

**RESISTÊNCIA À PUNÇÃO DE LAJES LISAS DE
CONCRETO ARMADO COM SISTEMA CONSTRUTIVO
*BUBBLEDECK***

RENATA SOARES PIAZZA DAL PONT

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF: JULHO – 2018

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

**RESISTÊNCIA À PUNÇÃO DE LAJES LISAS DE
CONCRETO ARMADO COM SISTEMA CONSTRUTIVO
*BUBBLEDECK***

RENATA SOARES PIAZZA DAL PONT

ORIENTADOR: MARCOS HONORATO DE OLIVEIRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL

BRASÍLIA / DF: JULHO – 2018
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA

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

**RESISTÊNCIA À PUNÇÃO DE LAJES LISAS DE CONCRETO
ARMADO COM SISTEMA CONSTRUTIVO *BUBBLEDECK***

RENATA SOARES PIAZZA DAL PONT

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

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

Prof. Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo, Ph.D (UnB)
(Examinador interno)

Vitor Pimenta de Souza Jardim Júnior, Eng. Civil (UnB)
(Examinador externo)

BRASÍLIA/DF, 04 DE JULHO DE 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

DAL PONT, RENATA SOARES PIAZZA

Resistência à Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Sistema Construtivo *BubbleDeck* [Distrito Federal] 2018.

xx, 93p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018)
Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Punção	2. Lajes lisas
3. <i>Bubbledeck</i>	4. Análise Experimental
I. ENC/FT/UnB	II. Título (Bacharel)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DAL PONT, R.S.P. (2018). Resistência à Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Sistema Construtivo *Bubbledeck*. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 93p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Renata Soares Piazza Dal Pont.

TÍTULO: Resistência à Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Sistema Construtivo *BubbleDeck*.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora.

Renata Soares Piazza Dal Pont
SQSW 303 Bloco A Apartamento 201
CEP: 70.673-301 Brasília – DF – Brasil
e-mail: renatapiazza3@hotmail.com

AGRADECIMENTOS

Este trabalho de conclusão de curso é fruto de uma longa caminhada, na qual estive rodeada de pessoas maravilhosas, que merecem meus agradecimentos.

Primeiramente, agradeço a minha família, a quem eu devo tudo o que sou. Eles são meu maior exemplo de honestidade, cumplicidade e amizade. Obrigada pai, mãe e Gabriela por terem me dado todo apoio que eu precisei durante toda a minha vida e terem sempre entendido minha ausência durante a correria da faculdade.

Agradeço ao meu orientador, Marcos Honorato, com quem eu tive a oportunidade de trabalhar durante os três últimos anos de curso. Sou extremamente grata por tudo que você fez e ainda faz por mim. Você é o grande responsável pelo meu crescimento pessoal e profissional durante esse período de ensino superior. Obrigada, muito obrigada!

Agradeço também ao Grupo de Estudos de Tecnologias da Engenharia Civil (GETEC -UnB) por todas as oportunidades que tive de crescer dentro do ambiente universitário e amizades que fiz.

Por último, mas não menos importante agradeço aos meus amigos de curso, da época do Colégio Militar e do Brown, vocês são fundamentais na minha vida. Obrigada por sempre estarem do meu lado quando precisei.

RESUMO

As lajes tipo *Bubbledeck* podem ser classificadas como sendo lajes ocas ou lajes com vazios, onde os vazios são dados pela adição de esferas plásticas igualmente espaçadas entre duas telas de aço. Uma vantagem deste tipo de laje, além da redução do consumo de materiais, é a possibilidade de reduzir o tempo de execução da obra por apresentar um processo executivo mais rápido, podendo inclusive trabalhar com o conceito de módulos pré-fabricados. Por outro lado, sendo esta uma tecnologia recente no Brasil, ainda existem dúvidas quanto ao dimensionamento e comportamento desse tipo de estrutura. Por se tratar de um sistema de lajes lisas, uma das principais desvantagens é a possibilidade de ruptura por punção na ligação laje-pilar.

Este trabalho apresenta algumas pesquisas realizadas no Brasil e em outros países acerca do comportamento à punção de lajes lisas com vazios através de programas experimentais e análises numéricas e também propostas de adaptações a alguns modelos teóricos para estimar a resistência à punção deste tipo de laje.

Os objetivos principais deste trabalho são avaliar a influência da armadura de cisalhamento no comportamento à punção as lajes lisas do tipo *Bubbledeck*, além do uso de treliça nas nervuras e propor adaptações aos modelos de cálculo das normas do ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2004) e suas correções AC Eurocode 2 (2010) e BS Eurocode (2014), ABNT NBR 6118 (2014) e *fib Model Code 2010* (2013), visto que nenhuma delas prevê a presença de vazios no interior da laje.

ABSTRACT

Bubbledeck slabs can be classified as hollow slabs or slabs with voids, where the voids are given by the addition of equally spaced plastic spheres between two steel meshes. An advantage of this type of slab, besides the reduction of the consumption of materials, is the possibility of reducing the time of execution of the construction by presenting a faster executive process, being able to even work with the concept of prefabricated modules. On the other hand, being a recent technology in Brazil, there are still doubts about the design and behavior of this type of structure. Because it is a flat slab system, one of the main disadvantages is the possibility of punching rupture in the slab-column connection.

This work presents some researches carried out in Brazil and in other countries about the punching shear behavior of flat slabs with voids through experimental programs and numerical analyzes and also proposals of adaptations to some theoretical models to estimate the punching resistance of this type of slab.

The main objectives of this work are to evaluate the influence of the shear reinforcement on the punching shear behavior of the Bubbledeck slabs and the use of trusses in the space between the plastic balls and to propose adaptations to the calculation models of the ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2004) and its corrections AC Eurocode 2 (2010) and BS Eurocode (2014), ABNT NBR 6118 (2014) and fib Model Code 2010 (2013), since none of them predict the presence of voids inside the slab.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. MOTIVAÇÃO	5
1.3. OBJETIVOS.....	6
1.4. METODOLOGIA	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1. CARACTERÍSTICAS DA RUPTURA POR PUNÇÃO.....	8
2.2. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA À PUNÇÃO	9
2.2.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.....	10
2.2.2. TAXA DE ARMADURA DE FLEXÃO TRACIONADA.....	11
2.2.3. DIMENSÕES E GEOMETRIA DO PILAR.....	11
2.2.4. <i>SIZE EFFECT</i>	12
2.2.5. ARMADURAS DE CISALHAMENTO.....	12
2.3. PESQUISAS SOBRE LAJES LISAS TIPO <i>BUBBLEDECK</i>	15
2.3.1. HELD (2002).....	15
2.3.2. NICÁCIO (2018).....	18
2.3.3. CEBALLOS (2017).....	26
2.3.4. VALIVONIS <i>et al.</i> (2017).....	30
2.3.5. HAI <i>et al.</i> (2013)	34
2.4. PRESCRIÇÕES NORMATIVAS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO DE LAJES LISAS MACIÇAS	36
2.4.1. ABNT NBR 6118 (2014)	37

2.4.2. EUROCODE 2	38
2.4.3. ACI 318 (2014).....	39
2.4.4. Fib Model Code 2010 (2013)	41
3. METODOLOGIA	46
3.1. COLETA DO BANCO DE DADOS	46
3.2. ADAPTAÇÕES AOS MODELOS DE CÁLCULO DE PRESCRIÇÕES NORMATIVAS	48
3.2.1. Hipóteses de cálculo 1, 2, 3 e 4	48
3.2.2. Hipótese de cálculo 5.....	51
4. RESULTADOS.....	54
5. CONCLUSÕES	71
6. REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS	72

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 1– Características e resultados das lajes ensaiadas por Held (2002).....	17
Tabela 2 – Características das lajes ensaiadas por NICÁCIO (2018).....	18
Tabela 3 – Características e valores de carga última experimental das lajes ensaiadas por Ceballos (2017).	26
Tabela 4 – Características e resultados experimentais das lajes ensaiadas por Valivonis <i>et al.</i> (2017).	30
Tabela 5 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados calculados pelo método teórico proposto.....	34
Tabela 6 – Características das lajes ensaiadas por Hai <i>et al.</i> (2013).....	35
Tabela 7 – Comparação entre os resultados experimentais e da análise numérica.	36
Tabela 8 – Banco de dados das lajes lisas com vazios	47
Tabela 9 – Resumo das hipóteses de cálculo 1 a 4 adotadas.....	50
Tabela 10 – Resultados da hipótese de cálculo 1 para o Eurocode 2 (2014).	54
Tabela 11 – Resultados da hipótese de cálculo 1 para a ABNT NBR 6118 (2014).....	55
Tabela 12 – Resultados da hipótese de cálculo 1 para o ACI 318 (2014).....	56
Tabela 13 – Resultados da hipótese de cálculo 1 para o <i>fib</i> Model Code 2010 (2013).	57
Tabela 14 – Resultados da hipótese de cálculo 2 para o Eurocode 2 (2014).	58
Tabela 15 – Resultados da hipótese de cálculo 2 para a ABNT NBR 6118 (2014).....	59
Tabela 16 – Resultados da hipótese de cálculo 2 para o <i>fib</i> Model Code 2010 (2013).	60
Tabela 17 – Resultados da hipótese de cálculo 3 para o Eurocode 2 (2014).	61
Tabela 18 – Resultados da hipótese de cálculo 3 para a ABNT NBR 6118 (2014).....	61
Tabela 19 – Resultados da hipótese de cálculo 4 para o Eurocode 2 (2014).	62
Tabela 20 – Resultados da hipótese de cálculo 4 para a ABNT NBR 6118 (2014).....	62
Tabela 21 – Resultados da hipótese de cálculo 5 para o Eurocode 2 (2014).	63
Tabela 22 – Resultados da hipótese de cálculo 5 para a ABNT NBR 6118 (2014).....	64
Tabela 23 – Resultados da hipótese de cálculo 5 para o ACI 318 (2014).....	65
Tabela 24 – Resultados da hipótese de cálculo 5 para o <i>fib</i> Model Code 2010 (2013).	66

Tabela 25 – Grupo 1: Lajes sem a presença de uma região maciça.....	67
Tabela 26 – Grupo 2: Lajes sem a presença de armadura de cisalhamento na região maciça. 67	67
Tabela 27 – Grupo 3: Lajes com a presença de armadura de cisalhamento na região maciça. 68	68
Tabela 28 – Resumo das hipóteses de cálculo para o Grupo 1.	69
Tabela 29 - Resumo das hipóteses de cálculo para o Grupo 2.	69
Tabela 30 - Resumo das hipóteses de cálculo para o Grupo 3.	69

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1 - Sistema construtivo de laje lisa tipo <i>Bubbledeck</i> . [http://aligadaengenharia.blogspot.com.br].....	1
Figura 2 – Métodos construtivos da <i>Bubbledeck</i> . (a) Módulo reforçado	2
Figura 3 – Ruptura por punção. [GUANDALINI, 2006].....	4
Figura 4 – Colapso parcial do edifício <i>Pipers Row Car Park</i> . [WOOD, 1997].....	4
Figura 5 – Colapso do edifício de garagem <i>Tropicana Casino</i> . [https://failures.wikispaces.com].....	5
Figura 6 – Ruptura por punção de uma piscina na Rússia.	5
Figura 7 – Lajes lisas. [adaptado – FERREIRA (2010)].....	8
Figura 8 – Inclinação das fissuras de cisalhamento. [modificado – EUROCODE 2:2004].....	9
Figura 9 – Modos de ruptura por punção em lajes lisas com armadura de cisalhamento. [FERREIRA (2010)]	9
Figura 10 – Relação entre capacidade resistente à punção e a resistência à compressão do concreto. [FERREIRA (2010)]	10
Figura 11 – Tipos de armaduras de cisalhamento para lajes lisas. [FERREIRA (2010)]	14
Figura 12 – Formas de distribuição das armaduras de cisalhamento. [SANTOS (2016)]	15
Figura 13 – Vistas superior e corte dos painéis de laje ensaiados por Held (2002).....	16
Figura 14 – Superfície de ruptura da laje ensaiada por Held. (2002).....	16
Figura 15 – Comprimentos para redução da área crítica de cisalhamento propostos por Held (2002).	17
Figura 16 – Lajes ensaiadas por NICÁCIO (2018) - (a) RSP28 (b) BD28-P1.....	19
Figura 17 – Lajes ensaiadas por NICÁCIO (2018) - (a) BD28-P2 (b) BD28-P3.....	19
Figura 18 – Lajes ensaiadas por NICÁCIO (2018) - (a) BD1 (b) BD2.	20
Figura 19 – Lajes ensaiadas por NICÁCIO (2018) - (a) SS1 (b) SS2.	20
Figura 20 – Lajes ensaiadas por NICÁCIO (2018) - (a) BD3 (b) BD4 (c) SS1 3ª Série.....	21
Figura 21- Detalhe das pré-lajes.....	22
Figura 22 – Posição de corte das lajes BD28-02, SS1, BD1, BD3, BD4.....	22
Figura 23 - Seção de corte da laje BD28-P2.	23
Figura 24 - Seção de corte da laje BD1.....	23

