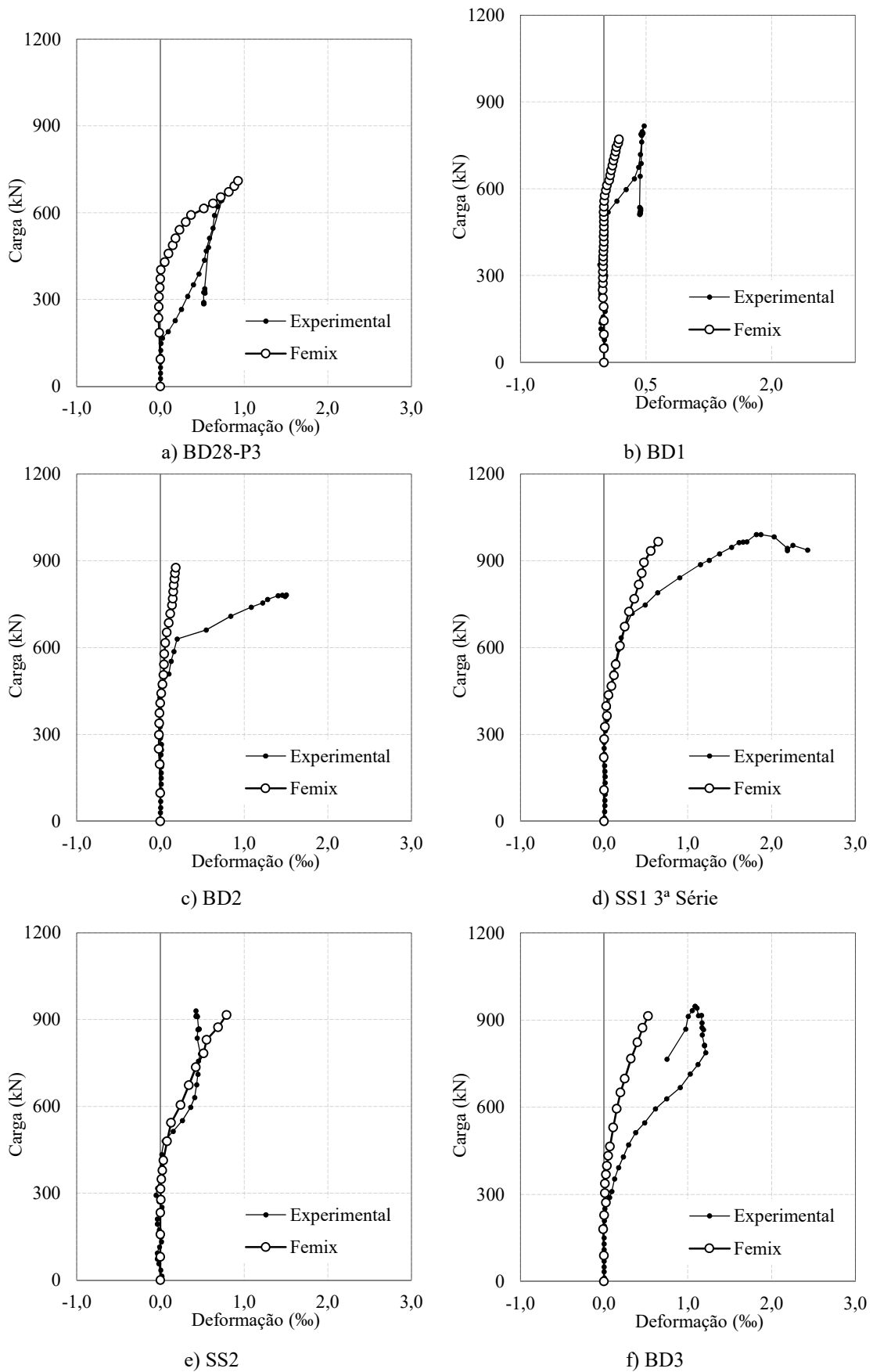
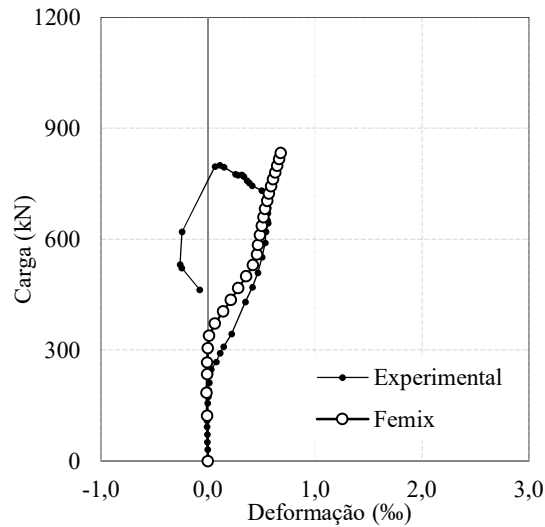


Figura 5.14 – Comparativo da relação carga vs deformação das armaduras principais (BD28-P3, BD1, BD2, SS1 3ª Série, SS2 e BD3)

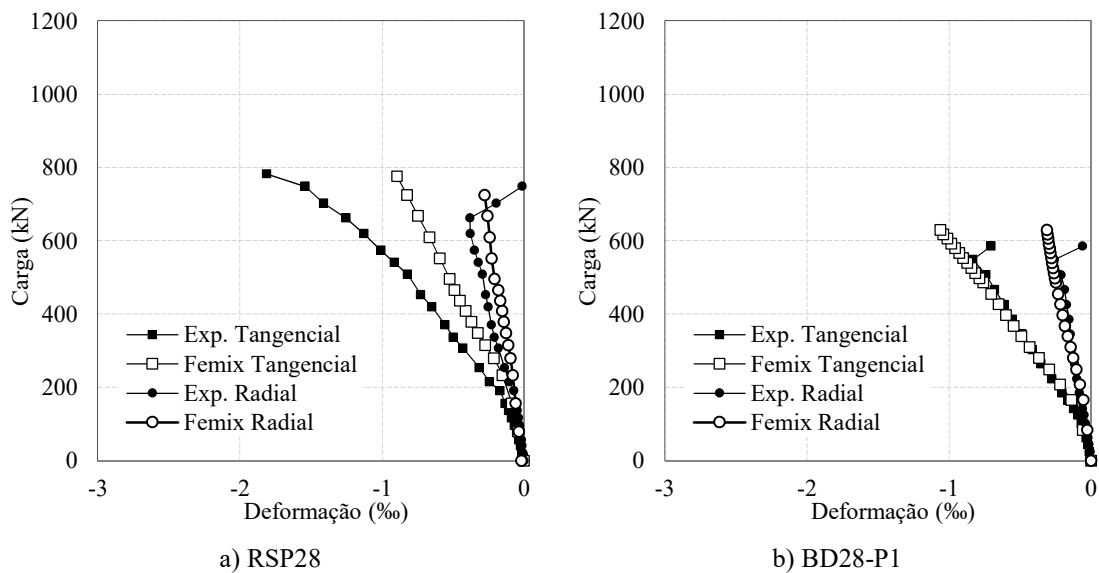


a) BD4

Figura 5.15 – Comparativo da relação carga vs deformação das armaduras principais (BD4)

5.5.4. Comportamento carga deformação do concreto - FEMIX

Os valores da tensão e deformação do concreto na face inferior da laje obtidos no MEF foram comparados com os equivalentes valores experimentais dos extensômetros tangenciais e radiais, EC3 e EC4 respectivamente. As Figura 5.16 à Figura 5.18 mostram comparativamente os resultados, sendo evidente que as estimativas do modelo numérico representam bem os resultados experimentais.



a) RSP28

b) BD28-P1

Figura 5.16 – Comparativo da relação carga vs deformação no concreto (RSP28 e BD28-P1)

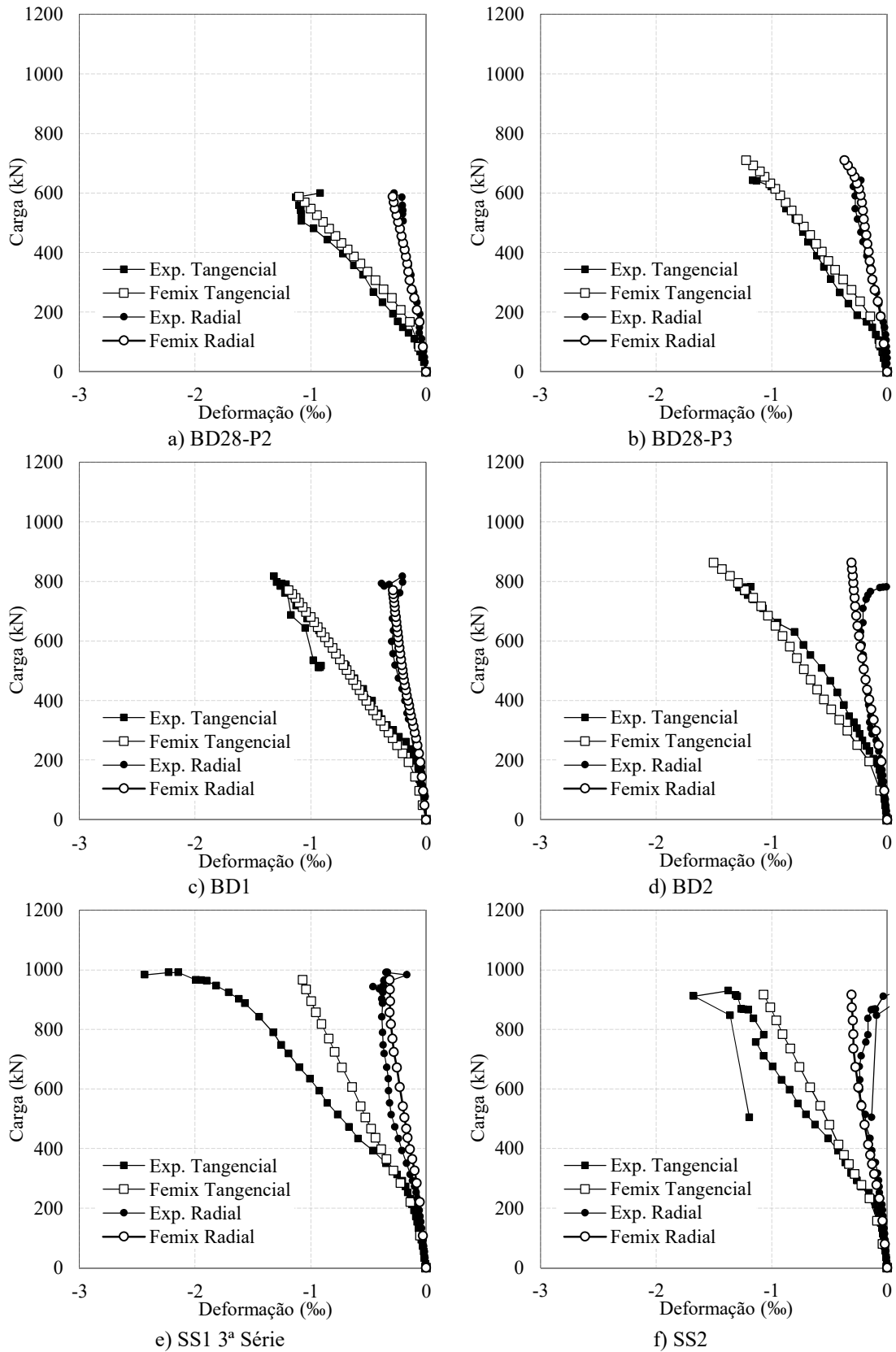


Figura 5.17 – Comparativo da relação carga vs deformação no concreto (BD28-P2, BD28-P3, BD1, BD2, SS1 3ª Série e SS2)

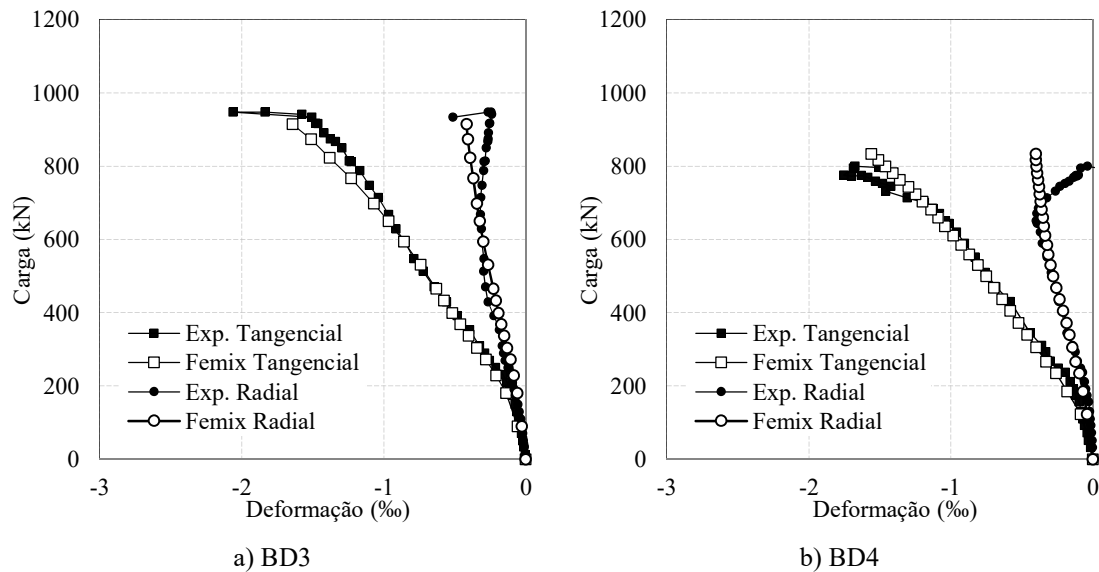
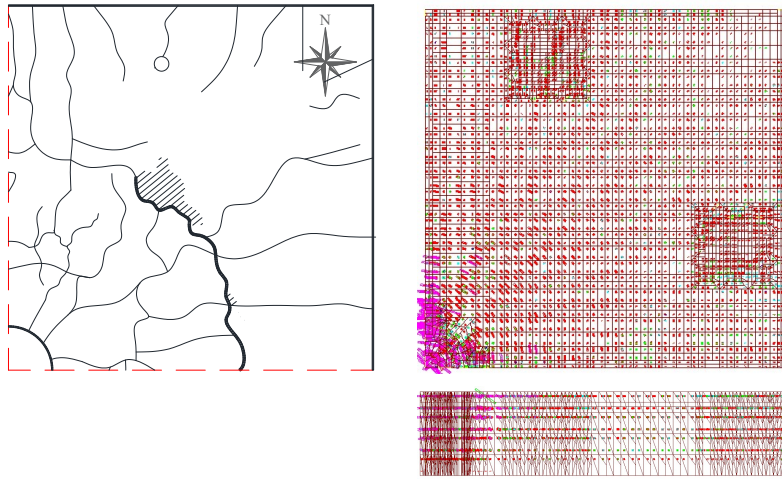


Figura 5.18 – Comparativo da relação carga vs deformação no concreto (BD3 e BD4)

5.5.5. Padrão de fissuração - FEMIX

As Figura 5.19 a Figura 5.28 ilustram o padrão de fissuração observados experimentalmente para o quadrante Nordeste das lajes em comparação com o obtido pelo MEF. No modelo numérico, as fissuras são representadas graficamente por um retângulo perpendicular a cada uma delas, onde seu comprimento representa o nível de abertura da fissura. Além disso, as fissuras podem ter várias categorias, onde a cor rosa representa a fissura completamente aberta (deformação acima do limite último); em cor vermelha são representadas as fissuras em processo de abertura; em cor azul clara são as fissuras em processo de reabertura; em cor verde são fissuras em no processo de fechamento; por fim a cor azul escura representa a fissura fechada.

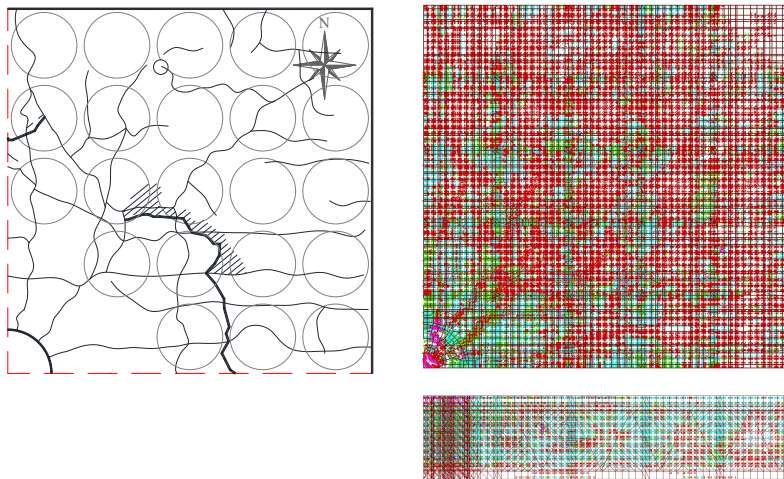
Comparando-se os padrões de fissuração pelo MEF e experimental, os resultados obtidos fornecem um indicador razoável das suas direções predominantes, como constatado nos ensaios experimentais. Com ênfase para as lajes *BubbleDeck*, cujos modelos apresentam um padrão de fissuração com predominância de abertura de fissuras na região com vazios e na zona maciça se predominam as fissuras em cor verde e azul claro, que estão em processo de fechamento e reabertura, respectivamente. Entretanto, a maioria das lajes apresentaram ruptura caracterizada por uma superfície crítica próxima ao pilar, o que não foi observado experimentalmente.



a) Experimental

b) Numérico

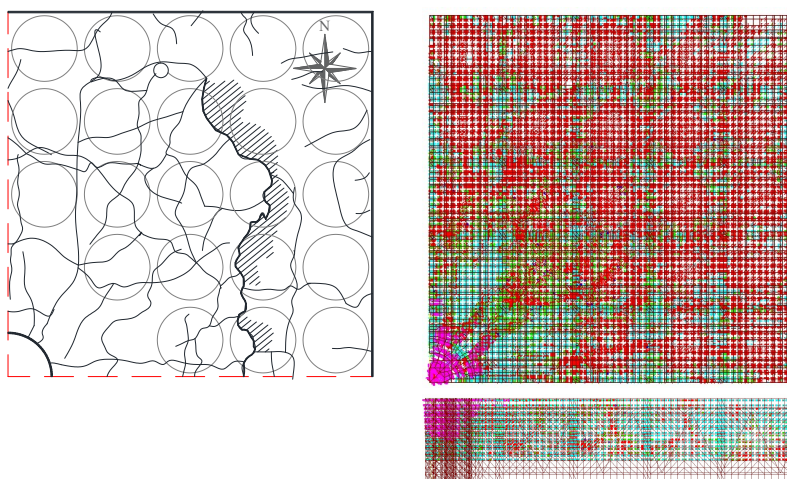
Figura 5.19 – Comparativo do padrão de fissuração para laje RSP28



a) Experimental

b) Numérico

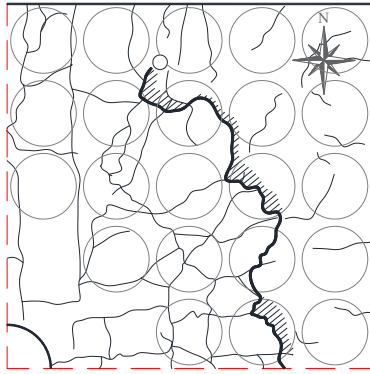
Figura 5.20 – Comparativo do padrão de fissuração para laje BD28-P1



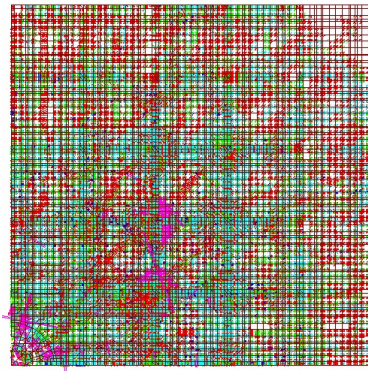
a) Experimental

b) Numérico

Figura 5.21 – Comparativo do padrão de fissuração para laje BD28-P2

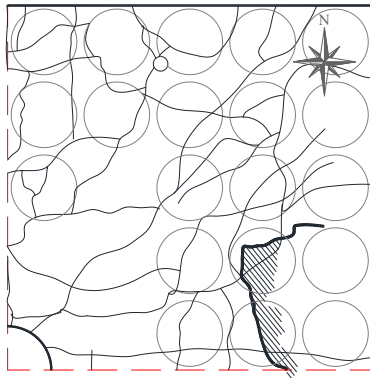


a) Experimental

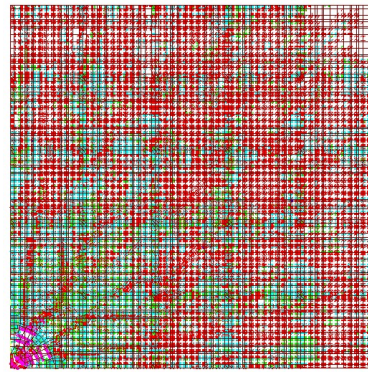


b) Numérico

Figura 5.22 – Comparativo do padrão de fissuração para laje BD28-P3

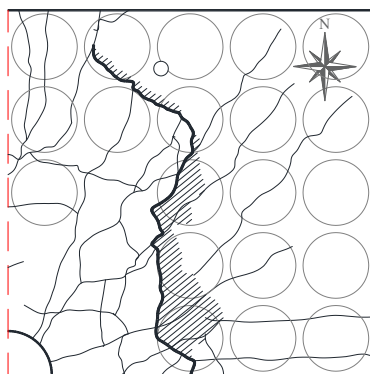


a) Experimental

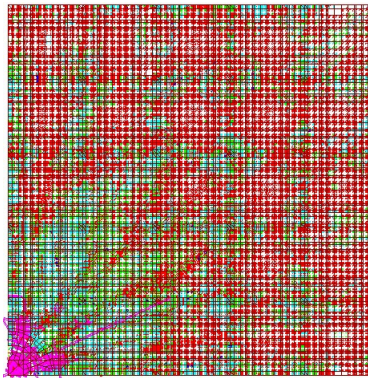


b) Numérico

Figura 5.23 – Comparativo do padrão de fissuração para laje BD1

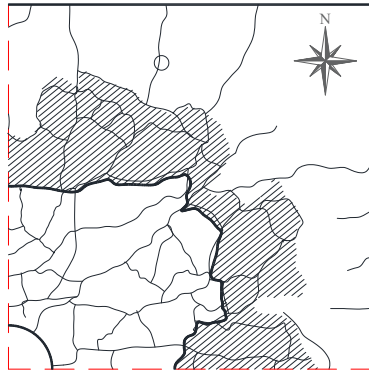


a) Experimental



b) Numérico

Figura 5.24 – Comparativo do padrão de fissuração para laje BD2

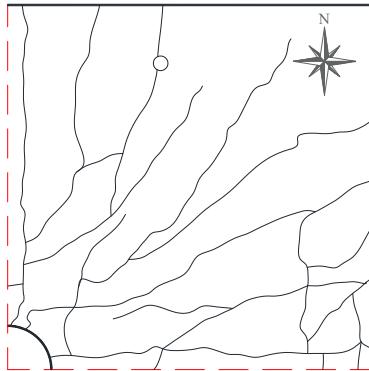


a) Experimental



b) Numérico

Figura 5.25 – Comparativo do padrão de fissuração para laje SS1 3ª Série

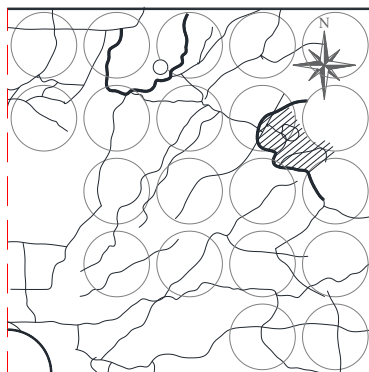


a) Experimental

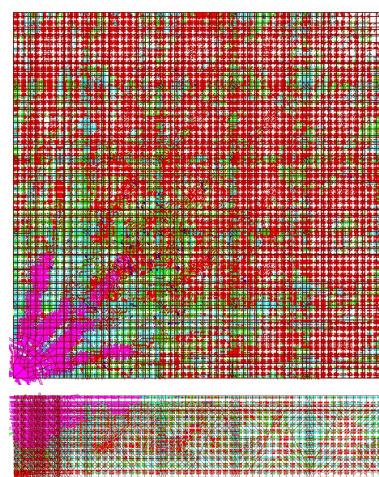


b) Numérico

Figura 5.26 – Comparativo do padrão de fissuração para laje SS2

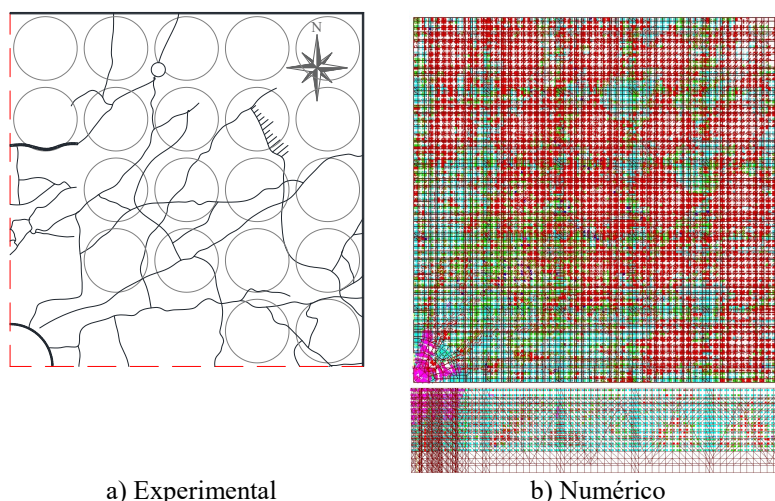


a) Experimental



b) Numérico

Figura 5.27 – Comparativo do padrão de fissuração para laje BD3



a) Experimental
 b) Numérico
 Figura 5.28 – Comparativo do padrão de fissuração para laje BD4

5.6. ANÁLISE DETALHADA DAS LAJES DA 1ª SÉRIE

De modo geral, as simulações numéricas realizadas com o programa de elementos finitos FEMIX 4.0 apresentaram boas correlações com os dados experimentais, quanto as relações carga-deslocamento, carga-deformação das armaduras e no concreto. Sendo que apenas as lajes da 1ª Série apresentaram resultados destoantes.

O comportamento peculiar destes modelos ocorreu por um problema em uma das células de cargas disponíveis. A partir de testes de calibração deste equipamento foi concluído que os valores experimentais de carga obtidas para as lajes desta série estavam abaixo dos seus valores reais. Porém, não foi possível encontrar a correspondência entre eles.

De posse dos resultados calibrados e validados das simulações numéricas, se percebeu que seria razoável estimar esta diferença entre os resultados reais de carga a partir da curva carga-deformação da armadura principal das lajes, item 5.5.2. Pois, todas as lajes modeladas apresentaram excelente correlação entre os valores obtidos numericamente e experimentalmente para esta resposta, à exceção das lajes da 1ª Série. Sendo assim, a partir da diferença de carga entre estes valores pode-se correlacionar qual é o melhor valor aproximado que representa a carga real nos modelos. Na Figura 5.29 é possível ver em detalhe a diferença entre as curvas carga vs deformação na armadura obtidas numericamente e experimentalmente.

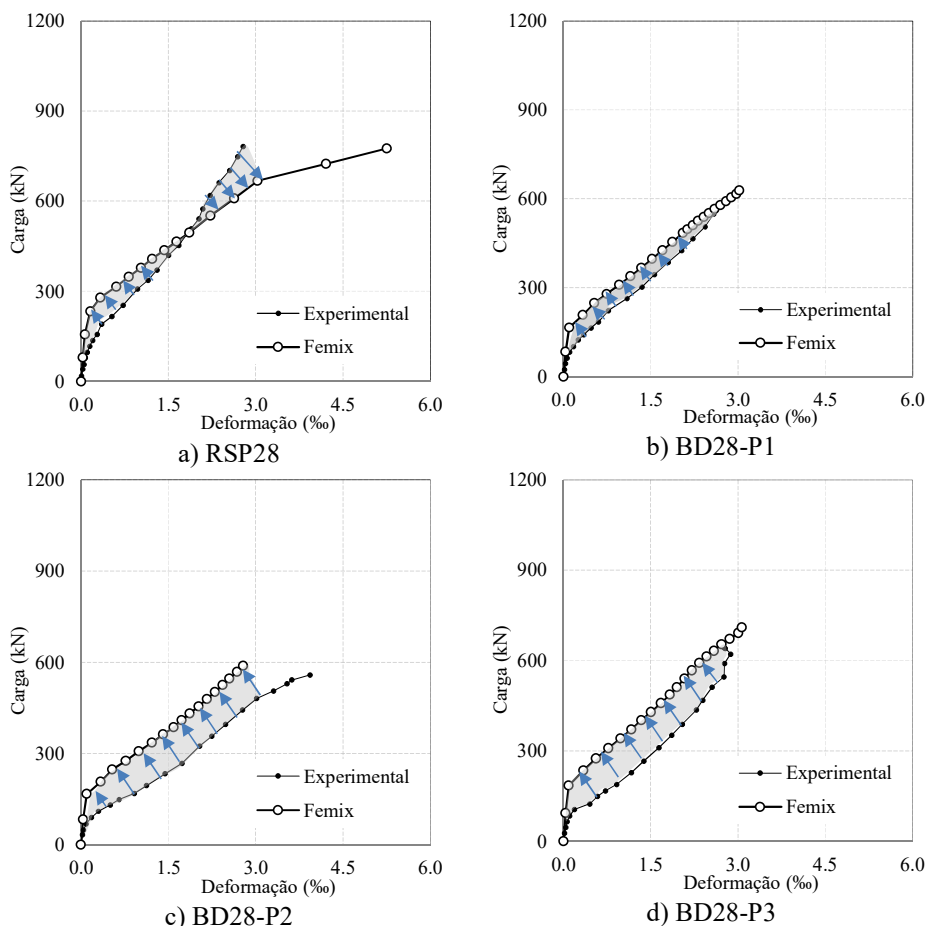


Figura 5.29 – Detalhe dos gráficos carga-deformação das armaduras principais.