Figura 25 - Seção de corte da laje BD3.....	23
Figura 26 - Seção de corte da laje BD3.....	23
Figura 27 - Seção de corte da laje SS1 3ª série.....	23
Figura 28 - Seção de corte da laje BD4.....	23
Figura 29 – Detalhe das áreas a serem desconsideradas na proposta de Nicácio (2018).....	24
Figura 30 - Representação do perímetro de controle adicional para NBR 6118 proposto por Nicácio (2018).....	25
Figura 31 – Planta e cortes das lajes (a) RSP-A01 (b) BD-A01.....	27
Figura 32 – Planta e cortes das lajes (a) BD-A02 (b) BD-A03.....	28
Figura 33 – Planta e cortes das lajes (a) BD-A04 (b) BD-A05.....	29
Figura 34 – Características das lajes BPR1.....	31
Figura 35 – Características das lajes BPR2.....	32
Figura 36 – Características da laje BPR3.....	33
Figura 37 – Dimensões das formas plásticas dos vazios das lajes – a) Visão Superior e b) Visão Lateral.....	35
Figura 38- Características das lajes ensaiadas por Hai <i>et al.</i> (2013).....	35
Figura 39 – Modelo numérico da laje com vazios esféricos.....	36
Figura 40 – Definição do perímetro de controle u_1 de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014).	37
Figura 41 – Definição do perímetro de controle u_{out} de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014).	38
Figura 42 – Definição do perímetro de controle u_{out} de acordo com o Eurocode 2.....	39
Figura 43 – Definição do perímetro de controle u_1 de acordo com o ACI 318 (2014).	40
Figura 44 – Definição do perímetro de controle u_{out} de acordo com o ACI 318 (2014).	41
Figura 45 – Rotação ψ da laje.....	41
Figura 46 – Altura útil efetiva considerada no modelo do <i>fib</i> Model Code 2010 (2013).	41
Figura 47 – Perímetro de controle básico em volta da área carregada (b_1).....	42
Figura 48 - Redução do perímetro de controle básico para grandes áreas carregadas.....	42
Figura 49 – Perímetro de controle para lajes com armadura de cisalhamento (u_{out}).....	45
Figura 50– (a) Exemplificação dos vazios deixados pelas esferas na seção delimitada pelo perímetro (b) Exemplificação de como foram tomados os valores a serem descontados da área da seção do perímetro (SANTOS, 2016)	49

Figura 51 – Relação entre a redução de volume e a redução da capacidade resistente para a estimativa do Eurocode 2 (2014).....	51
Figura 52 – Relação entre a redução de volume e a redução da capacidade resistente para a estimativa da ABNT NBR 6118 (2014).....	52
Figura 53 – Relação entre a redução de volume e a redução da capacidade resistente para a estimativa do ACI 318 (2014).....	52
Figura 54 – Relação entre a redução de volume e a redução da capacidade resistente para a estimativa do <i>fib</i> Model Code 2010 (2013).....	52

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área da seção crítica de cisalhamento (abordagem – HELD (2002));
A_{BD}	Áreas a serem descontadas devido à presença das esferas <i>Bubbledeck</i> ;
$A_{BD,out}$	Áreas a serem descontadas devido à presença das esferas <i>Bubbledeck</i> no perímetro crítico u_{out} ;
$A_{BD,1}$	Áreas a serem descontadas devido à presença das esferas <i>Bubbledeck</i> no perímetro crítico u_1 ou b_0 ;
$A_{c,ef}$	Área de concreto efetiva a ser considerada (abordagem – LIMA (2015));
A_s	Área da seção transversal das barras de aço tracionadas;
A_{sw}	Área de aço da seção transversal das armaduras de cisalhamento;
A_v	Área de aço da seção transversal de uma camada de armadura de cisalhamento (abordagem – ACI 318:2011);
b_{out}	Comprimento do perímetro crítico afastado das armaduras de cisalhamento externas (abordagem – ACI 318:2011);
b_w	Largura da faixa de laje;
b_0	Comprimento do perímetro crítico afastado $d/2$ da face do pilar (abordagem – ACI 318:2011);
c	Lado do pilar quadrado; ou diâmetro do pilar circular;
c_{arq}	Comprimento de arco gerado pela interseção do perímetro crítico com as esferas <i>BubbleDeck</i> (abordagem – LIMA (2015));
C	Primeira superfície crítica na face do pilar (abordagem – NBR 6118:2014);
C'	Segunda superfície crítica afastada $2d$ do pilar (abordagem – NBR 6118:2014);
C''	Terceira superfície crítica afastada $2d$ das armaduras de cisalhamento externas (abordagem – NBR 6118:2014);
$C_{Rd,c}$	Coefficiente de correção da tensão de cisalhamento resistente de projeto do concreto da laje (abordagem – EUROCODE 2:2004);

d	Altura útil da laje;
d_e	Diâmetro das esferas <i>Bubbledeck</i> (abordagem – LIMA (2015));
d_k	Comprimento da corda gerada pela interseção do perímetro crítico com as esferas <i>Bubbledeck</i> (abordagem – HELD (2002));
d_x	Altura útil da laje na direção x;
d_y	Altura útil da laje na direção y;
$D_{máx}$	Diâmetro máximo do agregado graúdo;
E_c	Módulo estático de elasticidade à compressão do concreto;
E_s	Módulo de elasticidade do aço;
$E_{s,w}$	Módulo de elasticidade do aço da armadura de cisalhamento;
$E_{s,flex}$	Módulo de elasticidade do aço das armaduras de flexão;
$E_{s,tela}$	Módulo de elasticidade do aço da tela superior;
f_c	Resistência à compressão do concreto;
f'_c	Resistência à compressão do concreto (abordagem – ACI 318:2011)
f_{cd}	Tensão de resistência de projeto do concreto à compressão;
f_{ck}	Tensão de resistência característica do concreto à compressão;
f_{ct}	Resistência à tração do concreto;
$f_{c,t}$	Resistência à tração do concreto (abordagem – HELD (2002));
$f_{c,150}$	Resistência à compressão para o corpo de prova cúbico (abordagem – HELD (2002));
f_{ys}	Tensão de escoamento do aço;
$f_{ys,flex}$	Tensão de escoamento do aço das armaduras de flexão;
$f_{ys,tela}$	Tensão de escoamento do aço da tela superior;
$f_{ys,w}$	Tensão de escoamento do aço das armaduras de cisalhamento;
f_{yt}	Tensão de escoamento do aço das armaduras de cisalhamento (abordagem – ACI 318:2011);
f_{ywd}	Tensão de escoamento de projeto das armaduras de cisalhamento;
f_{ywk}	Tensão de escoamento característica das armaduras de cisalhamento;

$f_{ywd,ef}$	Tensão de escoamento de projeto efetiva das armaduras de cisalhamento (abordagem – EUROCODE 2:2004);
$f_{ywk,ef}$	Tensão de escoamento característica efetiva das armaduras de cisalhamento (abordagem – EUROCODE 2:2004);
F_{Sd}	Carga solicitante de projeto de reação do pilar;
F_{Sk}	Carga solicitante característica de reação do pilar;
h	Altura total da laje;
h_m	Altura ou a altura útil da laje (abordagem – HELD (2002));
H_{vazio}	Altura do vazio (abordagem – VALIVONIS <i>et al.</i> (2017))
k	<i>Size effect</i> (abordagem – EUROCODE 2:2004);
n	Quantidade total de linhas de armaduras de cisalhamento;
q	Quantidade de camadas de armaduras de cisalhamento;
s	Distância entre as camadas de armaduras de cisalhamento (abordagem – ACI 318:2011);
s_r	Distância entre as camadas de armaduras de cisalhamento;
s_0	Distância da primeira camada de armadura de cisalhamento ao pilar;
u	Perímetro crítico de cisalhamento;
u_{out}	Comprimento do perímetro crítico afastado das armaduras de cisalhamento externas;
$u_{out,ef}$	Comprimento do perímetro crítico efetivo afastado das armaduras de cisalhamento externas;
u_0	Comprimento do perímetro crítico na face do pilar;
u_1	Comprimento do perímetro crítico afastado $2d$ da face do pilar;
u_{eff}	Comprimento efetivo do perímetro crítico do EC2 proposto por VALIVONIS <i>et al.</i> (2017) para lajes com vazios;
V_{ACI}	Carga de resistência à punção calculada pelo ACI 318:2011;
$V_{DIN,Held}$	Carga de resistência à punção calculada pela norma DIN 1045 com adaptações de HELD (2002);
$V_{DIN,Maciça}$	Carga de resistência à punção calculada pela norma DIN 1045 considerando a laje <i>Bubbledeck</i> como maciça;

V_{EC2}	Carga de resistência à punção calculada pelo EUOCODE 2:2004;
$V_{Flexão}$	Cargas de resistência à flexão da laje;
V_{NBR}	Carga de resistência à punção calculada pela NBR 6118:2014;
V_R	Capacidade de carga da ligação laje-pilar;
V_{Rc}	Contribuição do concreto para a capacidade de carga da ligação laje-pilar;
$V_{R,cs}$	Capacidade de carga da ligação laje-pilar;
$V_{Rd,c}$	Carga resistente de projeto da laje à tração diagonal do concreto;
$V_{Rd,cs}$	Carga resistente de projeto da laje à tração diagonal na presença de armaduras de cisalhamento;
$V_{Rd,máx}$	Carga resistente de projeto da laje à compressão diagonal do concreto;
$V_{Rd,out}$	Carga resistente de projeto da laje à tração diagonal do concreto fora da região das armaduras de cisalhamento;
$V_{Rk,c}$	Carga resistente característica da laje à tração diagonal do concreto;
$V_{Rk,cs}$	Carga resistente característica da laje à tração diagonal na presença de armaduras de cisalhamento;
$V_{Rk,máx}$	Carga resistente característica da laje à compressão diagonal do concreto;
$V_{Rk,out}$	Carga resistente característica da laje à tração diagonal do concreto fora da região das armaduras de cisalhamento;
V_{Rs}	Contribuição do aço para a capacidade de carga da ligação laje-pilar;
V_u	Carga última de ruptura experimental da laje;
x	Altura da linha neutra em relação à fibra mais comprimida;
α	Ângulo de inclinação ente o eixo da armadura de punção e o plano da laje;
α_s	É uma constante usada para computar a carga resistente em lajes ou sapatas(abordagem – ACI 318:2011);
β	Razão entre a maior e a menor dimensão do pilar (abordagem – ACI 318:2011);
ϕ	Coefficiente de segurança (abordagem – ACI 318:2011);
\emptyset	Indicação do diâmetro da armadura;

\emptyset_w	Indicação do diâmetro da armadura de punção;
γ_c	Coefficiente de minoração da resistência do concreto;
ε_{ys}	Deformação de escoamento do aço;
λ	Fator de modificação para levar em conta a redução das propriedades mecânicas dos concretos de baixa densidade (abordagem – ACI 318:2011);
ν	Fator de redução da força do concreto fissurado no cisalhamento (abordagem – EUROCODE 2:2004);
$V_{Rd,c}$	Tensão de cisalhamento resistente de projeto da diagonal tracionada de concreto (abordagem – EUROCODE 2:2004);
$V_{Rd,cs}$	Tensão de cisalhamento resistente de projeto da diagonal tracionada na presença de armaduras de cisalhamento (abordagem – EUROCODE 2:2004);
$V_{Rd,máx}$	Tensão de cisalhamento resistente de projeto da diagonal comprimida de concreto (abordagem – EUROCODE 2:2004);
$V_{Rd,cs}$	Tensão de cisalhamento resistente de projeto da diagonal tracionada na presença de armaduras de cisalhamento (abordagem – EUROCODE 2:2004);
θ	Inclinação da superfície teórica de ruptura por punção (abordagem – EUROCODE 2:2004); Ângulação dos pontos de carregamento da laje (abordagem – GUANDALINI <i>et al</i> (2009));
ρ	Taxa de armadura de flexão tracionada 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;
τ	Tensão de cisalhamento resistente;
τ_{Rd}	Tensão de cisalhamento resistente de projeto;
τ_{Rk}	Tensão de cisalhamento resistente característica;
τ_{Rd1}	Tensão de cisalhamento resistente de projeto da diagonal tracionada de concreto;
τ_{Rd2}	Tensão de cisalhamento resistente de projeto da diagonal comprimida de concreto;
τ_{Rd3}	Tensão de cisalhamento resistente de projeto da diagonal tracionada na presença de

armaduras de cisalhamento;

τ_{Rk1} Tensão de cisalhamento resistente característica da diagonal tracionada de concreto;

τ_{Rk2} Tensão de cisalhamento resistente característica da diagonal comprimida de concreto;

τ_{Rk3} Tensão de cisalhamento resistente característica da diagonal tracionada na presença de armaduras de cisalhamento;

τ_{Sd} Tensão de cisalhamento solicitante de projeto;

τ_{Sk} Tensão de cisalhamento solicitante característica;

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A situação econômica de cada país determina frequentemente o aumento ou redução do custo da mão de obra na indústria da construção civil. Em situações onde há o aumento do custo da mão de obra busca-se priorizar métodos construtivos que sejam mais rápidos de executar, a fim de diminuir o custo final da edificação. Além dessa preocupação das empresas construtoras, existe também a preocupação com a sustentabilidade e o meio ambiente devido às certificações que a edificação pode receber, valorizando-a no mercado.

Dessa forma, com o avanço da tecnologia dentro da indústria da construção civil, novos métodos construtivos vão surgindo de forma a suprir esses requisitos. Um sistema construtivo relativamente recente, desenvolvido na Dinamarca, é o sistema de lajes lisas tipo *Bubbledeck*, que é um sistema baseado no conceito de lajes com vazios e que associa a redução no consumo de materiais com agilidade e redução no tempo de execução da estrutura da edificação, devido à boa parte de sua execução ser altamente industrializada.

O sistema construtivo de lajes tipo *Bubbledeck* consiste em inserir esferas plásticas ocas igualmente espaçadas e instaladas entre duas telas de aço no interior de uma laje, conforme mostra a Figura 1. As esferas introduzidas na intersecção das armaduras substituem o concreto que não desempenharia função estrutural significativa. Assim, pode-se reduzir em até 35% o peso próprio da laje, quando comparado a uma laje maciça convencional de mesma altura, proporcionando um alívio no carregamento sobre as fundações.



Figura 1 - Sistema construtivo de laje lisa tipo *Bubbledeck*.
[<http://aligadaengenharia.blogspot.com.br>]

A laje tipo *Bubbledeck* se apresenta em três tipos de módulos estruturais, sendo estes, módulo com pré-laje, módulo reforçado e painéis acabados, conforme apresentado na Figura 2, porém, segundo Lai (2010), uma vez que as peças são conectadas no local, não há diferença de capacidade resistente entre elas.