A partir da análise dos gráficos podemos estimar que a carga real da laje BD28-P1 é cerca de 13% acima do valor obtido experimentalmente, enquanto as lajes BD28-P2 e BD28-P3 possuem na realidade um valor de carga cerca de 22% acima do valor da carga última. Apenas para a laje maciça, RSP28 não foi possível estender com segurança esta aproximação, uma vez que esta laje apresenta um comportamento diferente das demais, com curvas sem variação constante entre elas. Na Tabela 5.3 estão representados os valores corrigidos de carga última.

Tabela 5.3 – Valores de carga última corrigidas.

| Laje | Carga experimental (kN) | Carga corrigida (kN) |
|---------|-------------------------|----------------------|
| RSP28 | 855 | - |
| BD28-P1 | 639 | 722 |
| BD28-P2 | 648 | 790 |
| BD28-P3 | 693 | 845 |

6. ANÁLISE DAS EXPRESSÕES NORMATIVAS ADAPTADAS

6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A resistência à punção de lajes maciças e regiões maciças adjacentes à ligação laje-pilar têm sido estudadas intensamente. Baseado nestes estudos, diferentes métodos foram propostos para seu dimensionamento. A expressão geral para o cálculo da capacidade das lajes lisas, sem armadura de cisalhamento, consiste no produto da tensão de cisalhamento nominal, perímetro de controle e altura útil para todas normas. No entanto, cada norma define a posição do perímetro de controle, que pode variar de $0,5d$ a $2d$ da área carregada, onde d se refere a altura útil da laje. Esta posição também é muito importante para o cálculo da capacidade à punção de lajes com vazios em seu interior.

Nas lajes com vazios, uma área maciça pode ser prevista em torno da ligação laje-pilar. Neste caso, a capacidade à punção da laje pode ser calculada de forma análoga a laje maciça. Se uma armadura de cisalhamento for utilizada nesta região, então a capacidade à punção é calculada avaliando este reforço. A verificação da resistência à punção nesta zona é fundamental. Porém, é essencial verificar a capacidade à punção além da região maciça, na região com vazios.

Em determinados casos os vazios nas lajes podem se estender em toda sua extensão ou até regiões próximas ao pilar. Em ambos casos, a resistência à punção das lajes deve ser reduzida. Se os vazios forem localizados no perímetro de controle da verificação à punção, então os métodos de cálculo usados para cálculo de lajes maciças não podem ser aplicados para estas lajes, sendo necessário adaptá-los ao problema em estudo. Em lajes com vazios podem ser considerados três tipos de zonas próximas da ligação laje-pilar: zonas sem vazios (maciças); zonas totalmente com vazios; e zonas intermediárias, com organização racional entre os vazios e região sólida.

Em lajes *BubbleDeck*, baseados nos estudos encomendados pelo fabricante, a resistência à punção deve ser considerada como 60% de sua equivalente maciça de mesma espessura. Porém, alguns autores sugeriram um método específico para dimensionar lajes com vazios, propondo uma redução da contribuição da parcela do concreto na resistência das lajes.

Nesta seção, serão apresentadas as verificações à punção de acordo com as recomendações do ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2004), ABNT NBR 6118 (2014) e *fib Model Code* (2010), estas recomendações são aplicáveis a lajes maciças com pilar interno, armaduras de cisalhamento e submetidas a carregamento simétrico. Para aplicação dos casos de estudo, de lajes com vazios, foram adotadas as modificações propostas pela *BubbleDeck international* e HELD e PFEFFER (2002). Adicionalmente, serão sugeridas verificações adicionais para a norma Brasileira, para o caso de lajes *BubbleDeck*.

Para facilitar a análise das diferentes proposições, na Tabela 6.1 estão apresentadas as principais características das lajes ensaiadas.

Tabela 6.1 – Resumo das características das lajes ensaiadas

| Autores | Descrição | | | | | | | |
|-------------------|--------------|------------|----------|--------|--------|-------------|----------------------|-------------------|
| | Laje | Tipo | Pré laje | h (mm) | d (mm) | f_c (MPa) | $f_{y,12,5mm}$ (MPa) | ρ % (c/tela) |
| Presente Pesquisa | RSP28 | Maciça | Não | 280 | 237 | 48 | 584 | 0,52 |
| | BD28 - P1 | BubbleDeck | Não | 280 | 248 | 48 | 584 | 0,48 |
| | BD28 - P2 | BubbleDeck | Sim | 280 | 252 | 48 | 584 | 0,46 |
| | BD28 - P3 | BubbleDeck | Sim | 280 | 252 | 48 | 584 | 0,46 |
| | BD1 | BubbleDeck | Não | 280 | 241 | 45 | 577 | 0,50 |
| | BD2 | BubbleDeck | Sim | 280 | 255 | 45 | 577 | 0,45 |
| | SS1 | Maciça | Não | 280 | 232 | 45 | 577 | 0,54 |
| | SS2 | Maciça | Sim | 280 | 246 | 45 | 577 | 0,48 |
| | BD3 | BubbleDeck | Não | 280 | 242 | 47 | 577 | 0,50 |
| | BD4 | BubbleDeck | Sim | 280 | 253 | 47 | 577 | 0,46 |
| Held (2002) | SS1 3ª Série | Maciça | Não | 280 | 237 | 47 | 577 | 0,52 |
| | D1-24 | BubbleDeck | Não | 240 | 190 | 37 | 500 | 1,80 |
| | D2-24 | BubbleDeck | Não | 240 | 190 | 44 | 500 | 1,80 |
| | D3-24 | BubbleDeck | Não | 240 | 190 | 40 | 500 | 1,80 |
| | D4-45 | BubbleDeck | Não | 450 | 380 | 24 | 500 | 1,06 |
| | D5-45 | BubbleDeck | Não | 450 | 380 | 31 | 500 | 1,06 |
| Ceballos (2017) | D6-45 | BubbleDeck | Não | 450 | 380 | 33 | 500 | 1,06 |
| | BD-A01 | BubbleDeck | Não | 280 | 236 | 29 | 541 | 0,79 |

onde: h é a altura da laje; d é a altura útil da laje, f_c é a resistência à compressão do concreto, $f_{y,12,5mm}$ é a tensão de escoamento da armadura de flexão principal.

Tabela 6.2 – Resumo das características das lajes ensaiadas (continuação)

| Autores | Descrição | Armadura de cisalhamento | | | | | | | V_u (kN) | $V_u / V_{Referência}$ | Modo de Ruptura |
|-------------------|-----------|--------------------------|---------------|---------------|-----------|---------------|---------------|------------------|---------------|------------------------|-----------------|
| | Laje | Tipo | Padrão | Distrib. | Ancoragem | s_0 (mm) | s_R (mm) | ϕ_w (mm) | | | |
| Presente Pesquisa | RSP28 | - | - | - | - | - | - | - | 855 | - | - |
| | BD28 - P1 | - | - | - | - | - | - | - | 639 | 75% | NV |
| | BD28 - P2 | - | - | - | - | - | - | - | 648 | 76% | NV |
| | BD28 - P3 | Estribo | Fechado | Uma direção | Não | 108 | 45 | 6,3 | 693 | 81% | FR |
| | BD1 | Estribo | Fechado | Uma direção | Não | 163 | 78 | 8,0 | 817 | 79% | FR |
| | BD2 | Estribo | Fechado | Uma direção | Não | 163 | 78 | 8,0 | 833 | 80% | DT/FR |
| | SS1 | Estribo | Fechado | Duas direções | Total | 100 | 125 | 8,0 | 1041 | - | DT/FR |
| | SS2 | Estribo | Fechado | Duas direções | Parcial | 100 | 125 | 8,0 | 987 | - | FR |
| | BD3 | Estribo | Aberto | Duas direções | Total | 100 | 125 | 8,0 | 995 | 95% | FR |
| | BD4 | Estribo | Aberto | Duas direções | Parcial | 100 | 125 | 8,0 | 846 | 86% | FR |
| SS1 3° Série | Estribo | Fechado | Duas direções | Total | 100 | 125 | 8,0 | 1048 | - | DT/FR | |
| Held (2002) | D1-24 | - | - | - | - | - | - | - | 520 | - | NV |
| | D2-24 | - | - | - | - | - | - | - | 580 | - | NV |
| | D3-24 | - | - | - | - | - | - | - | 525 | - | NV |
| | D4-45 | - | - | - | - | - | - | - | 935 | - | NV |
| | D5-45 | - | - | - | - | - | - | - | 990 | - | NV |
| D6-45 | - | - | - | - | - | - | - | 1180 | - | NV | |
| Ceballos (2017) | BD-A01 | Stud | - | Duas direções | Sim | 110 | 115 | 8,0 | 742 | 79% | N/I |

onde: s_0 é o espaçamento entre a face do pilar e o primeiro perímetro de reforço; s_r é o espaçamento entre os perímetros de reforço; ϕ_w é o diâmetro do estribo, V_u é a carga última experimental; $V_u / V_{Referência}$ é a relação entre as capacidades de carga experimentais da laje *BubbleDeck* e seu respectivo modelo de referência maciço; DT (Ruptura passando dentro da região armada ao cisalhamento); FR (Ruptura fora da região armada ao cisalhamento); NV (Ruptura ocorrendo na região nervurada das lajes BD, caso das lajes sem armadura de cisalhamento ou sem região maciça); DT/FR (Quando a ruptura é assimétrica e passa por ambas as regiões) e N/I (superfície de ruptura não identificada)

6.2. VERIFICAÇÃO COMO LAJE MACIÇA

Com a finalidade de avaliar a precisão das prescrições normativas para lajes maciças são apresentadas nas Tabela 6.3 à Tabela 6.6 as cargas de ruptura previstas para estas lajes.

Tabela 6.3 – Cargas de ruptura previstas como laje maciça [ACI 318 (2014)]

| Modelos | V_u (kN) | $V_{R,c}$ (kN) | $V_{R,cs}$ (kN) | $V_{R,out}$ (kN) | $V_{R,max}$ (kN) | V_R (kN) | V_u/V_R | Modo de Ruptura | |
|--------------|---------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------|-----------|-----------------|--------|
| | | | | | | | | Previsto | Real |
| RSP28 | 855 | 911 | - | - | 1380 | 911 | 0,94 | - | - |
| SS1 | 1041 | - | 753 | 1356 | 1293 | 753 | 1,38 | DT | DT/FR* |
| SS2 | 987 | - | 811 | 1452 | 1409 | 811 | 1,22 | DT | FR* |
| SS1 3° Série | 1048 | - | 786 | 1428 | 1370 | 786 | 1,33 | DT | DT |

Tabela 6.4 – Cargas de ruptura previstas como laje maciça [fib MC2010 (2012)]

| Modelos | V_u (kN) | $V_{R,c}$ (kN) | $V_{R,cs}$ (kN) | $V_{R,out}$ (kN) | $V_{R,max}$ (kN) | V_R (kN) | V_u/V_R | Modo de Ruptura | |
|--------------|---------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------|-----------|-----------------|--------|
| | | | | | | | | Previsto | Real |
| RSP28 | 855 | 771 | - | - | - | 771 | 1,11 | DT | - |
| SS1 | 1041 | - | 881 | 893 | 1214 | 881 | 1,18 | DT | DT/FR* |
| SS2 | 987 | - | 906 | 792 | 1030 | 792 | 1,25 | FR | FR* |
| SS1 3° Série | 1048 | - | 905 | 929 | 1260 | 905 | 1,16 | DT | DT |

Tabela 6.5 – Cargas de ruptura previstas como laje maciça [Eurocode 2 (2004)]

| Modelos | V_u (kN) | $V_{R,c}$ (kN) | $V_{R,cs}$ (kN) | $V_{R,out}$ (kN) | $V_{R,max}$ (kN) | V_R (kN) | V_u/V_R | Modo de Ruptura | |
|--------------|---------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------|-----------|-----------------|--------|
| | | | | | | | | Previsto | Real |
| RSP28 | 855 | 934 | - | - | 2585 | 934 | 0,92 | - | - |
| SS1 | 1041 | - | 1068 | 1064 | 2403 | 1064 | 0,98 | FR | DT/FR* |
| SS2 | 987 | - | 1134 | 1131 | 2549 | 1131 | 0,87 | FR | FR* |
| SS1 3° Série | 1048 | - | 1104 | 1106 | 2558 | 1104 | 0,95 | DT | DT |

Tabela 6.6 – Cargas de ruptura previstas como laje maciça [NBR 6118 (2014)]

| Modelos | V_u (kN) | $V_{R,c}$ (kN) | $V_{R,cs}$ (kN) | $V_{R,out}$ (kN) | $V_{R,max}$ (kN) | V_R (kN) | V_u/V_R | Modo de Ruptura | |
|--------------|---------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------|-----------|-----------------|--------|
| | | | | | | | | Previsto | Real |
| RSP28 | 855 | 945 | - | - | 2792 | 945 | 0,91 | - | - |
| SS1 | 1041 | - | 1173 | 1247 | 2595 | 1173 | 0,89 | DT | DT/FR* |
| SS2 | 987 | - | 1241 | 1060 | 2753 | 1060 | 0,93 | FR | FR* |
| SS1 3° Série | 1048 | - | 1210 | 1297 | 2763 | 1210 | 0,87 | DT | DT |

Tabela 6.7 – Resumo das previsões para lajes maciças

| Modelos | V_u (kN) | Modo de Ruptura | ACI | | MC2010 | | EC2 | | NBR | |
|--------------|---------------|-----------------|---------------|------|----------------|------|---------------|------|---------------|------|
| | | | V_u/V_{ACI} | Modo | V_u/V_{MC10} | Modo | V_u/V_{EC2} | Modo | V_u/V_{NBR} | Modo |
| RSP28 | 855 | - | 0,94 | - | 1,11 | DT | 0,92 | - | 0,91 | - |
| SS1 | 1041 | DT/FR* | 1,38 | DT | 1,18 | DT | 0,98 | FR | 0,89 | DT |
| SS2 | 987 | FR* | 1,22 | DT | 1,25 | FR | 0,87 | FR | 0,93 | FR |
| SS1 3° Série | 1048 | DT | 1,33 | DT | 1,16 | DT | 0,95 | DT | 0,87 | DT |
| RSP2 | 562 | DT/FR* | 1,13 | DT | 1,20 | FR | 1,00 | FR | 0,85 | FR |
| Média | | | 1,22 | | 1,17 | | 0,93 | | 0,90 | |
| COV | | | 0,16 | | 0,05 | | 0,05 | | 0,03 | |

Dos resultados analisados, deve se destacar a previsão do ACI para laje RSP28, que apresenta previsão contra a segurança com relação V_u/V_{ACI} de 0,94, este valor se distancia dos valores médios obtidos por outros autores para lajes maciças com características semelhantes [(FERREIRA (2010); OLIVEIRA (2013); SANTOS (2014)]. Usualmente o ACI apresenta previsões conservadoras para lajes maciças sem armadura de cisalhamento e era esperado uma estimativa de carga abaixo da obtida experimentalmente. Conforme abordado no item 5.6, este resultado se deve a problemas em um dos equipamentos durante a 1ª Série de ensaios. Porém, testes de calibração e a análise numérica não permitiram determinar com segurança a real diferença de carga para este modelo.