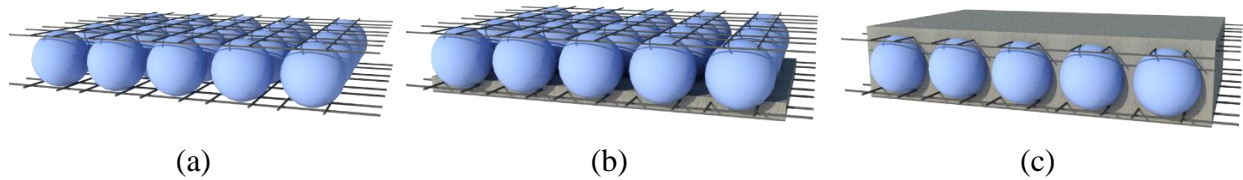


Figura 2 – Métodos construtivos da *Bubbledeck*. (a) Módulo reforçado
(b) Módulo com pré-laje (c) Painel acabado.

O módulo reforçado consiste em adicionar as esferas em gaiolas metálicas para posteriormente posicioná-las nas formas onde serão colocadas as armações adicionais. A concretagem para esse método construtivo é realizada em dois estágios, sendo o primeiro de uma camada de aproximadamente 6 cm para fixação das esferas, pois as esferas tendem a flutuar durante a concretagem devido à sua densidade. Os painéis acabados são lajes armadas e concretadas por completo em fábricas, sendo entregues na obra já prontas. Já o sistema de pré-lajes consiste em produzir painéis pré-moldados com pré-laje já incorporando armações com as esferas plásticas. Esta pré-laje dispensa o uso de formas inferiores, sendo colocada diretamente sobre vigas metálicas e escoras. Após a montagem dos painéis, são adicionadas as armaduras de reforços e barras de ligação entre as placas, sendo então concluída a concretagem.

Testes feitos em laboratório com o sistema *Bubbledeck* mostraram que lajes com vazios não apresentam boa resistência a esforços de cisalhamento nas regiões com cargas concentradas ou na região junto aos pilares. Isso é explicado justamente pela presença desses vazios, visto que o concreto nessas regiões ajudaria a combater os esforços cortantes. Diante desses fatos, nas regiões próximas aos pilares não é empregado o uso de vazios, considerando-se, então, uma região maciça como no sistema convencional de lajes lisas, aplicando-se também, em muitos casos, o uso de armaduras de cisalhamento.

Dentre as vantagens de se utilizar esse método construtivo, pode-se citar:

- Apresenta “Selo Verde” com prêmios internacionais, não só por reduzir as quantidades de materiais empregados em uma mesma área, consequentemente reduzindo a emissão de CO₂ na atmosfera, mas também por utilizar plástico reciclável em substituição ao concreto;
- Processo de execução das formas mais simples tanto na montagem quanto na desmontagem, e no caso do uso de módulo com pré-laje, tem-se a dispensa do emprego de formas inferiores;
- Maior facilidade no lançamento, adensamento e desforma do concreto;
- Ganho de pé-direito devido à ausência de vigas e a possibilidade de as instalações serem embutidas nas lajes;
- Possibilidade de diminuição do tempo de execução da etapa de construção da estrutura;
- Possibilidade de aumento as dimensões dos vãos na concepção estrutural;
- Possibilidade de redução de mão-de-obra envolvida no processo construtivo;

Dentre as desvantagens desse sistema construtivo, pode-se citar:

- Necessidade de um controle mais rigoroso dos deslocamentos verticais das lajes;
- A redução na rigidez do edifício quanto aos esforços horizontais;
- Possibilidade de uma ruptura localizada por punção na ligação laje-pilar;
- No caso de emprego de armadura de cisalhamento, há a necessidade de uma fiscalização e controle rigoroso na instalação desta;

A ruptura por punção, citada entre as desvantagens do sistema, é um tipo de ruptura frágil que ocorre por cisalhamento sem grandes avisos na estrutura e, por isso, é um tipo de ruptura indesejada. Uma das características da ruptura por punção é que sua superfície de ruptura frequentemente tem a aparência de um tronco de cone nas proximidades do pilar, conforme mostra a Figura 3.

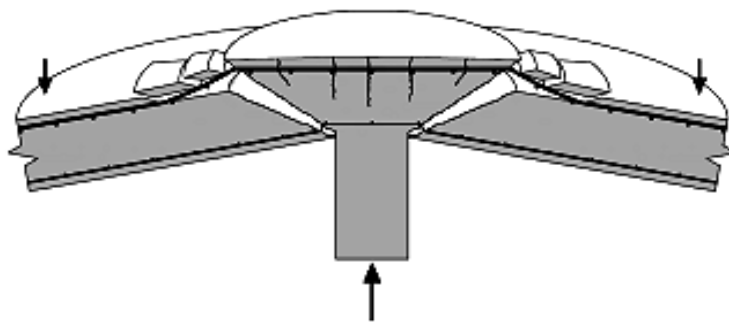


Figura 3 – Ruptura por punção. [GUANDALINI, 2006].

Nesse tipo de ruptura, a laje pode se desprender totalmente do pilar, podendo levar ao colapso progressivo e assim, a ruína total ou parcial da estrutura. De acordo com Melo (1990), o primeiro caso identificado de ruptura por punção foi o do Edifício *Prest-o-Lite* em Indianápolis no ano de 1911. Outros casos na história de ruptura por punção foram do edifício *Pipers Row Car Park* em *Wolverhampton* na Inglaterra no ano de 1997 (WOOD, 1997) e do edifício de garagem *Tropicana Cassino* em *Atlantic City* (EUA) no ano de 2003, conforme mostram as Figuras Figura 4 e Figura 5, respectivamente. Um caso mais recente desse tipo de colapso é o da laje de fundo de uma piscina na Rússia em 2013, como mostra a Figura 6.



Figura 4 – Colapso parcial do edifício *Pipers Row Car Park*. [WOOD, 1997]



Figura 5 – Colapso do edifício de garagem *Tropicana Casino*.
[<https://failures.wikispaces.com>]



Figura 6 – Ruptura por punção de uma piscina na Rússia.
[<https://www.engenhariacivil.com/>]

1.2. MOTIVAÇÃO

A utilização do método construtivo de lajes do tipo *Bubbledeck* vem crescendo no Brasil e no mundo. Esse sistema já foi utilizado aqui no Brasil em obras como a ampliação do estacionamento do aeroporto internacional Tom Jobim no Rio de Janeiro, o novo Centro Administrativo do Distrito Federal (CADF) e também na ampliação da sede da Construtora Odebrecht em Salvador.

Alguns estudos acerca da tecnologia *Bubbledeck* já foram realizados na Alemanha, Dinamarca e Brasil, porém devido à escassez de comprovações experimentais e prescrições normativas, ainda existem dúvidas quanto ao seu dimensionamento e comportamento. Dessa forma, este trabalho tem como principal motivação estudar e apresentar ao meio técnico científico as características e alguns resultados experimentais da tecnologia construtiva *Bubbledeck* para que ela seja aplicada de forma segura e adequada nas edificações.

1.3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo avaliar os resultados experimentais de alguns trabalhos de mestrado e doutorado realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília (LABEST-UnB), mostrando o comportamento à punção de lajes lisas do tipo *Bubbledeck* utilizando armadura de cisalhamento. Para isso serão utilizados os resultados dos ensaios realizados pelo aluno de doutorado Wanderley Gustavo Nicácio e do aluno de mestrado Manuel Alejandro Ceballos, que ensaiaram modelos locais em escala real com carregamento simétrico, simulando a ligação laje-pilar interno de uma edificação concebida em lajes lisas.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Avaliar a influência da armadura de cisalhamento no comportamento à punção as lajes lisas do tipo *Bubbledeck*;
- Avaliar a influência do uso de treliças nas nervuras das lajes no comportamento à punção das lajes lisas do tipo *Bubbledeck*;
- Comparar os resultados experimentais obtidos com propostas de adaptações das normas do ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2004) e suas correções AC Eurocode 2 (2010) e BS Eurocode (2014), ABNT NBR 6118 (2014) e *fib Model Code 2010* (2013).

1.4. METODOLOGIA

A metodologia a ser seguida neste trabalho consistirá em utilizar os resultados dos ensaios realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília por Nicácio (2018) e Ceballos (2017), além de trabalhos realizados no exterior, para analisar o comportamento das lajes lisas do tipo *Bubbledeck* com e sem armadura de cisalhamento, seja na região maciça quanto na região das nervuras. Nestes ensaios foram analisados os seguintes parâmetros:

deslocamentos verticais, cargas de ruptura, deformação específica no concreto, no aço e nas armaduras de cisalhamento. As cargas de ruptura serão comparadas com as estimadas segundo as normas ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2004) e suas correções AC Eurocode 2 (2010) e BS Eurocode (2014), ABNT NBR 6118 (2014) e *fib Model Code 2010* (2013) e as adaptações propostas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CARACTERÍSTICAS DA RUPTURA POR PUNÇÃO

Pode-se descrever o fenômeno da punção como uma ruptura frágil que ocorre por cisalhamento em elementos de placa submetidos a uma carga ou reação concentrada aplicada transversalmente que provoca elevadas tensões de cisalhamento em torno de regiões relativamente pequenas. Portanto, esse tipo de ruptura é mais comum na ligação laje-pilar em sistemas de lajes lisas, pois devido à ausência de vigas as lajes se apoiam diretamente sobre os pilares.

Nesse tipo de sistema estrutural, a fim de evitar a ruptura por punção, costuma-se aumentar um pouco a espessura da laje em regiões próximas aos pilares através de ábacos ou capitéis, como mostra a Figura 7.

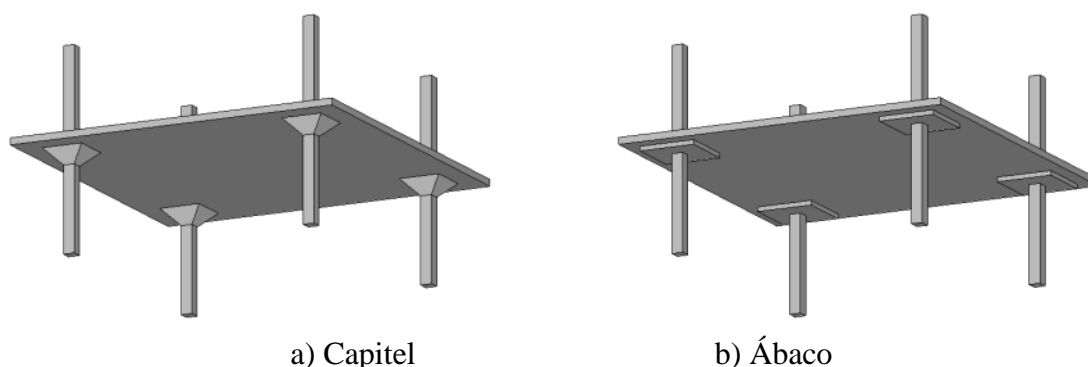


Figura 7 – Lajes lisas. [adaptado – FERREIRA (2010)]

Para normas como Eurocode 2 (2004) e suas correções AC Eurocode 2 (2010) e BS Eurocode (2014) e ABNT NBR 6118 (2014), a inclinação das fissuras para lajes sem armadura de cisalhamento é $26,6^\circ$, conforme mostra a Figura 8.

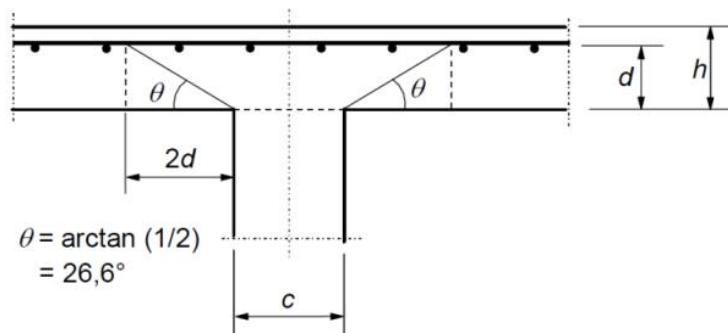


Figura 8 – Inclinação das fissuras de cisalhamento. [modificado – EUROCODE 2:2004]

Para lajes com armadura de cisalhamento a ruptura por punção, como mostra a Figura 9, pode ocorrer de três formas: esmagamento da biela de concreto próxima ao pilar, por esgotamento da capacidade resistente à tração diagonal do concreto e do aço dentro da região das armaduras ou, por fim, por esgotamento da resistência à tração diagonal do concreto fora da região das armaduras de cisalhamento.

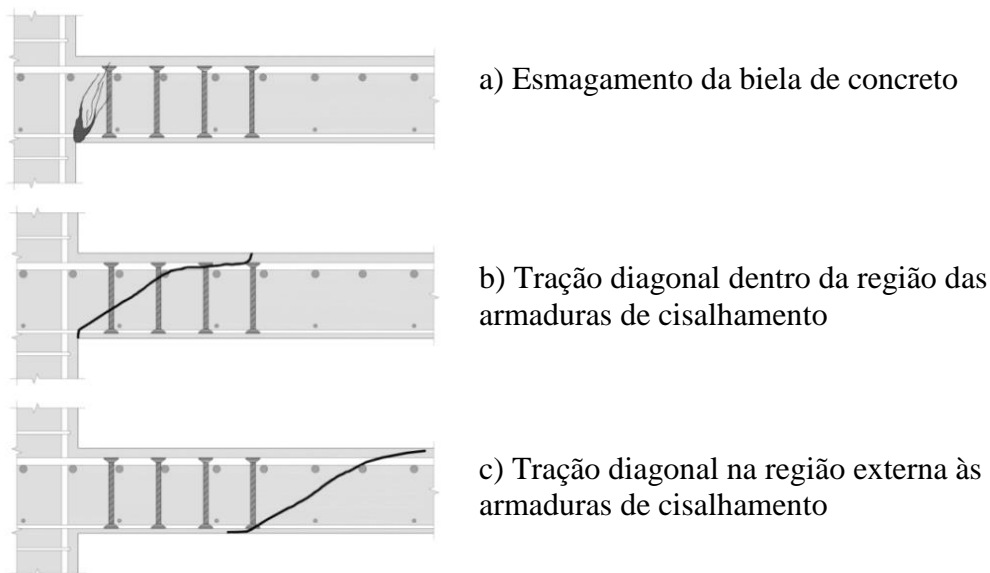


Figura 9 – Modos de ruptura por punção em lajes lisas com armadura de cisalhamento.