A média geral para o ACI é de 1,22 para relação V_u/V_{ACI} , com coeficiente de variação de 0,16. Desconsiderando a estimativas da laje RSP28 a média passa para 1,31 e coeficiente de variação de 0,07.

Para as demais normas as previsões podem ser consideradas adequadas com boa média, valor de 1,17; 0,93 e 0,90, para o MC2010, EC 2 e NBR 6118, respectivamente. Quanto ao modo de ruptura, as normas o preveem de modo eficiente, acertando para a maioria das lajes analisadas. Porém, o ACI mostrou uma tendência de apresentar ruptura passando dentro da região reforçada ao cisalhamento e não previu de forma correta a ruptura da laje SS2.

6.3. PROPOSTA DE CÁLCULO DA *BUBBLEDECK*

De acordo com a *BubbleDeck internacional* a resistência à punção de lajes com vazios deve ser considerada como sendo 60% da carga equivalente de uma laje maciça de mesma espessura. Porém, esta formulação deve ser aplicada nas verificações onde o perímetro de controle intercepta as regiões com vazios. Na Tabela 6.8 à Tabela 6.11 são apresentados os resultados para esta proposição de cálculo e para facilitar a visualização foram mantidos em negrito, apenas os valores em que foram aplicados o coeficiente de redução.

Tabela 6.8 – Cargas de ruptura previstas pela proposta da BD [ACI 318 (2014)]

| Série | Modelos | V_u (kN) | $V_{R,c}$ (kN) | $V_{R,cs}$ (kN) | $V_{R,out}$ (kN) | V_R (kN) | V_u/V_R | Modo de Ruptura | |
|----------------------|-----------|---------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------|-------------|-----------------|--------|
| | | | | | | | | Previsto | Real |
| Presente Pesquisa | BD28 - P1 | 639 | 973 | - | - | 973 | 0,66 | - | NV* |
| | BD28 - P2 | 648 | 998 | - | - | 998 | 0,65 | - | NV |
| | BD28 - P3 | 693 | - | 809 | 625 | 625 | 1,11 | FR | FR* |
| | BD1 | 817 | - | 725 | 873 | 725 | 1,13 | DT | FR |
| | BD2 | 833 | - | 779 | 932 | 779 | 1,07 | DT | DT/FR* |
| | BD3 | 995 | - | 806 | 877 | 806 | 1,23 | DT | FR |
| | BD4 | 846 | - | 852 | 923 | 852 | 0,99 | DT | DT/FR |
| Held (2002) | D1-24 | 520 | 449 | - | - | 449 | 1,16 | - | NV |
| | D2-24 | 580 | 489 | - | - | 489 | 1,19 | - | NV |
| | D3-24 | 525 | 468 | - | - | 468 | 1,12 | - | NV |
| | D4-45 | 935 | 998 | - | - | 998 | 0,94 | - | NV |
| | D5-45 | 990 | 1130 | - | - | 1130 | 0,88 | - | NV |
| | D6-45 | 1180 | 1168 | - | - | 1168 | 1,01 | - | NV |
| Ceballos (2017) | BD-A01 | 742 | - | 882 | 794 | 794 | 0,93 | FR | - |

Tabela 6.9 – Cargas de ruptura previstas pela proposta da BD [MC2010 (2012)]

| Série | Modelos | V_u (kN) | $V_{R,c}$ (kN) | $V_{R,cs}$ (kN) | $V_{R,out}$ (kN) | V_R (kN) | V_u/V_R | Modo de Ruptura | |
|-------------------|-----------|---------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------|-------------|-----------------|--------|
| | | | | | | | | Previsto | Real |
| Presente Pesquisa | BD28 - P1 | 639 | 800 | - | - | 800 | 0,80 | - | NV* |
| | BD28 - P2 | 648 | 813 | - | - | 813 | 0,80 | - | NV |
| | BD28 - P3 | 693 | - | 975 | 611 | 611 | 1,13 | FR | FR* |
| | BD1 | 817 | - | 767 | 626 | 626 | 1,31 | FR | FR |
| | BD2 | 833 | - | 799 | 653 | 653 | 1,27 | FR | DT/FR* |
| | BD3 | 995 | - | 913 | 531 | 531 | 1,87 | FR | FR |
| | BD4 | 846 | - | 933 | 500 | 500 | 1,69 | FR | DT/FR |
| Held (2002) | D1-24 | 520 | 583 | - | - | 583 | 0,89 | - | NV |
| | D2-24 | 580 | 622 | - | - | 622 | 0,93 | - | NV |
| | D3-24 | 525 | 602 | - | - | 602 | 0,87 | - | NV |
| | D4-45 | 935 | 1329 | - | - | 1329 | 0,70 | - | NV |
| | D5-45 | 990 | 1457 | - | - | 1457 | 0,68 | - | NV |
| | D6-45 | 1180 | 1493 | - | - | 1493 | 0,79 | - | NV |
| Ceballos (2017) | BD-A01 | 742 | - | 810 | 669 | 669 | 1,11 | FR | - |

Tabela 6.10 – Cargas de ruptura previstas pela proposta da BD [Eurocode 2 (2004)]

| Série | Modelos | V_u (kN) | $V_{R,c}$ (kN) | $V_{R,cs}$ (kN) | $V_{R,out}$ (kN) | V_R (kN) | V_u/V_R | Modo de Ruptura | |
|-------------------|-----------|---------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------|-------------|-----------------|--------|
| | | | | | | | | Previsto | Real |
| Presente Pesquisa | BD28 - P1 | 639 | 584 | - | - | 584 | 1,09 | - | NV* |
| | BD28 - P2 | 648 | 594 | - | - | 594 | 1,09 | - | NV |
| | BD28 - P3 | 693 | - | 673 | 706 | 673 | 1,03 | DT | FR* |
| | BD1 | 817 | - | 617 | 904 | 617 | 1,32 | DT | FR |
| | BD2 | 833 | - | 652 | 938 | 652 | 1,28 | DT | DT/FR* |
| | BD3 | 995 | - | 676 | 678 | 676 | 1,47 | DT | FR |
| | BD4 | 846 | - | 707 | 710 | 707 | 1,20 | DT | DT/FR |
| Held (2002) | D1-24 | 520 | 598 | - | - | 598 | 0,87 | - | NV |
| | D2-24 | 580 | 632 | - | - | 632 | 0,92 | - | NV |
| | D3-24 | 525 | 614 | - | - | 614 | 0,85 | - | NV |
| | D4-45 | 935 | 1241 | - | - | 1241 | 0,75 | - | NV |
| | D5-45 | 990 | 1348 | - | - | 1348 | 0,73 | - | NV |
| | D6-45 | 1180 | 1378 | - | - | 1378 | 0,86 | - | NV |
| Ceballos (2017) | BD-A01 | 742 | - | 679 | 712 | 679 | 1,09 | DT | - |

Tabela 6.11 – Cargas de ruptura previstas pela proposta da BD [NBR 6118 (2014)]

| Série | Modelos | V _u (kN) | V _{R,c} (kN) | V _{R,cs} (kN) | V _{R,out} (kN) | V _R (kN) | V _u /V _R | Modo de Ruptura | |
|-------------------|-----------|------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------|--------|
| | | | | | | | | Previsto | Real |
| Presente Pesquisa | BD28 - P1 | 639 | 591 | - | - | 591 | 1,08 | - | NV* |
| | BD28 - P2 | 648 | 601 | - | - | 601 | 1,08 | - | NV |
| | BD28 - P3 | 693 | - | 731 | 829 | 731 | 0,95 | DT | FR* |
| | BD1 | 817 | - | 671 | 1021 | 671 | 1,22 | DT | FR |
| | BD2 | 833 | - | 707 | 1063 | 707 | 1,18 | DT | DT/FR* |
| | BD3 | 995 | - | 740 | 682 | 682 | 1,46 | FR | FR |
| | BD4 | 846 | - | 772 | 613 | 613 | 1,38 | FR | DT/FR |
| Held (2002) | D1-24 | 520 | 568 | - | - | 568 | 0,92 | - | NV |
| | D2-24 | 580 | 601 | - | - | 601 | 0,97 | - | NV |
| | D3-24 | 525 | 584 | - | - | 584 | 0,90 | - | NV |
| | D4-45 | 935 | 1201 | - | - | 1201 | 0,78 | - | NV |
| | D5-45 | 990 | 1304 | - | - | 1304 | 0,76 | - | NV |
| | D6-45 | 1180 | 1334 | - | - | 1334 | 0,88 | - | NV |
| Ceballos (2017) | BD-A01 | 742 | - | 664 | 827 | 664 | 1,12 | - | - |

Tabela 6.12 – Resumo das previsões para proposta BD

| Série | Modelos | V _u (kN) | Modo de Ruptura | ACI | | MC2010 | | EC2 | | NBR | |
|---|-----------|------------------------|-----------------|----------------------------------|------|-----------------------------------|------|----------------------------------|------|----------------------------------|------|
| | | | | V _u /V _{ACI} | Modo | V _u /V _{MC10} | Modo | V _u /V _{EC2} | Modo | V _u /V _{NBR} | Modo |
| Presente Pesquisa | BD28 - P1 | 639 | NV* | 0,66 | - | 0,80 | - | 1,09 | - | 1,08 | - |
| | BD28 - P2 | 648 | NV | 0,65 | - | 0,80 | - | 1,09 | - | 1,08 | - |
| | BD28 - P3 | 693 | FR* | 1,11 | FR | 1,13 | FR | 1,03 | DT | 0,95 | DT |
| | BD1 | 817 | FR | 1,13 | DT | 1,31 | FR | 1,32 | DT | 1,22 | DT |
| | BD2 | 833 | DT/FR* | 1,07 | DT | 1,27 | FR | 1,28 | DT | 1,18 | DT |
| | BD3 | 995 | FR | 1,23 | DT | 1,87 | FR | 1,47 | DT | 1,46 | FR |
| | BD4 | 846 | DT/FR | 0,99 | DT | 1,69 | FR | 1,20 | DT | 1,38 | FR |
| Held (2002) | D1-24 | 520 | NV | 1,16 | - | 0,89 | - | 0,87 | - | 0,92 | - |
| | D2-24 | 580 | NV | 1,19 | - | 0,93 | - | 0,92 | - | 0,97 | - |
| | D3-24 | 525 | NV | 1,12 | - | 0,87 | - | 0,85 | - | 0,90 | - |
| | D4-45 | 935 | NV | 0,94 | - | 0,70 | - | 0,75 | - | 0,78 | - |
| | D5-45 | 990 | NV | 0,88 | - | 0,68 | - | 0,73 | - | 0,76 | - |
| | D6-45 | 1180 | NV | 1,01 | - | 0,79 | - | 0,86 | - | 0,88 | - |
| Ceballos (2017) | BD-A01 | 742 | - | 0,93 | FR | 1,11 | FR | 1,09 | DT | 1,12 | - |
| Todas Lajes | | | Média | 1,00 | | 1,06 | | 1,04 | | 1,05 | |
| | | | COV | 0,18 | | 0,43 | | 0,24 | | 0,22 | |
| Lajes com armadura de cisalhamento | | | Média | 0,97 | | 1,25 | | 1,20 | | 1,18 | |
| | | | COV | 0,22 | | 0,31 | | 0,13 | | 0,14 | |

Para esta proposta de cálculo verificamos que o ACI, assim como o MC2010, superestima as cargas das lajes do Grupo 1, lajes sem armadura de cisalhamento, pois o perímetro de controle, localizado a $d/2$ do pilar, não intercepta a região com vazios e não é aplicado o fator de redução de 0,60. Quanto ao modo de ruptura, o ACI tende a prever a maioria das lajes rompendo dentro da região com armadura de cisalhamento, a exceção da laje

BD28-P3 e BD-A01. Já o MC2010 tende a prever as rupturas fora da área maciça, porém apresenta elevado coeficiente de variação.

As estimativas do Eurocode e NBR apresentam bons resultados para as lajes *BubbleDeck* desta pesquisa, com média V_u/V_{norma} de 1,04 e 1,05, respectivamente, inclusive para lajes sem armadura de cisalhamento, já que todos perímetros de controle interceptam a zona com esferas e o fator de redução pode ser aplicado. Porém, o coeficiente de variação é elevado, com valor de 0,24 e 0,22 para o EC2 e NBR, respectivamente. Considerando apenas as lajes com armaduras de cisalhamento, esta norma apresenta um bom nível de precisão, com coeficiente de variação de 0,13 e 0,14 para o EC2 e NBR, respectivamente.

Na previsão do modo de ruptura o EC2 e NBR tendem a prever a ruptura dentro da região reforçada para as lajes do Grupo 2, uma vez que superestimam a carga V_{Rout} . Para as lajes *BubbleDeck* do Grupo 3 e 4, com armadura de cisalhamento, percebemos que as previsões para ruptura dentro e fora da região reforçada estão muito próximas e não nos permite determinar a eficácia de acertos.

6.4. PROPOSTA DE SUBTRAÇÃO DE ÁREAS

Na hipótese do perímetro de controle interceptar as esferas HELD e PFEFFER (2002), propuseram adaptações nas formulações de cálculo à punção do DIN 1045 (1988) com intuito de levar em consideração os vazios interceptados pelo perímetro de controle. Posteriormente, LIMA (2015) e LEDO (2016) contribuíram com pequenas alterações a estas formulações com a finalidade de adequá-las às normativas atuais.

Esta proposta tem como princípio minorar a parcela de contribuição do concreto na resistência à punção, diminuindo do produto “ $u.d$ ” a parcela de área nas esferas $\left(\sum l_{arc}^2 \cdot \pi / 4\right)$ fruto da interceptação do perímetro de controle “ u ”, conforme apresentado na Equação 6.1 e Equação 6.2 e representado nas Figura 6.1 e Figura 6.2. Nas Tabela 6.13 à Tabela 6.17 são apresentados os resultados para esta metodologia de cálculo.

$$A = u.d - \sum \frac{l_{arc}^2 \cdot \pi}{4} \quad \text{Equação 6.1}$$

$$V_{R,c} = v \cdot \left(u.d - \sum \frac{l_{arc}^2 \cdot \pi}{4} \right) \quad \text{Equação 6.2}$$

onde v é a tensão de cisalhamento nominal de ligação laje-pilar que varia em função de cada norma; u é o perímetro de controle; d é a altura útil da laje; e l_{arc} é o comprimento da corda correspondente ao arco gerado pela interseção entre o perímetro de controle e a esfera.

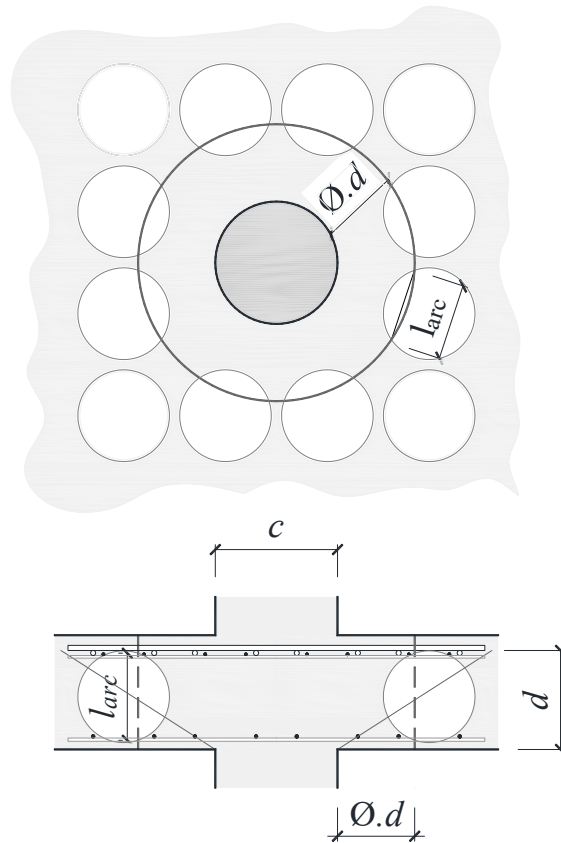


Figura 6.1 – Esquema da proposta de subtração de áreas.

onde ϕ é a distância do perímetro de controle e c se refere a maior dimensão do pilar.

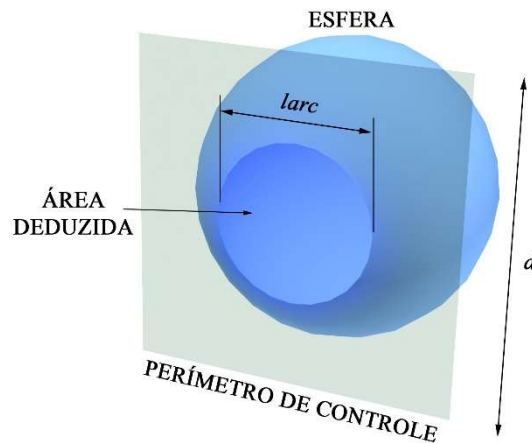


Figura 6.2 – Detalhe da área que deve ser deduzida.

Tabela 6.13 – Cargas de ruptura previstas pela proposta de subtração de áreas [ACI318 (2014)]

| Série | Modelos | V _u (kN) | V _{R,c} (kN) | V _{R,cs} (kN) | V _{R,out} (kN) | V _R (kN) | V _u /V _R | Modo de Ruptura | |
|-------------------|-----------|------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------|--------|
| | | | | | | | | Previsto | Real |
| Presente Pesquisa | BD28 - P1 | 639 | 973 | - | - | 973 | 0,66 | - | NV* |
| | BD28 - P2 | 648 | 998 | - | - | 998 | 0,65 | - | NV |
| | BD28 - P3 | 693 | - | 809 | 757 | 757 | 0,92 | FR | FR* |
| | BD1 | 817 | - | 725 | 987 | 725 | 1,13 | DT | FR |
| | BD2 | 833 | - | 779 | 1063 | 779 | 1,07 | DT | DT/FR* |
| | BD3 | 995 | - | 806 | 801 | 801 | 1,24 | FR | FR |
| | BD4 | 846 | - | 852 | 862 | 852 | 0,99 | DT | DT/FR |
| Held (2002) | D1-24 | 520 | 491 | - | - | 491 | 1,06 | - | NV |
| | D2-24 | 580 | 534 | - | - | 534 | 1,09 | - | NV |
| | D3-24 | 525 | 511 | - | - | 511 | 1,03 | - | NV |
| | D4-45 | 935 | 961 | - | - | 961 | 0,97 | - | NV |
| | D5-45 | 990 | 1088 | - | - | 1088 | 0,91 | - | NV |
| | D6-45 | 1180 | 1125 | - | - | 1125 | 1,05 | - | NV |
| Ceballos (2017) | BD-A01 | 742 | 706 | 882 | 597 | 597 | 1,24 | FR | - |

Tabela 6.14 – Cargas de ruptura previstas pela proposta de subtração de áreas [fib MC2010 (2012)]

| Série | Modelos | V _u (kN) | V _{R,c} (kN) | V _{R,cs} (kN) | V _{R,out} (kN) | V _R (kN) | V _u /V _R | Modo de Ruptura | |
|-------------------|-----------|------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------|--------|
| | | | | | | | | Previsto | Real |
| Presente Pesquisa | BD28 - P1 | 639 | 800 | - | - | 800 | 0,80 | - | NV* |
| | BD28 - P2 | 648 | 813 | - | - | 813 | 0,80 | - | NV |
| | BD28 - P3 | 693 | - | 944 | 891 | 891 | 0,78 | FR | FR* |
| | BD1 | 817 | - | 767 | 848 | 767 | 1,07 | DT | FR |
| | BD2 | 833 | - | 799 | 895 | 799 | 1,04 | DT | DT/FR* |
| | BD3 | 995 | - | 913 | 711 | 711 | 1,40 | FR | FR |
| | BD4 | 846 | - | 933 | 677 | 677 | 1,25 | FR | DT/FR |
| Held (2002) | D1-24 | 520 | 729 | - | - | 729 | 0,71 | - | NV |
| | D2-24 | 580 | 779 | - | - | 779 | 0,74 | - | NV |
| | D3-24 | 525 | 753 | - | - | 753 | 0,70 | - | NV |
| | D4-45 | 935 | 1505 | - | - | 1505 | 0,62 | - | NV |
| | D5-45 | 990 | 1664 | - | - | 1664 | 0,60 | - | NV |
| | D6-45 | 1180 | 1708 | - | - | 1708 | 0,69 | - | NV |
| Ceballos (2017) | BD-A01 | 742 | 726 | 810 | 941 | 810 | 0,92 | DT | - |

Tabela 6.15 – Cargas de ruptura previstas pela proposta de subtração de áreas [Eurocode 2 (2004)]

| Série | Modelos | V _u (kN) | V _{R,c} (kN) | V _{R,cs} (kN) | V _{R,out} (kN) | V _R (kN) | V _u /V _R | Modo de Ruptura | |
|-------------------|-----------|------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------|
| | | | | | | | | Previsto | Real |
| Presente Pesquisa | BD28 - P1 | 639 | 527 | - | - | 527 | 1,21 | - | NV* |
| | BD28 - P2 | 648 | 521 | - | - | 521 | 1,24 | - | NV |
| | BD28 - P3 | 693 | - | 770 | 796 | 770 | 0,90 | DT | FR* |
| | BD1 | 817 | - | 775 | 1011 | 775 | 1,05 | DT | FR |
| | BD2 | 833 | - | 812 | 1051 | 812 | 1,02 | DT | DT/FR* |
| | BD3 | 995 | - | 1047 | 577 | 577 | 1,72 | FR | FR |
| | BD4 | 846 | - | 1063 | 690 | 690 | 1,23 | FR | DT/FR |
| Held (2002) | D1-24 | 520 | 437 | - | - | 437 | 1,19 | - | NV |
| | D2-24 | 580 | 462 | - | - | 462 | 1,26 | - | NV |
| | D3-24 | 525 | 449 | - | - | 449 | 1,17 | - | NV |
| | D4-45 | 935 | 1073 | - | - | 1073 | 0,87 | - | NV |
| | D5-45 | 990 | 1165 | - | - | 1165 | 0,85 | - | NV |
| | D6-45 | 1180 | 1191 | - | - | 1191 | 0,99 | - | NV |
| Ceballos (2017) | BD-A01 | 742 | 594 | 886 | 650 | 650 | 1,14 | FR | - |

Tabela 6.16 – Cargas de ruptura previstas pela proposta de subtração de áreas [NBR 6118 (2014)]

| Série | Modelos | V _u (kN) | V _{R,c} (kN) | V _{R,cs} (kN) | V _{R,out} (kN) | V _R (kN) | V _u /V _R | Modo de Ruptura | |
|-------------------|-----------|------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------|
| | | | | | | | | Previsto | Real |
| Presente Pesquisa | BD28 - P1 | 639 | 533 | - | - | 533 | 1,20 | - | NV* |
| | BD28 - P2 | 648 | 527 | - | - | 527 | 1,23 | - | NV |
| | BD28 - P3 | 693 | - | 853 | 777 | 777 | 0,89 | FR | FR* |
| | BD1 | 817 | - | 856 | 871 | 856 | 0,96 | DT | FR |
| | BD2 | 833 | - | 893 | 1104 | 893 | 0,93 | DT | DT/FR* |
| | BD3 | 995 | - | 1151 | 815 | 815 | 1,22 | FR | FR |
| | BD4 | 846 | - | 1166 | 699 | 699 | 1,21 | FR | DT/FR |
| Held (2002) | D1-24 | 520 | 374 | - | - | 374 | 1,39 | - | NV |
| | D2-24 | 580 | 395 | - | - | 395 | 1,47 | - | NV |
| | D3-24 | 525 | 384 | - | - | 384 | 1,37 | - | NV |
| | D4-45 | 935 | 994 | - | - | 994 | 0,94 | - | NV |
| | D5-45 | 990 | 1080 | - | - | 1080 | 0,92 | - | NV |
| | D6-45 | 1180 | 1104 | - | - | 1104 | 1,07 | - | NV |
| Ceballos (2017) | BD-A01 | 742 | - | 852 | 794 | 794 | 0,93 | FR | - |

Tabela 6.17 – Resumo das previsões para proposta de subtração de áreas

| Série | Modelos | V_u (kN) | Modo de Ruptura | ACI | | MC2010 | | EC2 | | NBR | |
|------------------------------------|-----------|---------------|-----------------|---------------|------|----------------|------|---------------|------|---------------|------|
| | | | | V_u/V_{ACI} | Modo | V_u/V_{MC10} | Modo | V_u/V_{EC2} | Modo | V_u/V_{NBR} | Modo |
| Presente Pesquisa | BD28 - P1 | 639 | NV* | 0,66 | - | 0,80 | - | 1,21 | - | 1,20 | - |
| | BD28 - P2 | 648 | NV | 0,65 | - | 0,80 | - | 1,24 | - | 1,23 | - |
| | BD28 - P3 | 693 | FR* | 0,92 | FR | 0,78 | FR | 0,90 | DT | 0,89 | FR |
| | BD1 | 817 | FR | 1,13 | DT | 1,07 | DT | 1,05 | DT | 0,96 | DT |
| | BD2 | 833 | DT/FR* | 1,07 | DT | 1,04 | DT | 1,02 | DT | 0,93 | DT |
| | BD3 | 995 | FR | 1,24 | FR | 1,40 | FR | 1,72 | FR | 1,22 | FR |
| | BD4 | 846 | DT/FR | 0,99 | DT | 1,25 | FR | 1,23 | FR | 1,21 | FR |
| Held (2002) | D1-24 | 520 | NV | 1,06 | - | 0,71 | - | 1,19 | - | 1,39 | - |
| | D2-24 | 580 | NV | 1,09 | - | 0,74 | - | 1,26 | - | 1,47 | - |
| | D3-24 | 525 | NV | 1,03 | - | 0,70 | - | 1,17 | - | 1,37 | - |
| | D4-45 | 935 | NV | 0,97 | - | 0,62 | - | 0,87 | - | 0,94 | - |
| | D5-45 | 990 | NV | 0,91 | - | 0,60 | - | 0,85 | - | 0,92 | - |
| | D6-45 | 1180 | NV | 1,05 | - | 0,69 | - | 0,99 | - | 1,07 | - |
| Ceballos (2017) | BD-A01 | 742 | - | 1,24 | FR | 0,92 | DT | 1,14 | FR | 0,93 | FR |
| Todas Lajes | | | Média | 1,00 | 0,86 | 1,13 | 1,12 | | | | |
| | | | COV | 0,17 | 0,29 | 0,21 | 0,18 | | | | |
| Lajes com armadura de cisalhamento | | | Média | 0,99 | 1,01 | 1,19 | 1,07 | | | | |
| | | | COV | 0,24 | 0,23 | 0,21 | 0,14 | | | | |

Para esta proposta, o ACI e MC2010 não representam bem os resultados experimentais das lajes do Grupo 1, sem armadura de cisalhamento, pelos mesmos motivos da proposta da *BubbleDeck*. Para esses casos é necessário que seja pensada uma forma alternativa de verificação. Para as lajes de HELD (2002), o ACI fornece bons resultados com média V_u/V_{norma} de 1,00. Para as lajes *BubbleDeck* com armadura de cisalhamento, mesmo com relação V_u/V_{norma} de 0,99, a resistência à punção é suscetível a variações de acordo com a posição do perímetro.

O EC2 apresenta média da relação V_u/V_{norma} de 1,13 para lajes *BubbleDeck*, com coeficiente de variação de 0,21, já a NBR 6118 apresenta média de 1,12 e coeficiente de variação de 0,18. A análise dos resultados poderia nos levar a concluir que esta proposta é adequada, porém, as previsões de carga das lajes com características similares apresentam grandes variações.

Usando as recomendações do EC2 e comparando diretamente a laje BD3 com a laje BD4, obtemos uma variação de 29% entre as cargas V_{out} previstas, enquanto as lajes maciças SS1 e SS2 tem variação de apenas 6%. Essa diferença de previsão entre lajes BD, em teoria, não deveria ocorrer uma vez que estas lajes possuem as mesmas características para o dimensionamento, variando apenas a altura útil d e consequente posição do

perímetro de controle. Porém, os resultados apresentados mostram suscetibilidade devido à quantidade de esferas que são interceptadas pelo perímetro de controle. Na Figura 6.3 é possível ver em detalhe este perímetro para laje BD3, e notamos que para este caso é utilizado o perímetro de controle efetivo onde deve-se deduzir da parcela “ $u.d$ ” uma parcela grande de área, acarretando esta variação de resistência em relação à laje BD4.

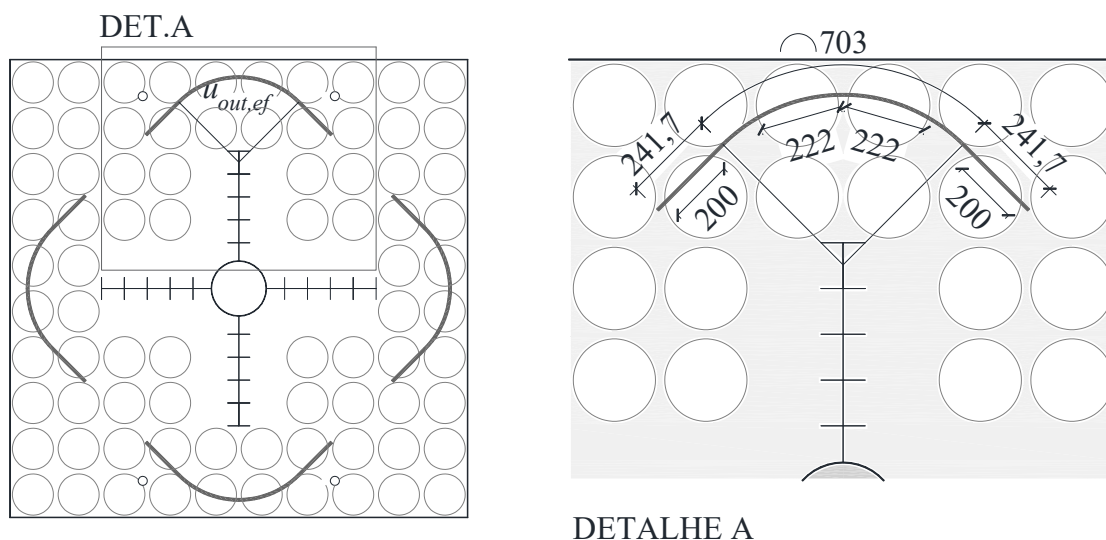


Figura 6.3 – Perímetro de controle $u_{out,ef}$ da laje BD3 de acordo com o Eurocode 2 (2004).