[FERREIRA (2010)]

2.2. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA À PUNÇÃO

Ao longo dos anos o fenômeno da punção tem sido estudado por diversos pesquisadores e através do resultado de inúmeros ensaios realizados, pode-se afirmar que a resistência à punção é influenciada principalmente pela taxa de armadura de flexão tracionada, resistência à compressão do concreto, geometria e forma do pilar e o pelo *size effect*.

2.2.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

De uma forma geral, a resistência ao cisalhamento de uma estrutura de concreto é diretamente relacionada com a resistência à tração do concreto. Porém, como em situações de projeto se é especificado a resistência à compressão do concreto e existem formulações teóricas para relacionar essas duas resistências, é comum na maioria das pesquisas adotar a resistência ao cisalhamento de uma peça de concreto armado como função da resistência à compressão do concreto.

Dessa forma, Graf (1933) *apud* Ferreira (2010) concluiu que a relação entre a capacidade resistente da ligação laje-pilar e a resistência à compressão do concreto não era linear. Moe (1961) *apud* Ferreira (2010) concluiu que essa relação poderia ser expressa como uma função proporcional à raiz quadrada da resistência à compressão do concreto, conceito esse que ainda hoje é utilizado nas formulações do ACI 318 (2014). Porém, em pesquisas mais recentes, Marzouk e Hussein (1991) *apud* Ferreira (2010) analisaram lajes com concreto de alta resistência e concluíram que a raiz cúbica da resistência à compressão do concreto descreve melhor a influência à resistência à punção, como mostra a Figura 10.

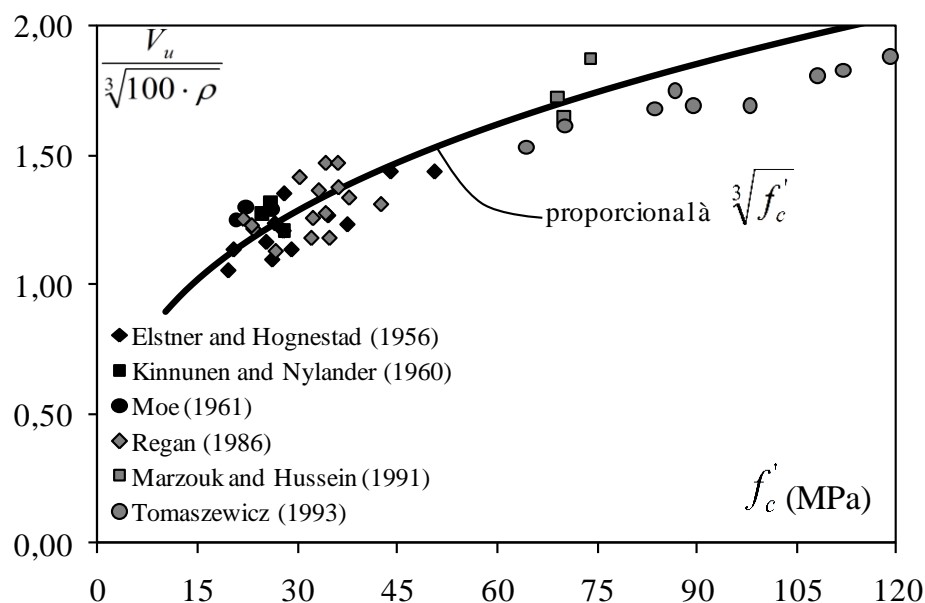


Figura 10 – Relação entre capacidade resistente à punção e a resistência à compressão do concreto. [FERREIRA (2010)]

2.2.2. TAXA DE ARMADURA DE FLEXÃO TRACIONADA

A taxa de armadura de flexão é dada pela razão entre a área de armadura de flexão tracionada e a área de concreto de determinada seção transversal, a qual é dada pelo produto da altura útil da laje pela largura de uma faixa de laje considerada. Regan (1986) *apud* Ferreira (2010) concluiu, através de resultados experimentais, que essa faixa de laje deve ser considerada como a largura do pilar acrescida de três vezes a altura útil da laje para cada um dos lados, pois é a região onde as barras de flexão contribuem para a resistência à punção, este conceito é adotado nas formulações de normas como o Eurocode 2 e ABNT NBR 6118 (2014).

Segundo Regan (1986), o aumento da taxa de armadura de flexão tracionada irá aumentar a zona comprimida e, dessa forma, a área de concreto não fissurado para resistir ao cisalhamento será maior. Além disso, o aumento da taxa de armadura ajuda a impedir a abertura das fissuras, aumentando o engrenamento entre os agregados, e também aumenta a contribuição do efeito pino, levando, dessa forma, a um aumento da resistência à punção.

Pesquisadores como Regan (1986), Bræstrup (1985), e Sherif e Dilger (2000) sugerem que a resistência à punção é proporcional à taxa de armadura de flexão elevada a 0,33, enquanto Long (1975) defende que essa relação é proporcional à taxa de armadura de flexão elevada 0,25.

2.2.3. DIMENSÕES E GEOMETRIA DO PILAR

O tamanho e a geometria do pilar vão influenciar na resistência à punção, pois vão alterar a distribuição de tensão na ligação laje-pilar. Quanto maior for a área do pilar, maior será a região carregada, e assim, menores serão as tensões e dessa forma maior será a capacidade resistente da ligação.

Quanto à geometria do pilar, Vanderbilt (1972) *apud* Ferreira (2010) ensaiou lajes apoiadas em pilares circulares e quadrados e observou que as lajes com pilar quadrado apresentaram resistência menor que as demais lajes. O autor concluiu que a concentração de tensões nos cantos dos pilares quadrados poderia ser o motivo disso.

Pilares retangulares são comumente usados para reduzir o tamanho do vão efetivo e também para promover rigidez lateral para a estrutura. Sagaseta *et al.* (2014) apontam que a punção em lajes com esse tipo de pilar, em comparação com pilares circulares e quadrados, terá duas

preocupações principais, tais como a distribuição não uniforme das forças de cisalhamento ao longo do perímetro de controle ao redor do pilar e a influência das condições de carregamento e momento fletor na abertura da largura da fissura crítica de cisalhamento, levando à ruptura por punção.

Dessa forma, *Sagaseta et al.* (2014) concluíram que a redução na resistência à punção devido à concentração do cortante nos cantos de pilares quadrados e retangulares com a relação c/d maior que 3 depende das deformações de flexão da laje e da geometria do pilar, porém as normas consideram somente a geometria do pilar. Este problema pode ser resolvido para qualquer caso de carregamento, condições de contorno e geometria de pilar usando um perímetro de controle estimado através de uma análise dos *shear fields* (numa tradução livre campos de cisalhamento), obtidos através de uma análise de elementos finitos elástica, ou um método proposto baseado nas pressões de contato nas áreas de suporte.

2.2.4. SIZE EFFECT

Outra maneira de se aumentar a resistência da laje à punção é aumentando a espessura da laje, pois, dessa forma, maior será a parcela de concreto para resistir aos esforços cortantes. Porém esse aumento na resistência não é linear e, por isso, deve-se levar em consideração o efeito do *size effect*, que, numa tradução livre, seria efeito de tamanho.

Regan e Braestrup (1985) *apud* Ferreira (2010) propõem que essa redução do incremento da resistência à punção com o aumento da espessura da laje pode ser estimada por $(1/d)^{1/3}$. Já normas como o Eurocode 2 e ABNT NBR 6118 (2014) recomendam que o *size effect* seja estimado por $1+(200/d)^{1/2}$, onde d é a altura útil expressa em milímetros. Porém, a norma Eurocode 2 irá limitar a consideração do *size effect* em valores não maiores 2,0, de forma a reduzir o incremento da estimativa da resistência à punção de lajes lisas com espessuras menores que 200 mm.

2.2.5. ARMADURAS DE CISALHAMENTO

Muitas vezes aumentar a altura da laje e as dimensões dos pilares para aumentar à resistência à punção na ligação laje-pilar não é possível por questões arquitetônicas ou pelo aumento do custo significativo da edificação. Outras soluções possíveis para aumentar a capacidade resistente dessa ligação seria aumentar a taxa de armadura de flexão ou a resistência à

compressão do concreto, porém o aumento da capacidade resistente com o incremento desses dois parâmetros é pouco efetivo e, assim, muitas vezes não são suficientes. Portanto, a melhor solução para aumentar a resistência à punção da laje é usando armadura de cisalhamento.

Para garantir a eficiência da armadura de cisalhamento é necessário que ela esteja bem ancorada, para que, dessa forma, possa atingir a tensão de escoamento. Isso não é algo tão fácil de alcançar devido à pequena espessura das lajes e assim, um pequeno comprimento de ancoragem, o que gera também um pequeno comprimento para o desenvolvimento das tensões de aderência na superfície das barras da armadura de cisalhamento. Além disso, é muito importante que a armadura de cisalhamento seja de fácil instalação, pois na região da ligação laje-pilar costuma haver uma grande concentração de barras de flexão.

Dessa forma, uma armadura de cisalhamento ideal é aquela que permite uma boa ancoragem, pode ser facilmente instalada nas proximidades dos pilares e ainda apresenta um baixo custo econômico. Os tipos de armadura de cisalhamento mais utilizados atualmente são mostrados na Figura 11.

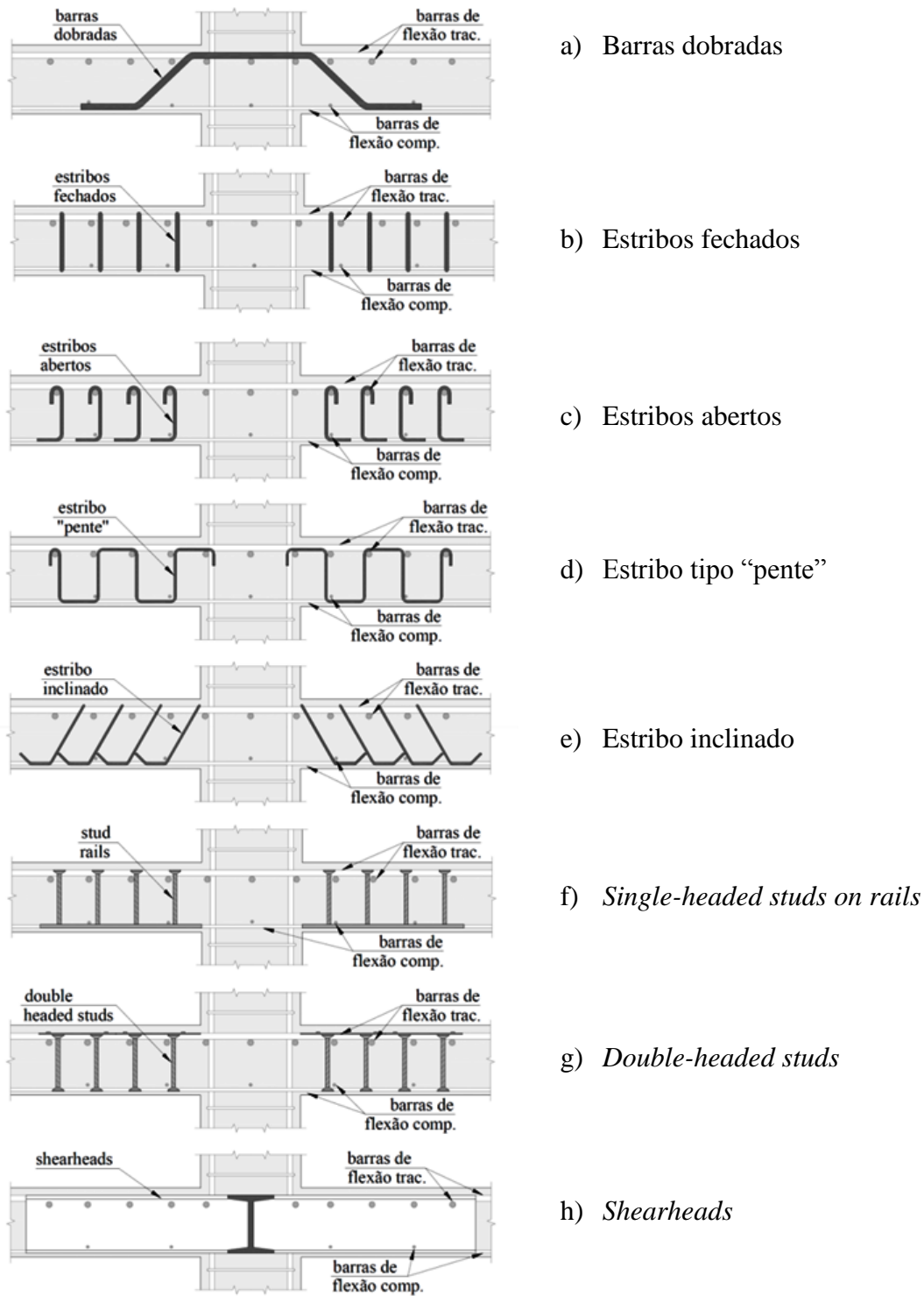


Figura 11 – Tipos de armaduras de cisalhamento para lajes lisas. [FERREIRA (2010)]

Além do tipo de armadura a se utilizar, a distribuição das armaduras de cisalhamento também irá influenciar diretamente na resistência à punção da laje. A distribuição mais eficiente seria aquela que acompanharia a região de formação de fissuras, ou seja, uma distribuição radial,

porém muitas vezes isso não é possível devido à interferência das barras de flexão. Assim, muitas vezes opta-se por uma distribuição em cruz, como mostra a Figura 12.