Para melhor compreensão da variação da resistência à punção das lajes em função da posição do perímetro de controle, foram plotadas para as lajes BD28-P1, BD1 e BD3 as cargas estimadas pelo ACI e EC2 em função da distância do perímetro à face do pilar, ver Figura 6.4 à Figura 6.6.

Os gráficos nos fornecem um bom entendimento da relação entre a resistência estimada e o exato local onde passa o perímetro de controle. Para regiões entre as esferas, passando predominantemente entre nervuras, esta proposta tende a superestimar a resistência à punção da laje. Por outro lado, quando este intercepta várias esferas em sua extensão, a resistência decai consideravelmente. Deve-se notar ainda que pequenas variações de posição, na ordem de $d/4$, promovem previsões que passam de seguras para inseguras ou o inverso. Portanto, este método além de ser trabalhoso do ponto de vista prático para escritórios de projeto, deve ser utilizado com cautela na previsão da resistência à punção de lajes devido sua variabilidade de precisão de acordo com o perímetro de controle.

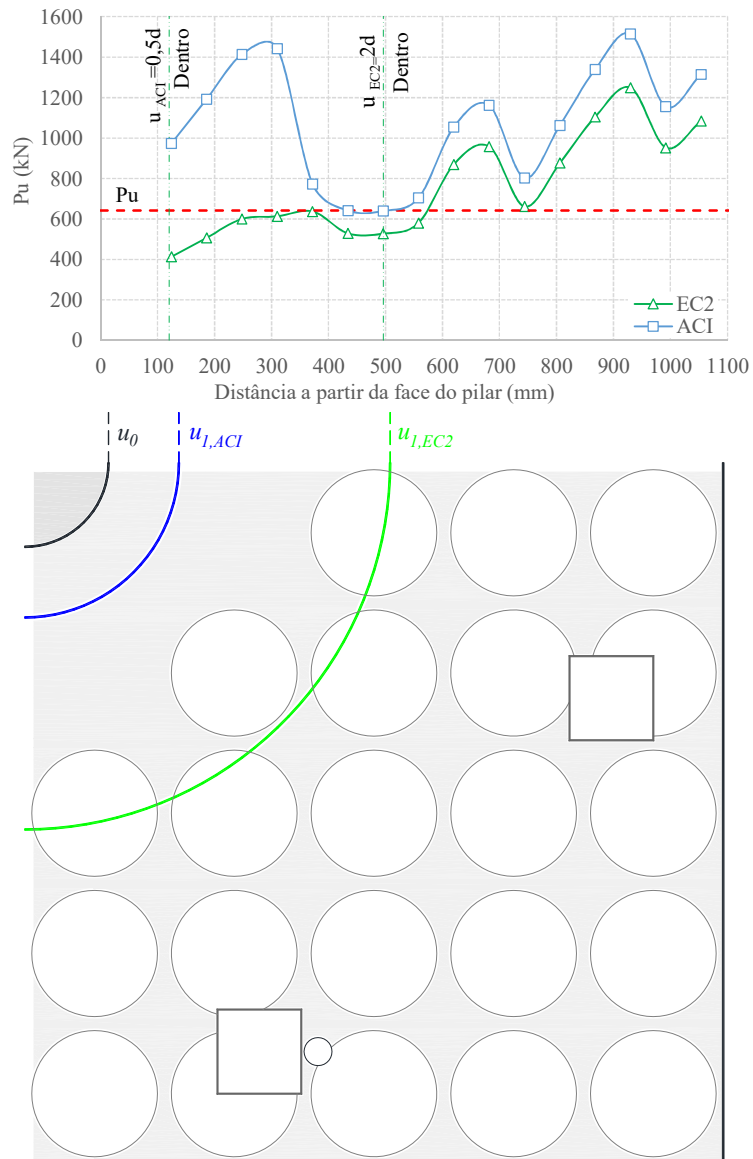


Figura 6.4 – Variação da Resistência à punção de acordo com o afastamento do pilar para Laje BD28-P1

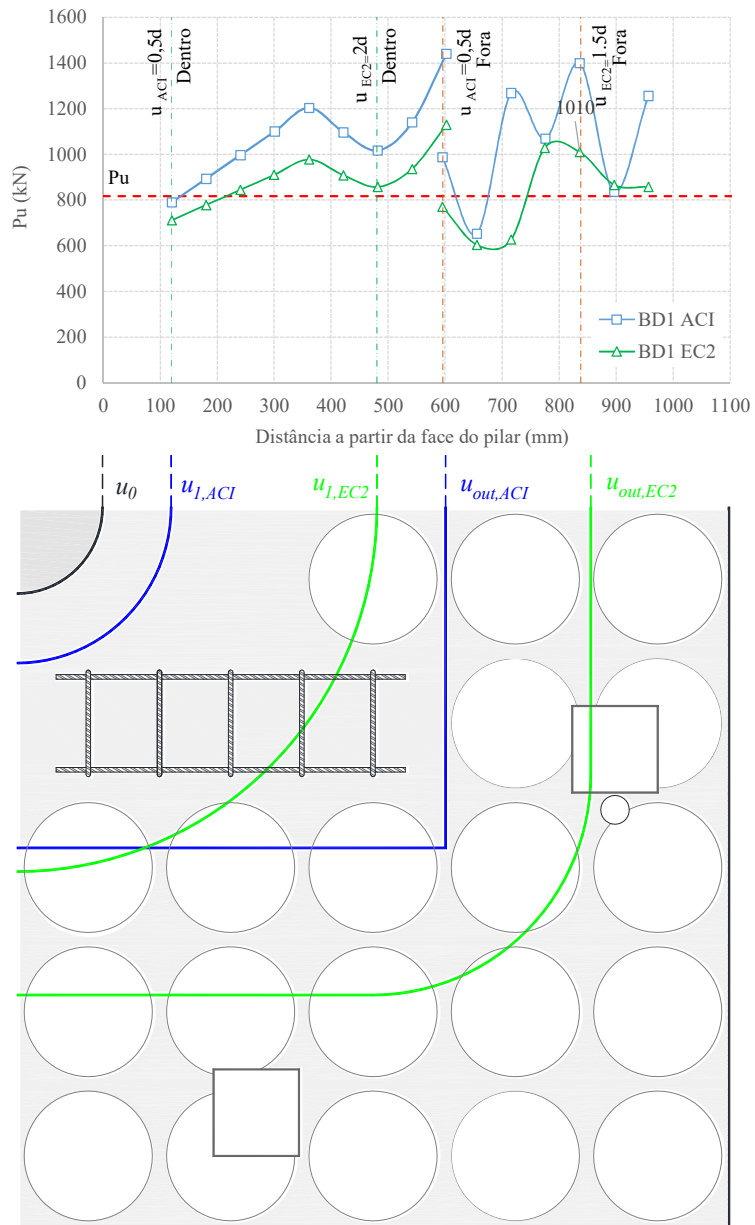


Figura 6.5 – Variação da Resistência à punção de acordo com o afastamento do pilar para Laje BD1

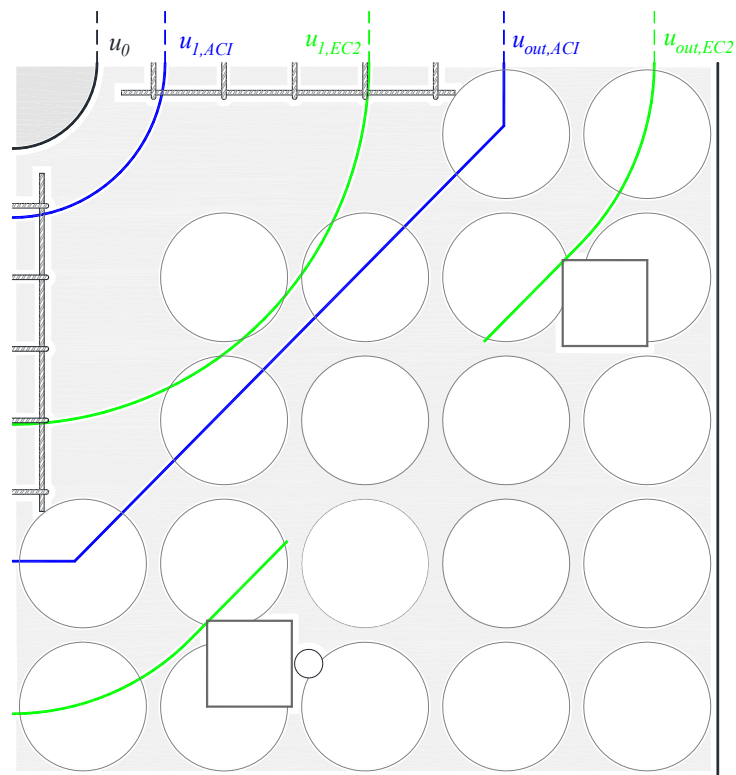
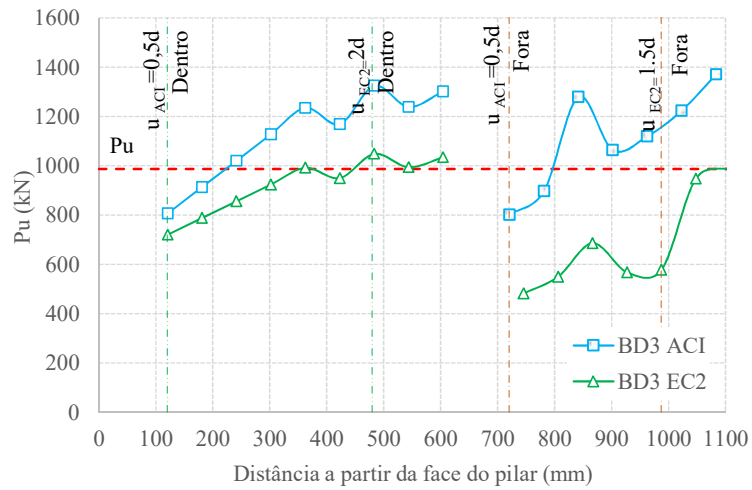


Figura 6.6 – Variação da Resistência à punção de acordo com o afastamento do pilar para Laje BD3.

6.5. PROPOSTAS PARA ADEQUAÇÃO DA NBR 6118:2014

A análise da aplicação das normas e especificamente da NBR 6118 apontou os principais fatores que podem limitar a sua utilização para o caso em estudo, sobretudo na predisposição da NBR em estimar um modo de ruptura dentro da região reforçada ao cisalhamento, em específico as lajes do Grupo 2, além de não prever de forma correta a carga de lajes BD sem armadura de cisalhamento. Especificamente, na proposta da BD se notou uma tendência das normas em superestimar a parcela resistente fora desta região. Já a proposta de subtração de áreas mostrou demasiada suscetibilidade à localização do perímetro de controle e conseqüente quantidade de esferas que este intercepta, além de ser pouco usual do ponto de vista prático.

Diante do exposto, pretende-se avaliar a aplicabilidade de verificações adicionais na estimativa da resistência à punção de lajes *BubbleDeck*, com pilar interno e carregamento simétrico, com o objetivo de facilitar o processo de verificação, minimizar os problemas encontrados na forma que as proposições anteriores foram aplicadas e melhorar seu rendimento de previsão.

Para presente pesquisa serão tratadas duas diferentes abordagens. Na primeira será feita uma análise de cisalhamento nas nervuras, considerando-as apoiadas na região maciça das lajes, que para o caso das lajes desta pesquisa varia em forma e dimensões. Na segunda abordagem, serão propostas verificações adicionais à punção na previsão que utiliza as recomendações de cálculo da NBR 6118 para lajes maciças, associadas as recomendações da *BubbleDeck international*.

6.5.1. Verificação adicional do cisalhamento nas nervuras

Nesta abordagem é verificada a possibilidade de ruptura por cisalhamento nas nervuras utilizando as recomendações da NBR 6118. Nesta análise, a resistência total na região com vazios é considerada como o somatório das resistências individuais de cada nervura que convergem na região maciça das lajes, e foi baseada nos estudos de ALBUQUERQUE (2009) e SOARES (2004). Para o caso das lajes desta pesquisa, que varia o maciço em forma e dimensões, a quantidade de nervuras para cada laje foi adotada conforme representado na Figura 6.7. As formulações utilizadas para verificações como vigas sem armadura de cisalhamento são aquelas da Equação 6.3 e Equação 6.4.

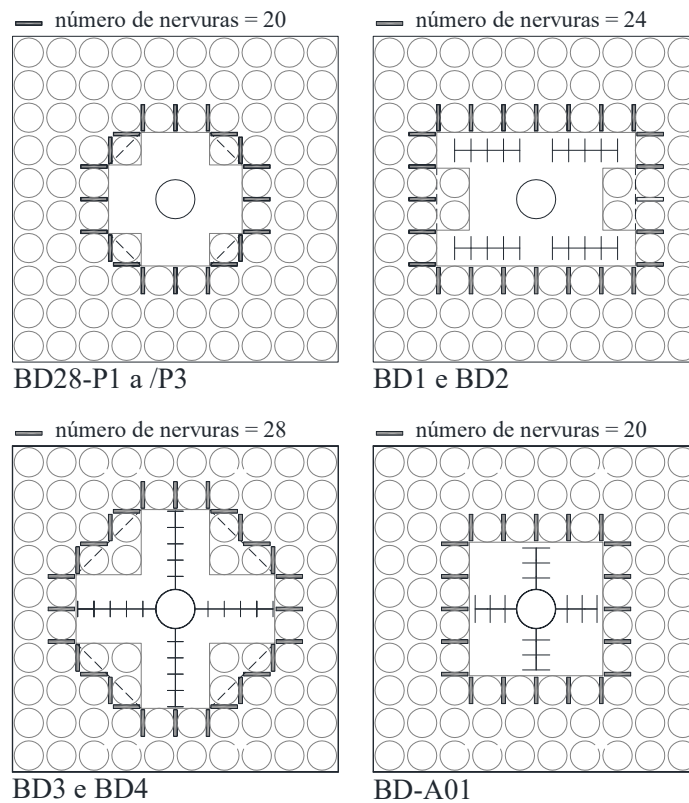


Figura 6.7 – Quantidade de nervuras por laje

$$V_{R,NB1} = 0,6 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad \text{Equação 6.3}$$

$$f_{cd} = f_{ctk} / \gamma_c = 0,7 \cdot f_{ctm} / \gamma_c \quad \text{Equação 6.4}$$

onde b_w é a menor largura da seção, compreendida ao longo da altura útil d .

Em uma análise preliminar de dimensionamento, a adoção da menor largura b_w como recomendado em norma levou a valores extremamente conservadores, com relação de 3,75 entre a carga experimental e carga estimada pela norma. Devido a particularidade das lajes *BubbleDeck* apresentarem largura variável ao longo dos eixos, se resolveu optar pela determinação de uma largura efetiva $b_{w,ef}$. Este valor foi considerada como sendo a largura de uma seção retangular com área equivalente à área da seção curva original. Para esta aproximação foi encontrado o valor de 73 mm. Os valores calculados com esta proposta estão apresentados na Tabela 6.18.

Tabela 6.18 – Verificação do cisalhamento nas nervuras

| Série | Modelos | V_u (kN) | $V_{R,nerv}$ (kN) | $V_u/V_{R,nerv}$ |
|-------------------|-----------|---------------|----------------------|------------------|
| Presente Pesquisa | BD28 - P1 | 639 | 744 | 0,86 |
| | BD28 - P2 | 648 | 757 | 0,86 |
| | BD28 - P3 | 693 | 757 | 0,92 |
| | BD1 | 817 | 863 | 0,95 |
| | BD2 | 833 | 912 | 0,91 |
| | BD3 | 995 | 860 | 1,16 |
| | BD4 | 846 | 899 | 0,94 |
| Ceballos (2017) | BD-A01 | 742 | 574 | 1,29 |
| Média | | | | 0,99 |
| COV | | | | 0,15 |

onde $V_{R,nerv}$ é a resistência ao cisalhamento nas nervuras

A verificação ao cisalhamento das nervuras se mostrou uma boa alternativa com resultados adequados, relação média $V_u/V_{R,nerv}$ de 0,99 e coeficiente de variação de 0,15. Porém, como ponto negativo se destaca o número de resultados contra a segurança, seis de um total de oito, o que inviabiliza sua aplicação imediata. Quando se compara os cálculos para laje, a NBR 6118 apresentou menos resultados desfavoráveis para as propostas anteriores, com boa relação $V_u/V_{R,nerv}$ e menor coeficiente de variação, apesar das particularidades já citadas. Diante do exposto, a verificação do cisalhamento nas nervuras em lajes *BubbleDeck* deve ser tomada com cautela, necessitando de uma forma mais adequada para determinação da quantidade e largura das nervuras.

6.5.2. Proposta de verificação à punção de acordo com a NBR 6118

As previsões da NBR 6118 (2014) adaptadas de acordo com as recomendações da *BubbleDeck* oferecem uma estimativa segura para as lajes desta pesquisa, porém apresentam pontos que podem ser aperfeiçoados. Da forma como está, a resistência à punção de lajes *BubbleDeck* é estimada a partir da resistência de uma laje maciça de mesma espessura multiplicada por um coeficiente de ajuste igual à 0,60. A presente pesquisa pretende contribuir com esta proposta, incorporando algumas melhorias no método.

Baseado nos resultados experimentais desta pesquisa, pode-se assegurar que para lajes *BubbleDeck* com região maciça de dimensão superior ou igual a $1,5.d$ em torno do pilar, este coeficiente de ajuste pode ser alterado com segurança para 0,70.

Adicionalmente, recomenda-se que seja considerado na verificação da ruptura passando pela região armada ao cisalhamento a contribuição das treliças na resistência à punção. Esta proposição tem como fundamento melhorar as previsões do modo de ruptura, uma vez que experimentalmente se notou uma predisposição dos modelos apresentarem ruptura fora da região reforçada ou ruptura mista, enquanto as previsões para maioria das lajes indicava rupturas ocorrendo dentro da região armada ao cisalhamento. Incorporando a parcela de contribuição das treliças esta adequação pode incrementar a resistência dentro da área reforçada e conforme o caso prever de modo mais preciso a carga e modo de ruptura das lajes.

Levando ainda em consideração o modo de ruptura experimental e a inclinação média da fissura crítica de cisalhamento, que apresentou nos ensaios uma predisposição em cruzar a primeira linha de esferas com uma inclinação média de $44,6^\circ$, recomenda-se que seja realizada uma verificação adicional em um perímetro de controle afastado à $d/2$ da região maciça em torno do pilar, aqui denominado de $V_{R,out}^2$, sendo indicada para lajes com armadura de cisalhamento e lajes sem este reforço. Na Figura 6.8 está representado o perímetro considerado para as lajes desta pesquisa e a laje de CEBALLOS (2017), as lajes de HELD e PFEFFER (2002) não foram incluídas por não apresentarem maciço em torno do pilar.

Os valores calculados com esta proposta estão apresentados na Tabela 6.19, e entre parênteses está representada a carga de ruptura experimental ajustada numericamente, conforme item 5.6.

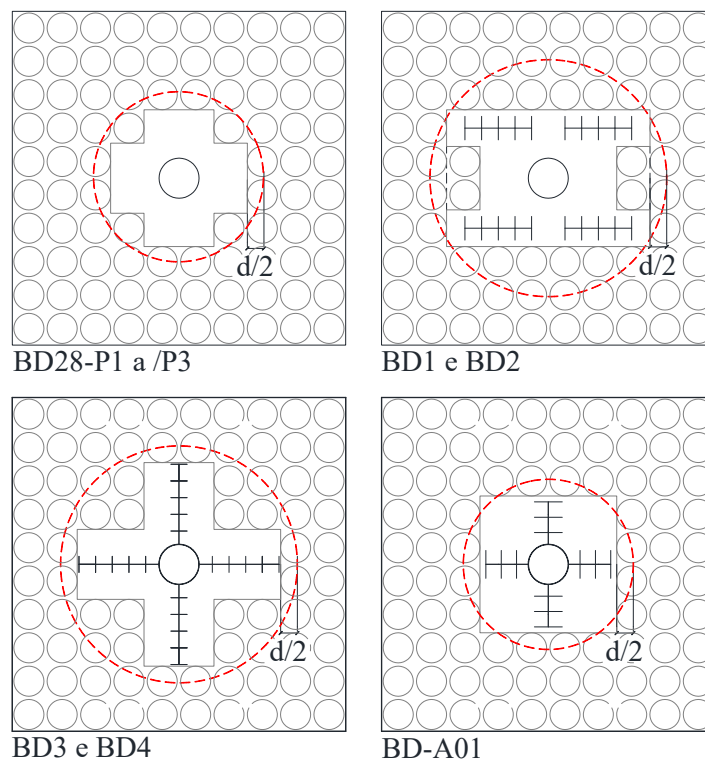


Figura 6.8 – Representação do perímetro de controle adicional para NBR 6118

Tabela 6.19 – Cargas de ruptura previstas pela proposta da presente pesquisa para NBR 6118 (2014)

| Série | Modelos | V_u (kN) | $V_{R,c}$ (kN) | $V_{R,cs}$ (kN) | $V_{R,out}$ (kN) | $V_{R,out}^2$ (kN) | V_R (kN) | V_u/V_R | Modo de Ruptura | |
|-------------------|-----------|---------------|-------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|---------------|--------------------|-----------------------|--------|
| | | | | | | | | | Previsto | Real |
| Presente Pesquisa | BD28 - P1 | 639 (722) | 689 | | | 683 | 683 | 0,94 (1,06) | FR² | NV* |
| | BD28 - P2 | 648 (790) | 701 | | | 690 | 690 | 0,94 (1,14) | FR² | NV |
| | BD28 - P3 | 693 (845) | | 963 | 967 | 690 | 690 | 1,00 (1,22) | FR² | FR* |
| | BD1 | 817 | | 888 | 1191 | 925 | 888 | 0,92 | DT | FR |
| | BD2 | 833 | | 936 | 1240 | 933 | 933 | 0,89 | FR² | DT/FR* |
| | BD3 | 995 | 958 | 969 | 796 | 935 | 796 | 1,25 | FR | FR |
| | BD4 | 846 | 997 | 1011 | 715 | 941 | 715 | 1,18 | FR | DT/FR |
| Ceballos (2017) | BD-A01 | 742 | 653 | 851 | 965 | 662 | 662 | 1,12 | FR² | - |
| | | | | | | | | Média | 1,03 (1,10) | |
| | | | | | | | | COV | 0,12 (0,11) | |

onde FR² é a ruptura fora da região armada ao cisalhamento, em uma região a $d/2$ do maciço. Entre parênteses, na coluna V_u , está representada a carga de ruptura experimental ajustada numericamente, na coluna V_u/V_R está a representada a relação entre este valor e o estimado normativamente.

Percebe-se que a modificação proposta melhorou a previsão da norma Brasileira, uma vez que manteve sua estimativa em um nível de segurança aceitável. A relação V_u/V_{Norma} , desta proposta em relação a proposta da BD, passou de 1,18 para 1,03 acompanhado por

uma redução no coeficiente de variação, passando de 0,13 para 0,12, continuando segura sem comprometer o nível de dispersão dos resultados.

Levando em conta os valores ajustados de carga última para as lajes da 1ª Série, a relação entre a carga experimental e a carga prevista passa para 1,10, com coeficiente de variação igual a 0,11. Com esta consideração, as previsões contra a segurança, $V_u/V_{Norma} < 1$, passam de quatro para apenas duas.

Quanto ao modo de ruptura, vê-se que a consideração da contribuição da parcela das treliças na resistência dentro da zona reforçada e a verificação adicional em um perímetro de controle a $d/2$ foi fundamental para melhorar a porcentagem de acertos desta norma. Esta proposta de adequação não acertou o modo de ruptura apenas da laje BD1.

Na Figura 6.9 é possível ver o comparativo das previsões do modo de ruptura para todas propostas. As sugestões da presente pesquisa permitiram reduzir o erro para 14%, enquanto a proposta BD e proposta da subtração de área erraram em suas previsões 43% e 57%, respectivamente.

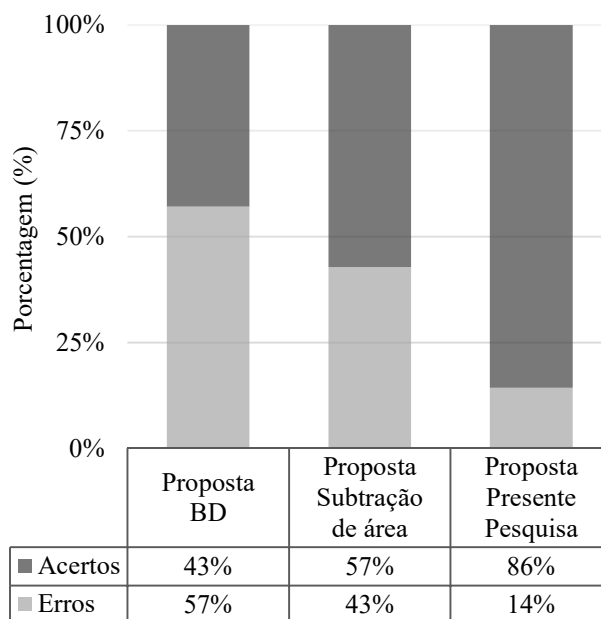


Figura 6.9 – Previsão do modo de ruptura para as diferentes propostas

7. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa se avaliou o comportamento à punção da ligação laje pilar para o sistema estrutural de lajes tipo *BubbleDeck*, com pilar interno à edificação e carregamento simétrico. O estudo experimental envolveu 11 ensaios em escala real de ligações de lajes com pilares circulares, avaliando-se, além do tipo de sistema estrutural, a variação de parâmetros como uso de pré-lajes, a influência da distribuição e ancoragem das armaduras de cisalhamento. Os modelos experimentais foram numericamente simulados com um programa de elementos finitos e posteriormente submetidos às condições de cálculo recomendadas por diversas normas vigentes, adaptadas ao problema de lajes com vazios. A partir das diversas etapas desta pesquisa, foi possível obter as seguintes conclusões:

7.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL

De maneira geral, o sistema de ensaio e o mecanismo de carregamento funcionou de forma satisfatória podendo ser considerado adequado como foi utilizado. Um único inconveniente foi observado na 1ª série de ensaios, em que uma célula de carga apresentou defeito durante o processo, mesmo após testes preliminares que apontavam seu correto funcionamento. Para esta série, foi constatado que a carga real era superior à mostrada no indicador digital.

Testes posteriores do equipamento danificado e simulações numéricas computacionais, calibradas com os resultados experimentais, indicam que o valor total da carga é até 22% acima dos valores obtidos considerando o somatório da carga indicado pelas células. As demais leituras não foram afetadas pelo mau funcionamento deste equipamento, sendo possível realizar análises e comparações dentro desta série, porém com as devidas ressalvas. Para as demais séries, os equipamentos funcionaram de modo adequado para o sistema selecionado.

Em relação aos resultados experimentais é constatado que as lajes *BubbleDeck* com armadura de cisalhamento são 5% a 19% menos resistentes à punção do que as lajes maciças de referência, de mesma altura. Para lajes BD sem armadura de cisalhamento este valor passa para até 25% de redução.

No que diz respeito a utilização de pré-laje, os modelos apresentaram comportamento semelhante quanto a capacidade de carga, deslocamentos, deformação no concreto e no

aço, o que evidencia que o sistema construtivo não interferiu no comportamento destas variáveis.

Analisando a distribuição e ancoragem da armadura de cisalhamento ficou constatado que a laje com estas armaduras distribuídas em cruz e ancoradas na armadura de flexão principal superior e inferior apresentou capacidade de carga superior as demais lajes, com características de ancoragem menos restritivas, ancorando apenas na armadura superior ou também sem esta ancoragem.

A partir dos cortes das lajes ensaiadas foi possível identificar que para as lajes *BubbleDeck* se tem tendência da superfície de ruptura passar pela primeira linha de esferas fora da região maciça, com uma inclinação média de $44,6^\circ$.

Dos resultados apresentados, as deformações tangenciais e radiais na face comprimida laje tiveram comportamento similar para um mesmo nível de carga, o que indica que o método construtivo (*BubbleDeck* vs. Maciça) não interferiu significativamente nestas deformações. Da mesma forma, as deformações na armadura principal, apresentaram valores similares para todas lajes ensaiadas.

Na comparação de lajes *BubbleDeck* e Maciça verificamos que a partir da formação das primeiras fissuras, o deslocamento médio, para um mesmo nível de carga, das lajes com vazios era ligeiramente superior ao das lajes maciças. Porém, devido ao sistema de ensaio adotado, não foi possível quantificar a proporção entre eles.

Para os estribos, os dados apresentados nesta pesquisa indicam uma maior solicitação conforme se otimiza gradualmente a forma de ancoragem, passando de sem ancoragem, para ancoragem parcial e por fim ancoragem total.