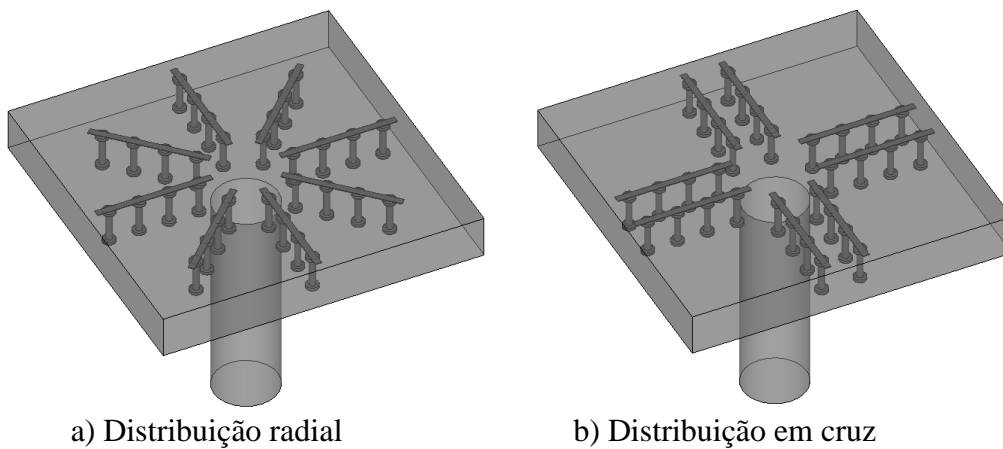


Figura 12 – Formas de distribuição das armaduras de cisalhamento. [SANTOS (2016)]

2.3. PESQUISAS SOBRE LAJES LISAS TIPO *BUBBLEDECK*

2.3.1. HELD (2002)

A autora estudou a influência dos vazios no comportamento à punção de lajes *Bubbledeck* através de um programa experimental e de uma análise não linear pelo Método dos Elementos Finitos no *software* DIANA. O programa experimental foi composto por seis lajes tipo *Bubbledeck*, cujas características são mostradas na Figura 13.

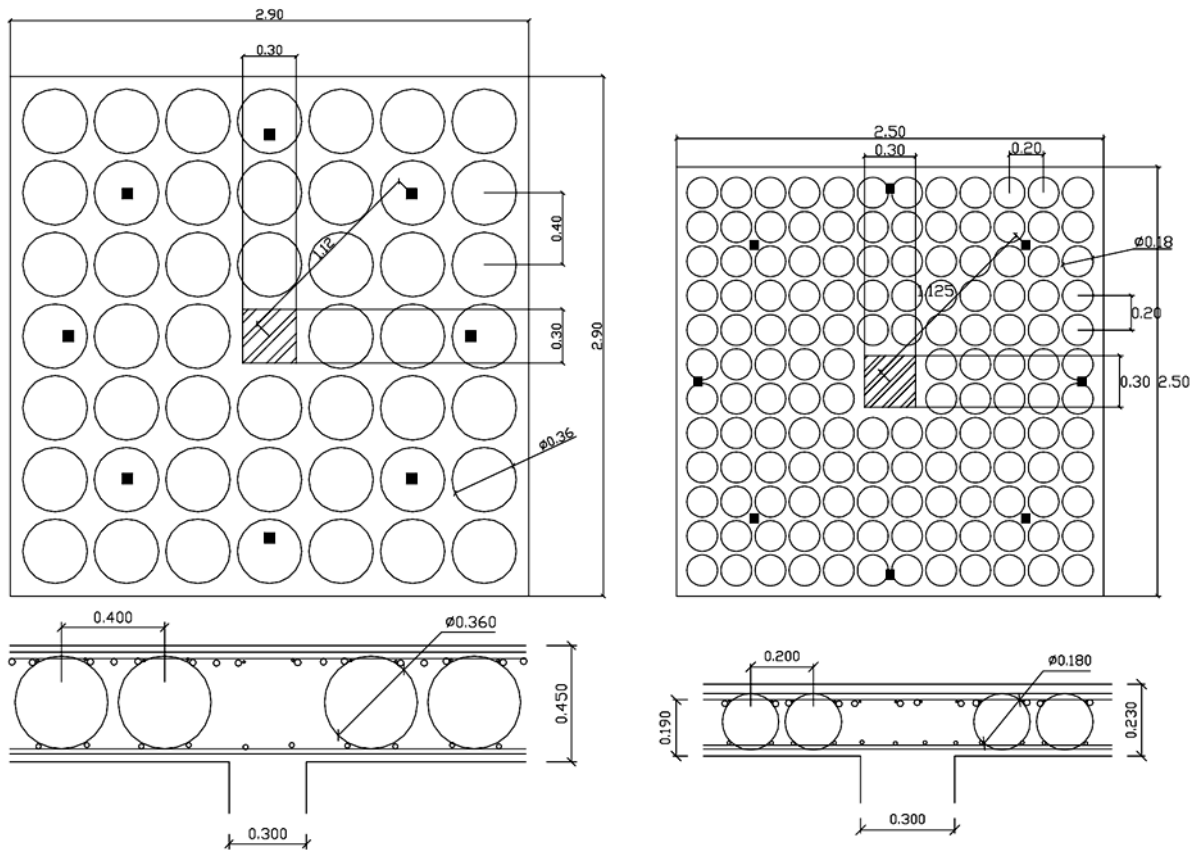


Figura 13 – Vistas superior e corte dos painéis de laje ensaiados por Held (2002).

A autora, através do corte da seção transversal das lajes, verificou que os vazios deixados pelas esferas não influenciaram na formação da superfície de ruptura da laje com vazios, conforme mostra a Figura 14. Foi verificado também que a resistência ao puncionamento dessas lajes foi menor que o valor calculado para lajes maciças de mesma espessura. Dessa forma, a autora definiu que para a determinação da resistência ao cisalhamento das lajes com vazios deve-se desconsiderar o vazio deixado pelas esferas na área considerada nos cálculos da resistência, como mostra a Figura 15 e a Equação 1.

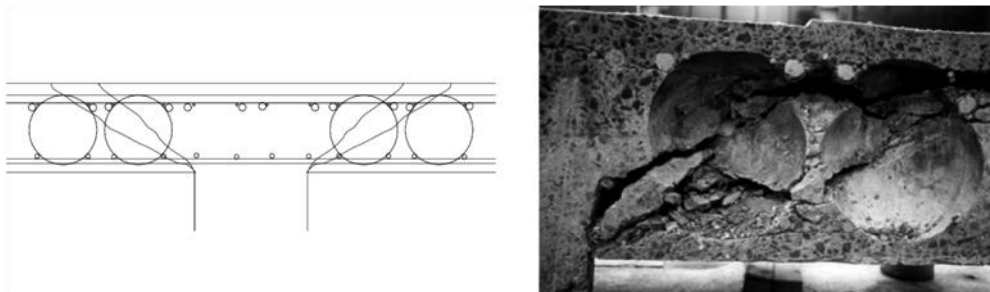


Figura 14 – Superfície de ruptura da laje ensaiada por Held. (2002).

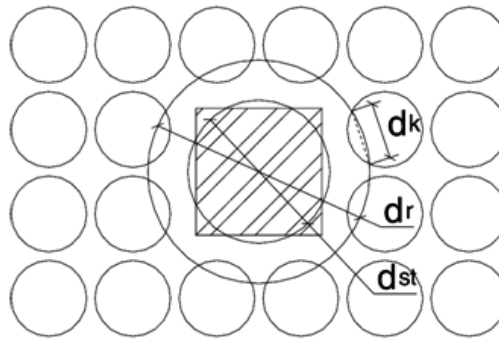


Figura 15 – Comprimentos para redução da área crítica de cisalhamento propostos por Held (2002).

$$A = u \cdot h_m - \sum (d_k^2 \cdot \pi / 4) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

A é a área a ser considerada para a seção crítica;

u é o perímetro crítico tal como definido na normativa adotada;

h_m é a altura ou a altura útil da laje, tal como definido pela normativa adotada;

d_k é o comprimento da corda gerada pela intersecção do perímetro crítico com as esferas, como exemplificado na Figura 15.

Com os resultados das análises, a autora sugeriu adaptações ao método de estimativa de resistência à punção da norma alemã DIN 1045-1 de modo a adequá-la ao sistema *Bubbledeck*. Os resultados da adaptação proposta são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1– Características e resultados das lajes ensaiadas por Held (2002).

Laje	Espessura (cm)	Armadura superior (cm ² /m)	Armadura inferior (cm ² /m)	$f_{c,150}$ (MPa)	$f_{c,t}$ (MPa)	V_u (kN)	$V_{DIN,Held}$ (kN)	$V_{DIN,maciça}$ (kN)
D1-24	24	34,2	11,3	44,4	2,8	520	541	840
D2-24	24	34,2	11,3	50,8	2,5	580	604	945
D3-24	24	34,2	11,3	46,7	2,9	525	572	893
D4-45	45	40,3	15,7	29,6	2,9	935	892	1503
D5-45	45	40,3	15,7	37,9	2,1	990	1053	1701
D6-45	45	40,3	15,7	40,5	3,0	1180	1101	1795

*Pilares quadrados com lado igual a 300 mm
 $V_{DIN,maciça}$: valores calculados pela norma DIN 1045 considerando a laje como maciça
 $V_{DIN,Held}$: valores da adaptação da autora a norma DIN 1045
 $f_{c,150}$ é a resistência à compressão para o corpo de prova cúbico.

2.3.2. NICÁCIO (2018)

NICÁCIO (2018) avaliou experimentalmente o comportamento à punção de lajes lisas com o sistema construtivo *Bubbledeck* com pilares internos e carregamento simétrico. O programa experimental realizado pelo autor foi composto de quatro lajes maciças e sete lajes *Bubbledeck*, todas com dimensões de 2500 x 2500 mm de comprimento, 280 mm de altura, pilares circulares centrados de 300 mm de diâmetro e mesma taxa de armadura de flexão, variando-se a utilização de pré-laje, utilização de armadura de cisalhamento, distribuição das armaduras de cisalhamento e sua respectiva ancoragem. A Tabela 2 apresenta as principais características dos modelos ensaiados, que também são mostrados nas Figuras 16 a 20, bem como os valores de carga última experimental das lajes.

Tabela 2 – Características das lajes ensaiadas por NICÁCIO (2018).

Descrição				Armadura de Cisalhamento					V _u (kN)
Laje	Tipo	d (mm)	ρ (%)*	f _c (MPa)	Ø _w (mm)	Ancoragem	S ₀ (mm)	S _r (mm)	
RSP28	Maciça	237	0,52	48	-	-	-	-	855
BD28-P1	<i>Bubbledeck</i>	248	0,48	48	-	-	-	-	639
BD28-P2	<i>Bubbledeck</i>	252	0,46	48	-	-	-	-	648
BD28-P3	<i>Bubbledeck</i>	252	0,46	48	6,3	Não	100	100	693
BD1	<i>Bubbledeck</i>	241	0,50	45	8,0	Não	163	78	817
BD2	<i>Bubbledeck</i>	255	0,45	45	8,0	Não	163	78	833
SS1	Maciça	232	0,54	45	8,0	Total	100	125	1041
SS2	Maciça	246	0,48	45	8,0	Parcial	100	125	987
BD3	<i>Bubbledeck</i>	242	0,50	47	8,0	Total	100	125	995
BD4	<i>Bubbledeck</i>	253	0,46	47	8,0	Parcial	100	125	846
SS1 3ª série	Maciça	237	0,52	47	8,0	Total	100	125	1048

* Na taxa de armadura está sendo considerada a malha superior.
 Obs: as lajes BD28-P2, BD28-P3, BD2, SS2 e BD4 apresentam pré-laje pré-moldada
 d: Altura útil da laje
 ρ: taxa de armadura de flexão
 Ø_w: Diâmetro do estribo
 A_{sw}/camada: Área de aço correspondente a uma camada de armadura de cisalhamento
 S₀: Distância da face do pilar até a primeira camada de armadura de cisalhamento
 S_r: Distância entre as camadas de cisalhamento
 f_{ysw}: Tensão de escoamento da armadura de cisalhamento
 V_u: Carga última experimental

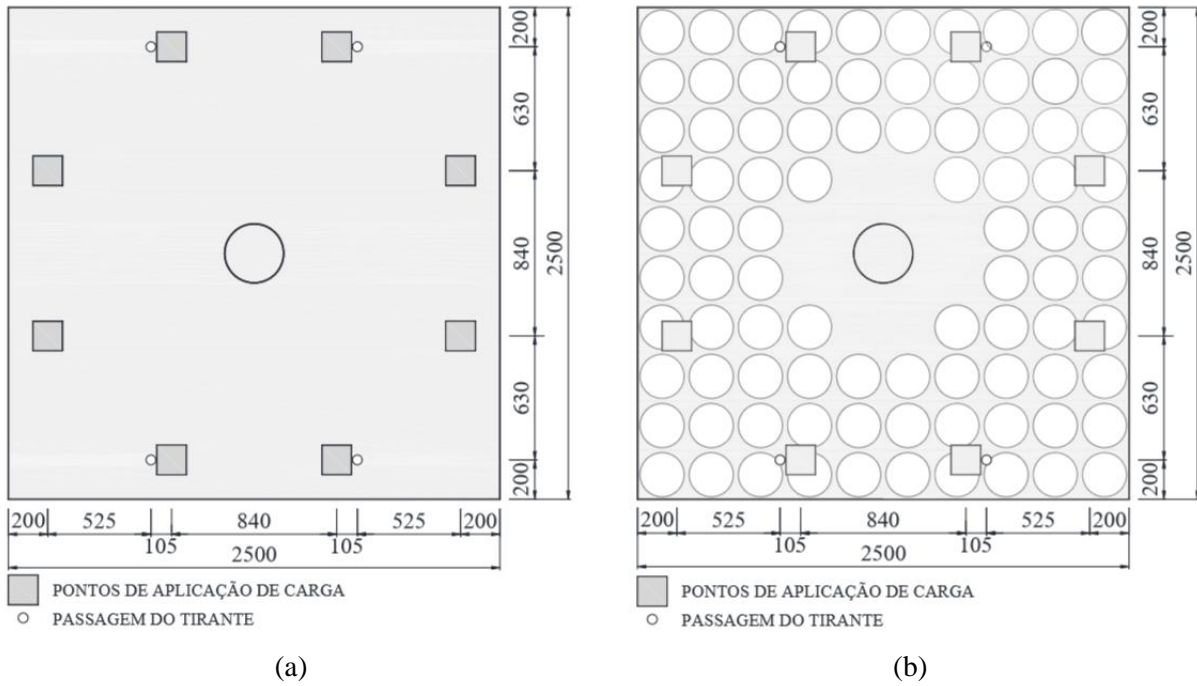


Figura 16 – Lajes ensaiadas por NICÁCIO (2018) - (a) RSP28 (b) BD28-P1.