O padrão de fissuração das lajes apresentou-se de forma simétrica. Para todas lajes o processo de fissuração foi similar, com o aparecimento e propagação de fissuras radiais até o aparecimento das primeiras fissuras tangenciais. Após este nível de carga, as fissuras radiais existentes apenas abriam e mais fissuras tangenciais surgiam ao redor da área carregada. Este comportamento manteve-se até o momento da ruptura da laje.

7.2. ANÁLISE NUMÉRICA

O programa FEMIX 4.0 foi empregado para simular o comportamento das lajes *BubbleDeck* e maciças e de modo geral foi demonstrado uma boa performance preditiva do MEF em termos de previsão de carga última experimental. Resultados de carga aplicada versus deslocamento médio na borda das lajes obtidas experimentalmente e numericamente também indicam uma boa previsão do MEF em termos desta resposta. Por outro lado, o decaimento de carga observado experimentalmente devido a ruptura por punção não é capturado numericamente por dificuldades no processo de convergência numérica das simulações.

A boa performance de previsão do modelo nas simulações destas estruturas também são reveladas em termos de deformações da armadura principal e deformações do concreto na face inferior da laje. Os valores obtidos no MEF foram comparados com os equivalentes valores experimentais dos extensômetros e mostram equivalência entre o modelo numérico e os resultados experimentais.

Do FEMIX 4.0, também foram extraídos pela análise não-linear, os resultados de deformação nos estribos. No entanto, os valores obtidos numericamente se aproximaram dos experimentais para poucas lajes.

Desta forma, este modelo aplicado as lajes abre a possibilidade de realizar diversas variações com objetivo de avaliar o comportamento de lajes *BubbleDeck*, considerando suas capacidades de carga, deslocamento, deformações da armadura principal e no concreto.

Visando solucionar o problema identificado nas lajes da 1ª Série, deu-se início ao desenvolvimento de simulações numéricas computacionais que, calibradas com os resultados experimentais, forneceram subsídios para propor um ajuste na carga final destas lajes. Os resultados obtidos foram coerentes e forneceram uma estimativa razoável/racional da proporção de carga que deve ser adotada para ajustar tais valores.

7.3. MÉTODOS TEÓRICOS DE CÁLCULO

A análise da aplicação das normas associadas as recomendações de cálculo da *BubbleDeck* mostraram que o ACI, assim como o MC2010, tende a superestimar as cargas das lajes sem armadura de cisalhamento, pois o perímetro de controle não intercepta a região com vazios e o fator de redução não é aplicado. As estimativas do EC2 e NBR apresentam bons resultados para as lajes *BubbleDeck* desta pesquisa, inclusive para lajes sem armadura de cisalhamento. Porém, na previsão do modo de ruptura o EC2 e NBR preveem para maioria das lajes a ruptura dentro da região reforçada, diferindo do observado experimentalmente.

Nas estimativas de cálculo aplicadas com a proposta de subtração de área, o ACI e MC2010 não representam bem os resultados experimentais das lajes sem armadura de cisalhamento, pelos mesmos motivos da proposta da *BubbleDeck*. Para a relação V_u/V_{norma} as estimativas do EC 2 e NBR apresentaram boa correlação, porém não foi suficiente para estimar com precisão o modo de ruptura das lajes. Para esta proposta também se destaca a suscetibilidade da previsão de carga em função da localização do perímetro de controle e conseqüente quantidade de vazios que este intercepta.

Especificamente para a NBR 6118 foram propostas duas metodologias de verificação adicional. Na primeira, a resistência foi tomada pela soma das resistências individuais das nervuras que se apoiavam no maciço em torno do pilar. Esta abordagem apesar de apresentar previsões de carga próximas dos valores experimentais, acabou mostrando 75% dos resultados contra a segurança ($V_u/V_{norma} < 1$), o que inviabiliza sua aplicação imediata. Para esta metodologia, são necessários estudos mais aprofundados visando melhorar sua previsão.

As previsões à punção da NBR 6118 (2014) adaptadas de acordo com as recomendações da *BubbleDeck* e das sugestões desta pesquisa oferecem uma estimativa segura para as lajes analisadas. Com base nos resultados obtidos experimentalmente foram propostas três adequações a esta metodologia: (1) aumento do coeficiente de cálculo de 0,60 para 0,70; (2) consideração das treliças na resistência à punção e (3) uma verificação adicional em um perímetro de controle circular afastado $d/2$ da região maciça.

Embora seja um método aproximado e não possa ser generalizado, as previsões conforme as adequações propostas se mostrou promissora, com boa concordância em relação aos

resultados experimentais. Outro benefício importante foi verificado na previsão do modo de ruptura das lajes, uma vez que esta proposta passou a prever de maneira correta 86% das lajes *BubbleDeck* desta pesquisa.

7.4. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando entender em profundidade o comportamento de ligações de lajes lisas do tipo *BubbleDeck*, é evidente que ainda são necessários mais estudos, com destaque para: realizar ensaios experimentais adicionais variando o tamanho do maciço, de forma a obter uma relação entre suas dimensões e a resistência à punção da ligação; realizar ensaios de lajes *BubbleDeck* submetidas a carregamento desbalanceado; aprimorar o sistema de ensaio para lajes com pilar interno à edificação e carregamento simétrico, obtendo um perfil de deslocamento com maior simetria; desenvolver mais análises incluindo a verificação de cisalhamento nas nervuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA KM, ALSHEGEIR A, CHEN WF. *Analysis and design of mushroom slabs with a strut-tie model*. Computers & Structures 1996;58:429–34.

AHMED FALEH AL-BAYATI AND LESLIE A. CLARK, T. L. L. *Concentric Punching Shear of Waffle Slab*. Structural Journal, v. 112, n. 5, 2015.

AIRDECK. *AirDeck: The lightweight floorsystem bridging architecture, stability & technics*, 2016. Disponível em: <<http://www.airdeck.be/en/index.php?n=135>>

ALBRECHT, C; ALBERT, A.; PFEFFER, K.; SCHNEL, J. *Design and construction of two-way spanning reinforced concrete slabs with flattened rotationally symmetrical void formers*. Beton- und Stahlbetonbau, v. 107, n. 9, p. 590–600, 2012.

ALBUQUERQUE, N. G. B. DE. *Análise experimental de lajes lisas nervuradas de concreto armado com região maciça de geometria variável ao puncionamento*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, 2009.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *ACI 318 (2014). ACI Committee 318 – Building Code Requirements for Structural Concrete*, Farmington Hills, Michigan, 2014.

ANDERS BRØNDEN; HAUKOHL, J. C.; JØRGENSEN, M. H. *Gennemlokningsstyrken af Bobbledaek*. Report. The Technical University of Denmark, Lyngby - Denmark: 2002.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6892 Materiais metálicos — Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente*, Rio de Janeiro, 2013.

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

ASSOCIES B.V., A. P. &. *Comparison of BubbleDeck vs.Hollow core*. Report, 1997.

ASSOCIES B.V., A. P. &. *Sound Resistance*. Report, 1997.

BARROS, J. A. O. *Debilities and strengths of FEM-based constitutive models for the material nonlinear analysis of steel fiber reinforced concrete structures*. (J. B. and E. L. V. Saouma, Ed.) California: 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2016

BARROS J.A.O., MORAES NETO B.N., MELO G.S.S.A., FRAZÃO C.M.V. *Assessment of the effectiveness of steel fibre reinforcement for the punching resistance of flat slabs by experimental research and design approach*. Composites Part B: Engineering, v. 78, p. 8–25, 2015.

BARROS, J. A. O. REZAZADEH, M.; LARANJEIRA, J. P. S.; HOSSEINI, M. R. M; MASTALI, M.; RAMEZANSEFAT, H.;. *Simultaneous flexural and punching strengthening of RC slabs according to a new hybrid technique using U-shape CFRP laminates*. Composite Structures, v. 159, p. 600–614, 2017.

BAWENS, P. E. . *Report from the Eindhoven University of Technology*. Eindhoven, Netherland, 1999.

BERG, G. VAN DEN; LEUR, P. H. . VAN DE. *TNO - Report for 230mm deck - fire-safe in 120 minutes*. Report, 1999.

BEUTEL, J. H. R. *Durchstanz en – Versuche und BemessungHamburgDer Pruefingenieur*, Der Pruefingenieur, Hambug, 1999.

BUBBLEDECK. *BubbleDeck Design Guide for compliance with BCA using AS3600 and EC2*, New Zealand, 2008.

BUBBLEDECK. *The Lightweight Biaxial Slab*. Disponível em: <http://www.bubbledeck.ro/BubbleDeck_Presentation.pdf>.

BUBBLEDECK UK. *BubbleDeck Structure Solutions*. Disponível em: <BubbleDeck-UK.com>.

CEBALLOS, M. A. *Análise experimental à punção em lajes tipo BubbleDeck com armadura de cisalhamento*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, 2017.

CEES S. KLEINMANN. *Report from A+U Research Institute - Eindhoven University of Technology*. Eindhoven, 1993.

COBIAX. *Cobix - Ficha tecnica3*, 2006. Disponível em: <www.cobix.cl>

DAVID A., F.; MUSTAFA, M.; MICHAEL, M. *Flat Plate–Voided Concrete Slab Systems: Design, Serviceability, Fire Resistance, and Construction*. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, v. 22, n. 3, p. 4017004, 1 ago. 2017.

EDER, M.A.; VOLLUM, R.L; ELGHAZOULI, A.Y; ABDEL-FATTAH, T. *Modelling and experimental assessment of punching shear in flat slabs with shearheads*. *Engineering Structures*, v. 32, n. 12, p. 3911–3924, 1 dez. 2010.

EUROCODE 2. *Eurocode 2. Design of Concrete Structures, Part 1, General rules and rules for buildings*, Brussels, Belgium, 2004

FELLINGER, J. H. .; BOTH, C. *TNO report for the Weena Tower*. Rotterdam: 1997.

FERREIRA, M. P. (2010). *Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Armaduras de Cisalhamento e Momentos Desbalanceados*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Outubro, 2010.

GUANDALINI, S.; BURDET, O.; MUTTONI, A. *Punching tests of slabs with low reinforcement ratios*. *ACI Structural Journal*, n. 106, p. 87–95, 2009.

HARDING, P. *BubbleDeck - Advanced Structure Engineering*. Cornerstone, News report, 2004.

HASHEMI, S.S; SADEGHI, K; VAGHEFI, M; SIADAT, S.A. *Evaluation of Ductility of RC Structures Constructed with Bubble Deck System*. *International Journal of Civil Engineering*, 2017.

HELD, M.S.; STEFAN, E.; DENK, H; PFEFFER, K. *BubbleDeck. Design of Biaxial Hollow Slabs*. *Annual Journal on Concrete and Concrete Structures*, v. 14, 1999.

HELD, M. S. Report - *Untersuchung an BubbleDeck Modulen*, Technical University of Darmstadt. Darmstadt: 2002.

HELD, M. S.; H., D. *BubbleDeck Time-Dependent Behaviour, Local Punching Additional Experimental Tests*. Annual Journal on Concrete and Concrete Structures, v. 14, p. 137–144, 1999.

HELD, M. S.; PFEFFER, K. *Punching behavior of biaxial hollow slabs*. Cement and Concrete Composites, v. 24, n. 6, p. 551–556, 2002.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. *fib-MC2010 (2012)*. The International Federation for Structural Concrete, *fib Model Code 2010 Final draft*. Volume 2, April 2012.

LAI, T. *Structural Behavior of BubbleDeck Slabs and Their Application to Lightweight Bridge Decks*. Msc-Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2010.

LEDO, M. M. *Análise experimental à punção de lajes lisas tipo BubbleDeck com pilar interno*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, 2016.

LEIPZIG, M. P. FÜR DAS B. *German Test Certificate Number P-SAC 02/IV-065 concerning solid and live load Sound insulation*. Relatório Técnico, 2001.

LEVELT, F. J.; RILL, R. E. *Anchoring - Test report by Koning & Biefait B.V.*, Report, 1998.

LIMA, H. J. N. DE. *Análise experimental à punção de lajes lisas tipo BubbleDeck*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, 2016.

MACGREGOR, J. G.; WIGHT, J. G. *Reinforced concrete : mechanics and design*. 6. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2009.

MORAES NETO, B. N. *Comportamento à Punção de Lajes Lisas em Concreto Reforçado com Fibras de Aço sob Carregamento Simétrico*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Janeiro, 2013.

MOTA, M. *Voided Two-Way Flat Plate Slabs*. Structure magazine, n. April, p. 7, 2009.

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

NGUYEN TN, NGUYEN TT, PANSUK W. *Experimental study of the punching shear behavior of high performance steel fiber reinforced concrete slabs considering casting directions*. Engineering Structures 2017; 131:564–73.

NIELSEN, M. P. *BubbleDeck Report from AEC Consulting Engineers Lt*. Report, 1993.

OLIVEIRA, D. R. C. *Análise experimental de lajes cogumelo de concreto armado com pilares retangulares*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Agosto, 2003.

OLIVEIRA, M. H. DE. *Punção em lajes lisas com armadura de cisalhamento submetidas a carregamento excêntrico e apoiadas sobre pilares retangulares*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Março, 2013.

PARK, R.; GAMBLE, W.L. *Reinforced Concrete Slabs*. John Wiley & Sons Inc., 2nd Edition, 2000.

PÉREZ CALDENTEY, A.; PADILLA, P. L.; PEIRETTI, H.C.; FERNÁNDEZ, F.A. *Influence of stirrup detailing on punching shear strength of flat slabs*. Engineering Structures, v. 49, p. 855–865, 1 abr. 2013.

RICKER, M.; HÄUSLER, F.; RANDL, N. *Punching strength of flat plates reinforced with UHPC and double-headed studs*. Engineering Structures, v. 136, p. 345–354, 1 abr. 2017.

SANTOS, G. S. *Aplicação de mantas de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) como reforço à punção em lajes lisas de concreto armado*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Março, 2014.

SENA-CRUZ, J. M. *Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips*. PhD Thesis, University of Minho, 2004.

SHARLAND, I. *Airborne and Impact Sound Insulation*. Relatório técnico, 2005.

SOARES, Y. V. *Análise experimental de lajes cogumelo nervuradas de concreto armado com pilares metálicos*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, fevereiro, 2004.

TEIXEIRA, M. D.E.; BARROS, J. A.O.; CUNHA, V. M.C.F.; MORAES-NETO, B. N.; VENTURA GOUVEIA, A. *Numerical simulation of the punching shear behaviour of self-compacting fibre reinforced flat slabs*. *Construction and Building Materials*, v. 74, p. 25–36, jan. 2015.

U-BOOT. U-Boot - *Material técnico*. Disponível em: <<http://www.daliform.com/wp-content/uploads/2016/05/piastra-alleggerita-in-cls-armato.jpg>>. Acesso em: 16 nov. 2016.

VALIVONIS, J.; SKUTURNA, T.; DAUGEVIČIUS, M.; ŠNEIDERIS, A. *Punching shear strength of reinforced concrete slabs with plastic void formers*. *Construction and Building Materials*, v. 145, p. 518–527, ago. 2017.

VENTURA GOUVEIA, A. *Constitutive models for the material nonlinear analysis of concrete structures including time-dependent effects*. *PhD Thesys*, University of Minho, 2011.