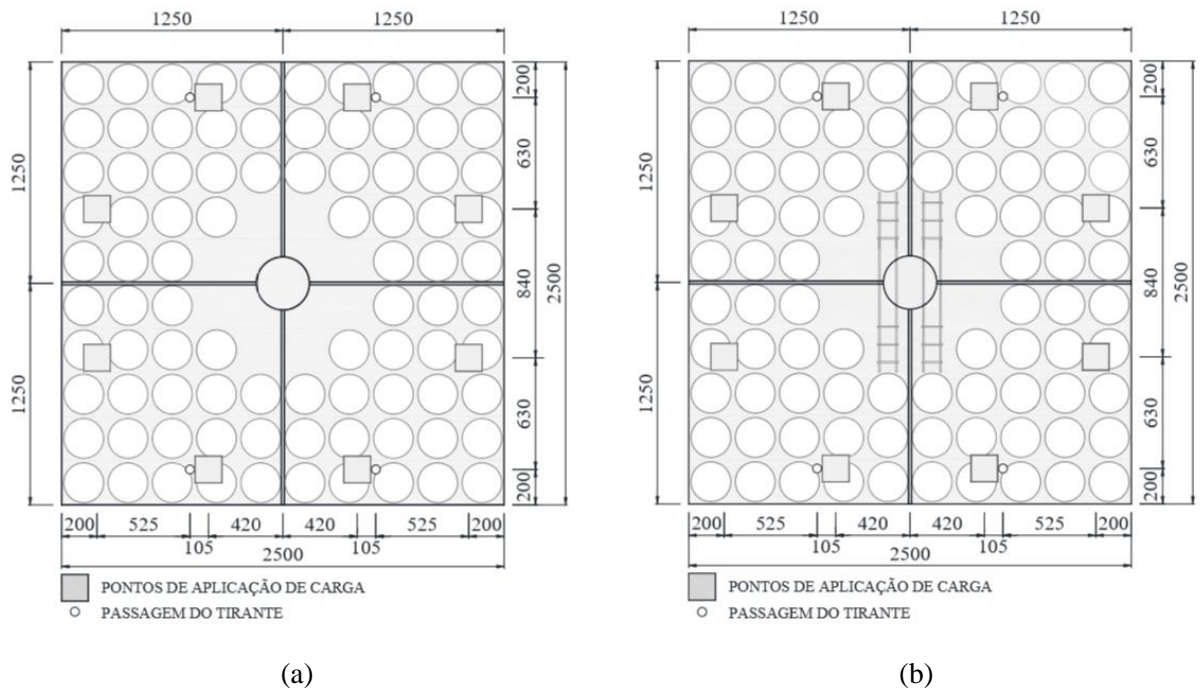


Figura 17 – Lajes ensaiadas por NICÁCIO (2018) - (a) BD28-P2 (b) BD28-P3.

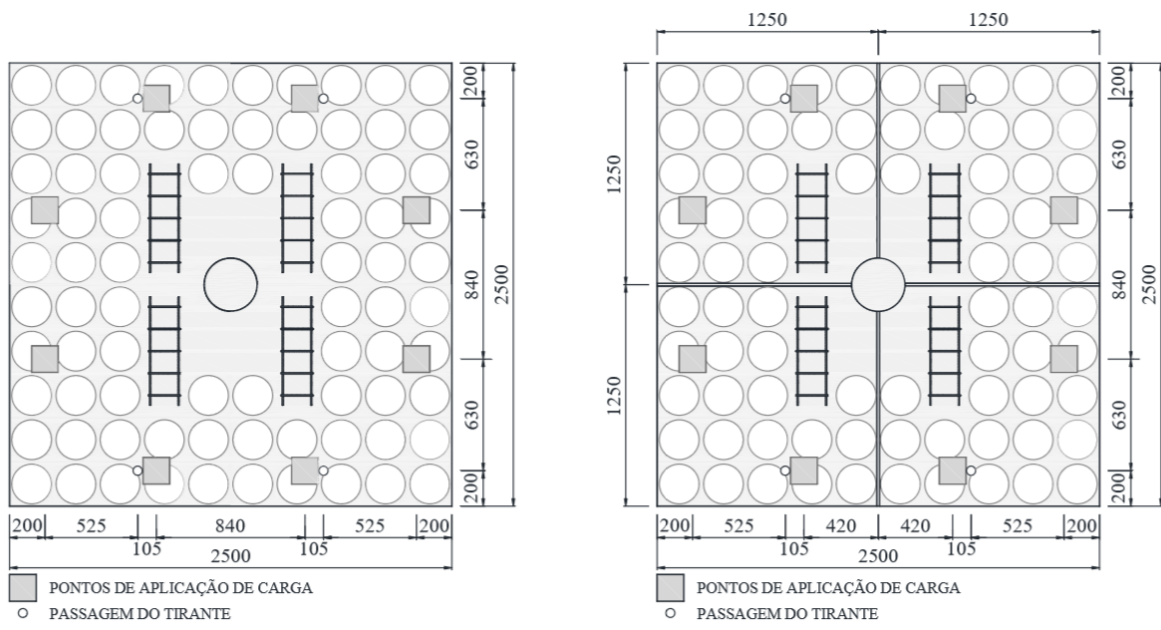


Figura 18 – Lajes ensaiadas por NICÁCIO (2018) - (a) BD1 (b) BD2.

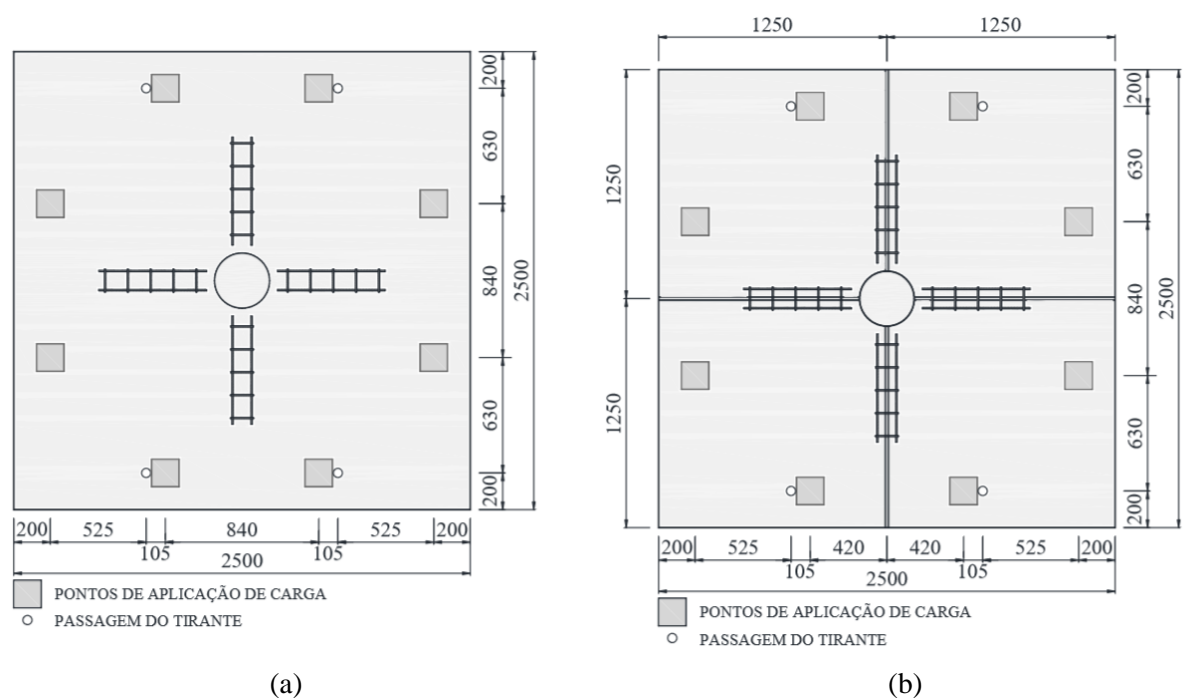
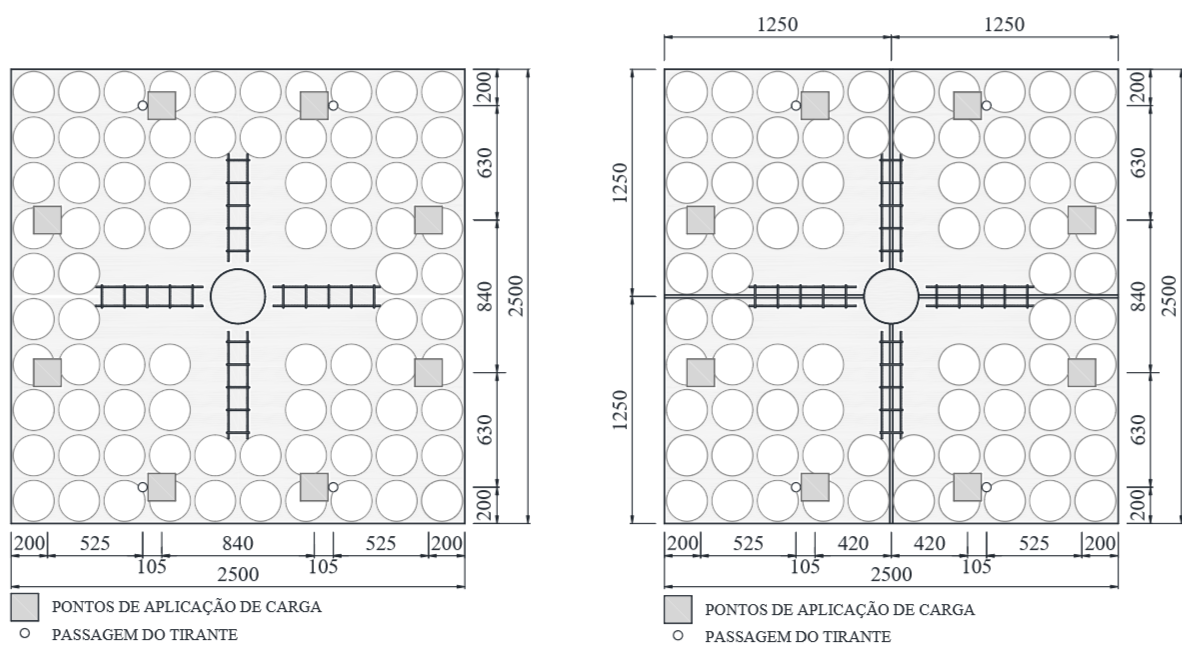
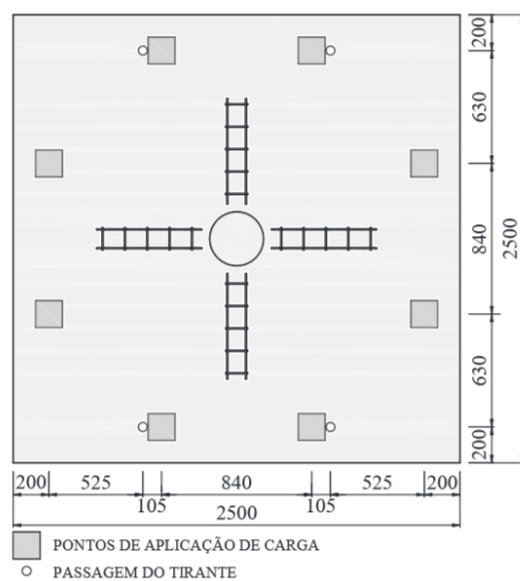


Figura 19 – Lajes ensaiadas por NICÁCIO (2018) - (a) SS1 (b) SS2.



(a)

(b)



(c)

Figura 20 – Lajes ensaiadas por NICÁCIO (2018) - (a) BD3 (b) BD4 (c) SS1 3ª Série.

As lajes que apresentavam a pré-laje (BD28-P2, BD28-P3, BD2, SS2 e BD4) eram compostas por quatro elementos simétricos concretados em uma etapa anterior com altura nominal de 60 mm, conforme mostra a Figura 21.

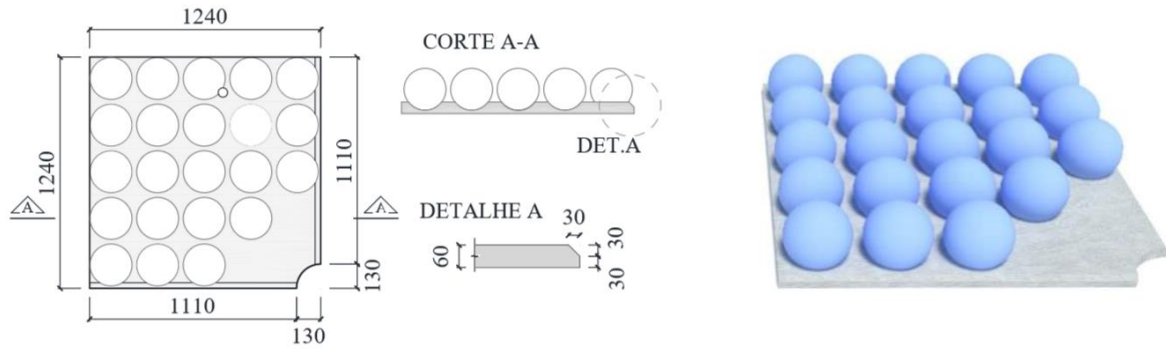


Figura 21- Detalhe das pré-lajes.

A fim de verificar o tipo de ruptura ocorrido nas lajes e a inclinação da superfície de ruptura, foram realizados os cortes da seção transversal de algumas lajes após os ensaios. Devido à dupla simetria das lajes, apenas um quadrante de cada laje foi cortado. A Figura 22 mostra a posição dos cortes das cinco lajes que foram cortadas e as Figuras 23 a 28 mostram as seções de corte dessas lajes.

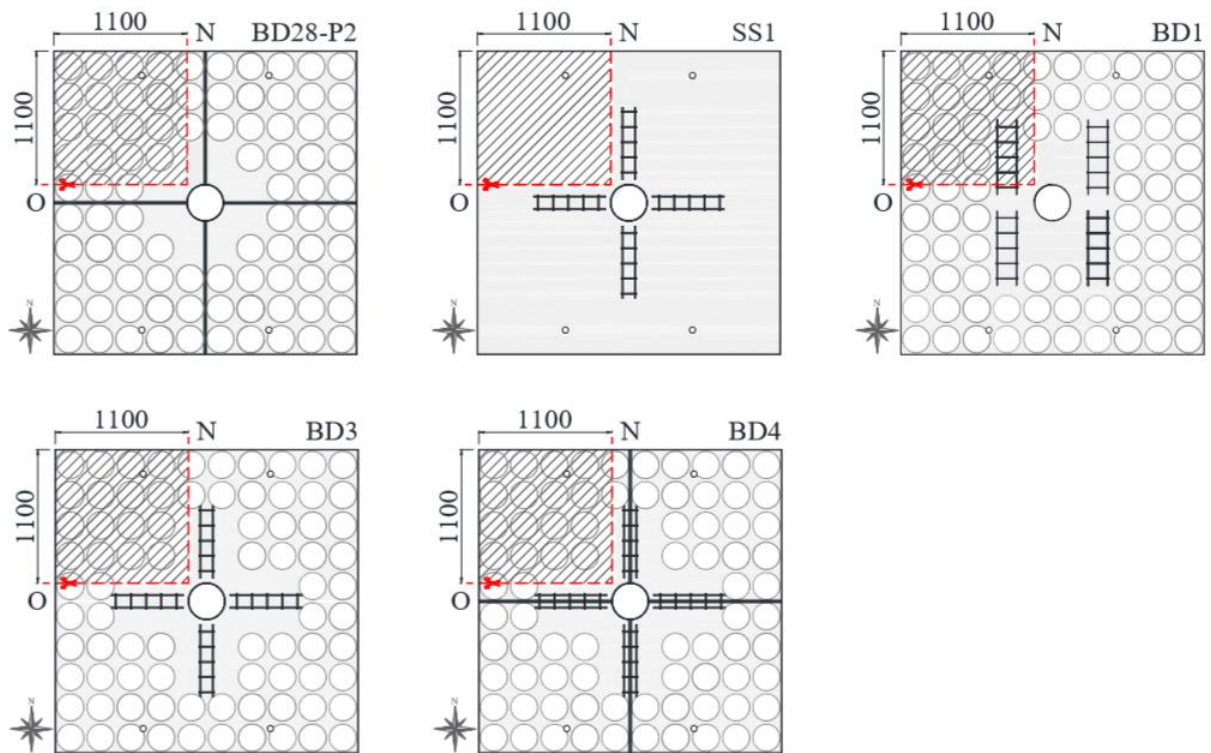


Figura 22 – Posição de corte das lajes BD28-02, SS1, BD1, BD3, BD4.

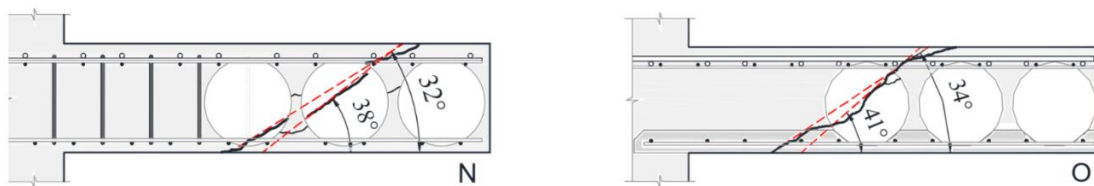


Figura 23 - Seção de corte da laje BD28-P2.

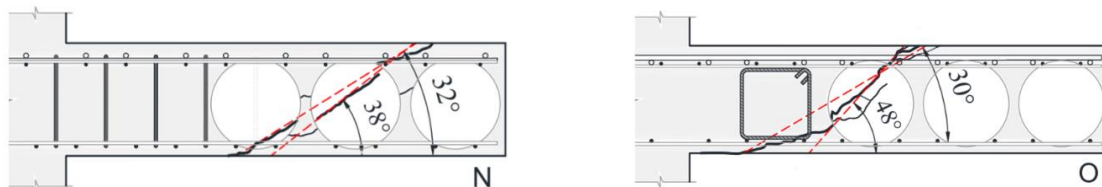


Figura 24 - Seção de corte da laje BD1.

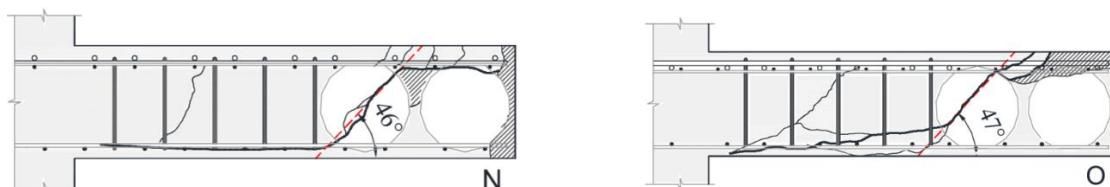


Figura 25 - Seção de corte da laje BD3.

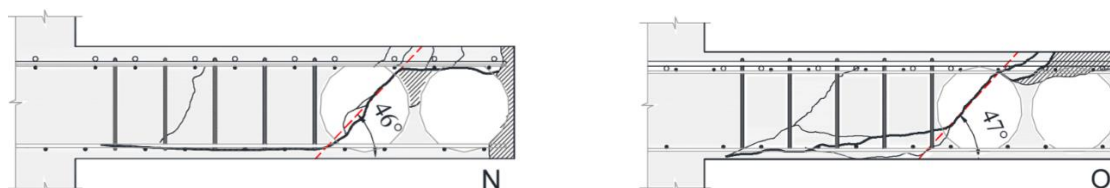


Figura 26 - Seção de corte da laje BD3.

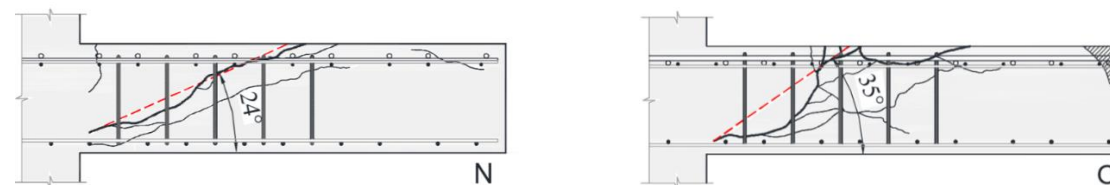


Figura 27 - Seção de corte da laje SS1 3ª série.

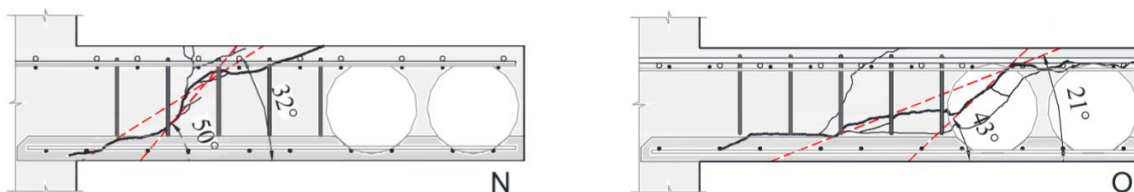


Figura 28 - Seção de corte da laje BD4.

Através deste procedimento, o autor concluiu que para as lajes *Bubbledeck* há uma forte tendência da superfície de ruptura passar pela primeira linha de esferas, com inclinação média de 46,6°, corroborando com o resultado experimental de outros autores.

Para a estimativa da capacidade resistente à punção da ligação laje-pilar, devido aos modelos de cálculos da resistência à punção das normas vigentes não considerarem a presença de vazios nas lajes, o autor propõe uma adaptação para o cálculo e verificação da resistência à punção de lajes do tipo *Bubbledeck* para as normas da ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2004) e a recomendação do *fib* Model Code 2010 (2013). Como os vazios deixados pelas esferas plásticas provocam uma perda de resistência ao cisalhamento da laje, o autor propôs que fosse descontada da área do perímetro crítico (produto “ $u \cdot d$ ”) a área de vazios deixados pela esferas, como mostra a Figura 29. A área efetiva delimitada pelo perímetro crítico a ser utilizada nos modelos de cálculo é dada pela a Equação 2.

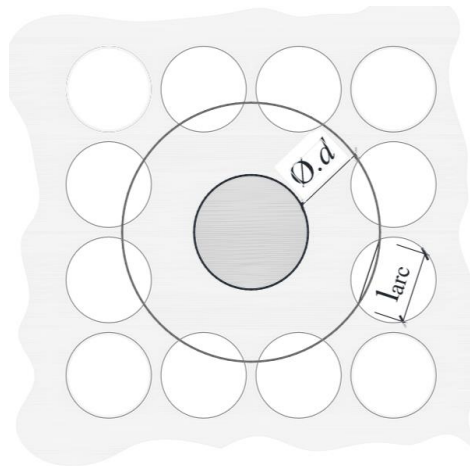


Figura 29 – Detalhe das áreas a serem desconsideradas na proposta de Nicácio (2018).

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

Onde:

$A_{c,ef}$ é a área de concreto efetiva a ser considerada;

u é o perímetro crítico tal como definido na normativa adotada;

d é a altura útil da laje, tal como definido pela normativa adotada;

l_{arc} é o comprimento de arco gerado pela interseção do perímetro crítico com as esferas, como exemplificado na Figura 29.

O autor concluiu que para lajes sem armadura de cisalhamento a previsão do 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 dessa forma, o fator de redução não é aplicado. Já as estimativas do EC 2 e NBR apresentaram boa correlação, porém não foi suficiente para estimar com precisão o modo de ruptura das lajes

Baseado nos resultados encontrados, o autor concluiu que lajes com o sistema *Bubbledeck* com uma região maciça de $1,5d$ em torno do pilar podem ser verificadas como lajes maciças pelas previsões da NBR aplicando um fator de minoração igual a 0,7.

Além disso, através da predisposição que a fissura crítica de cisalhamento apresentou nos ensaios em cruzar a primeira linha de esferas com uma inclinação média de $44,6^\circ$, o autor propôs que para essa norma seja feita uma verificação adicional em um perímetro de controle afastado à $d/2$ da região maciça em torno do pilar, como mostra a Figura 30.

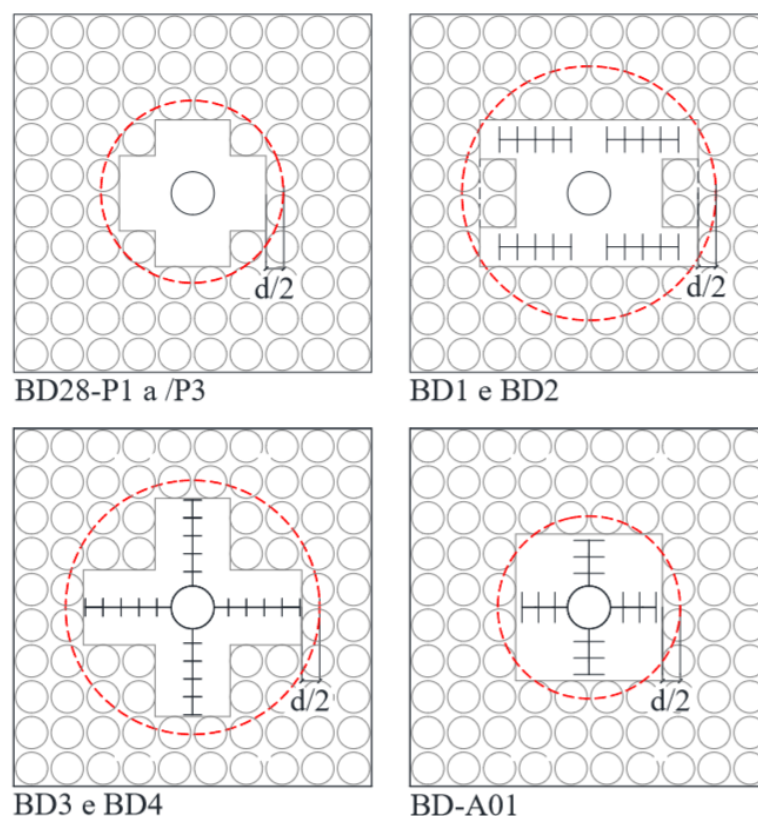


Figura 30 - Representação do perímetro de controle adicional para NBR 6118 proposto por Nicácio (2018).

O autor também realizou uma simulação numérica dos modelos de ensaio através do programa FEMIX 4.0, que é um programa de computador baseado no método de elementos finitos. Os resultados encontrados foram bastante próximos dos valores experimentais.

Em relação aos valores de carga última encontrados, o autor concluiu que as lajes *Bubbledeck* com armadura de cisalhamento apresentam capacidade resistente à punção de 5% a 19% menor que laje maciça de referência. Para lajes *Bubbledeck* sem armadura de cisalhamento este valor passa para cerca de 25% de redução.

2.3.3. CEBALLOS (2017)

A pesquisa realizada por Ceballos era composta por um programa experimental de seis lajes, cujo objetivo geral era avaliar experimentalmente o comportamento à punção da ligação laje-pilar para lajes do tipo *Bubbledeck* com armadura de cisalhamento na região maciça da laje e na região das nervuras. A Tabela 3 apresenta as características e os valores de carga última das lajes ensaiadas, que também são mostradas pelas Figuras 31 a 33.

Tabela 3 – Características e valores de carga última experimental das lajes ensaiadas por Ceballos (2017).

Laje	d (mm)	ρ	Materiais			Armadura de cisalhamento				V_u (kN)
			f_c (MPa)	$f_{ysw, stud}$ (MPa)	$f_{ysw, Treliça}$ (MPa)	Região maciça			Nervuras	
						Tipo	Dist.	$A_{sw}/camada$ (mm ²)		
RSP - A01	231	0,0082	37,0	580	623	Stud	Cruz	402,1	-	943
BD - A01	236	0,0104	29,0	580	623	Stud	Cruz	402,1	*	742
BD - A02	241	0,0098	37,0	580	623	Stud	Cruz	402,1	Treliça c/ inclinação de 60 ⁰	967
BD - A03	243	0,0096	37,0	580	623	Stud	Cruz	402,1	Treliça c/ inclinação de 45 ⁰	871
BD - A04	242	0,0097	29,0			-	-	-	Treliça c/ inclinação de 60 ⁰	762
BD - A05	244	0,0095	37,0			-	-	-	Treliça c/ inclinação de 45 ⁰	902

* Na laje BD-A01 foi utilizada apenas a treliça do método construtivo da *Bubbledeck*
 Obs: $S_0 = 110$ mm e $Sr = 115$ mm para todas as lajes com conectores
 d : Altura útil da laje
 ρ : taxa de armadura de flexão
 \varnothing_w : Diâmetro do estribo
 $A_{sw}/camada$: Área de aço correspondente a uma camada de armadura de cisalhamento
 S_0 : Distância da face do pilar até a primeira camada de armadura de cisalhamento
 Sr : Distância entre as camadas de cisalhamento
 f_c : Resistência à compressão do concreto em corpo de prova cilíndrico
 $f_{ysw,stud}$: Tensão de escoamento do conector
 $f_{ysw,treliça}$: Tensão de escoamento da treliça
 V_u : Carga última experimental

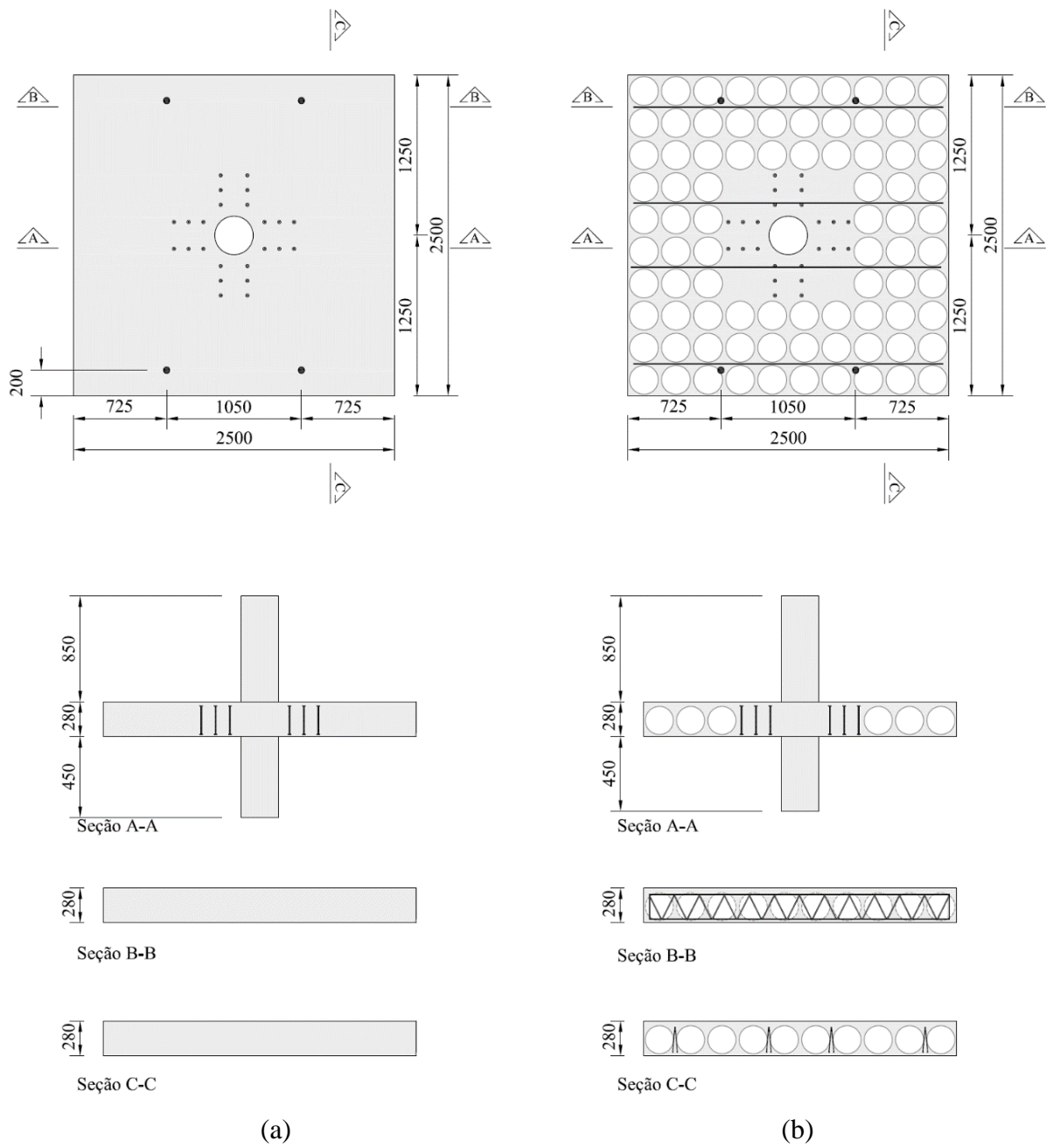


Figura 31 – Planta e cortes das lajes (a) RSP-A01 (b) BD-A01.

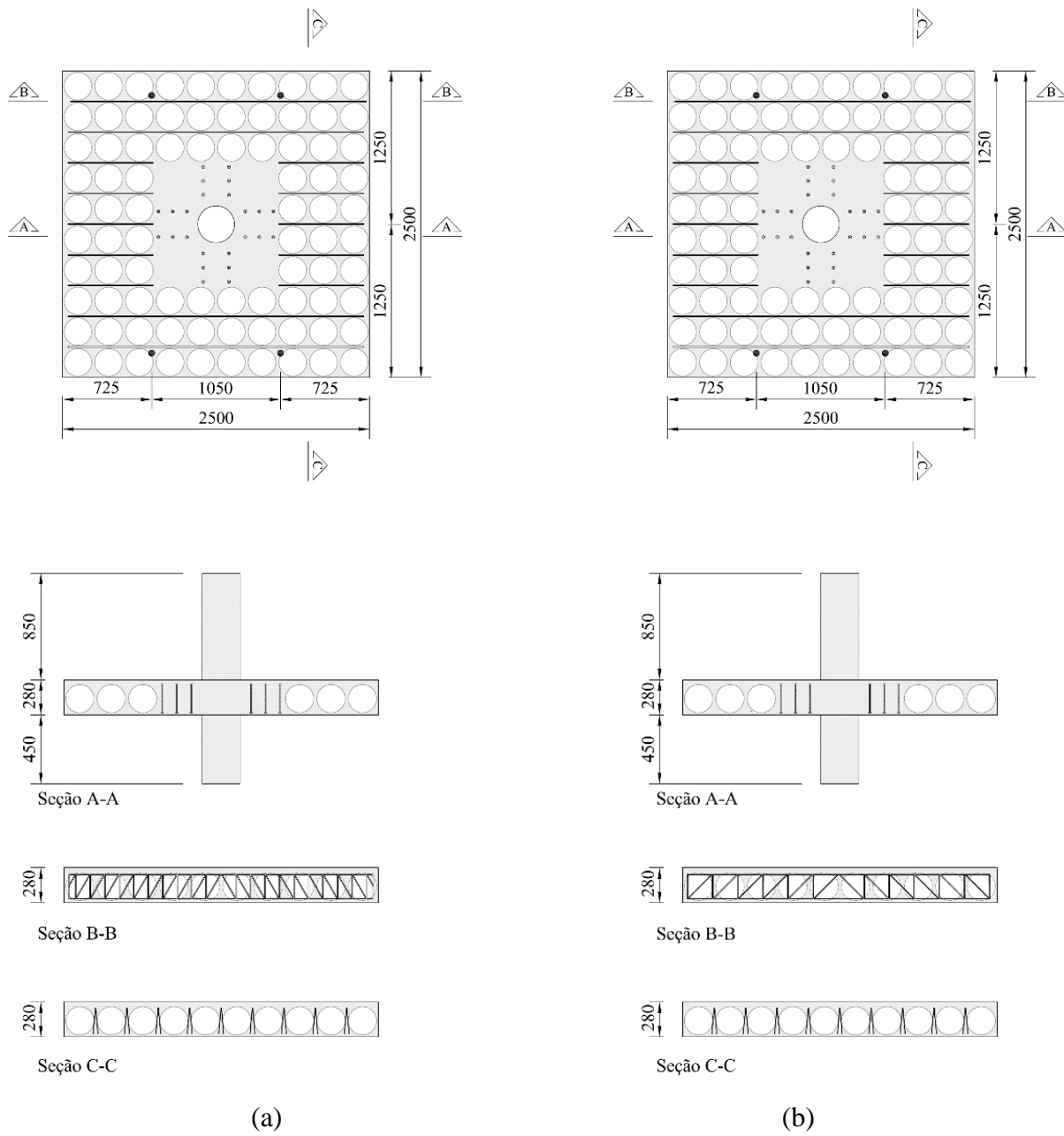


Figura 32 – Planta e cortes das lajes (a) BD-A02 (b) BD-A03.

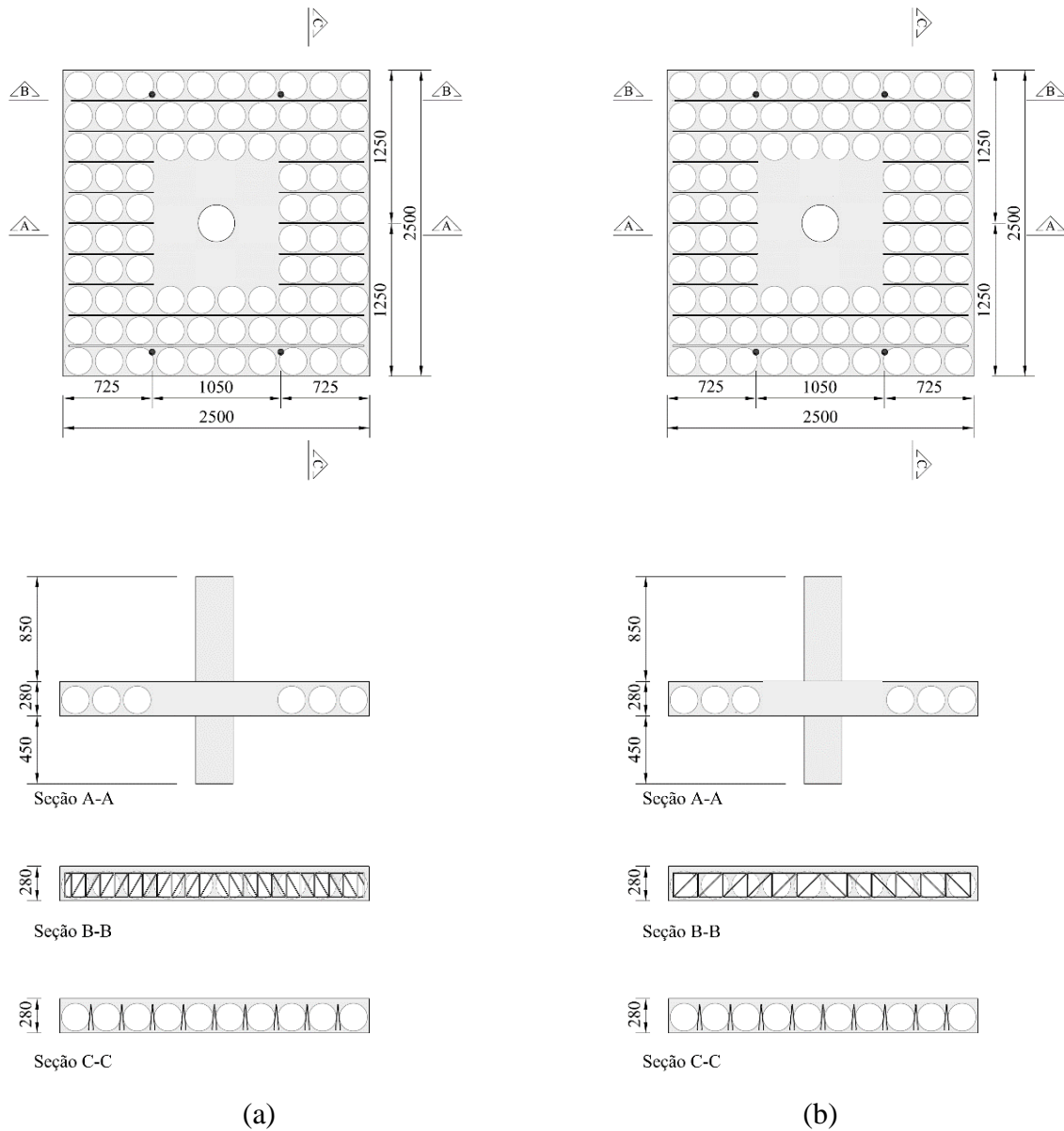


Figura 33 – Planta e cortes das lajes (a) BD-A04 (b) BD-A05.

O reforço com treliças incrementou a capacidade resistente à punção das lajes *Bubbledeck* em até 30%, quando comparadas com a laje *Bubbledeck* de referência. O autor concluiu que o uso de treliças aumentou a rigidez das lajes *Bubbledeck*, e ainda que as lajes com treliças com inclinação de 60° apresentaram maior rigidez que as lajes com as treliças com inclinação de 45° . Além disso, foi verificado que o uso de treliças nas nervuras das lajes *Bubbledeck* acarretou numa maior ativação e solicitação das armaduras de cisalhamento na região maciça.

2.3.4. VALIVONIS *et al.* (2017)

Os autores realizaram um estudo experimental e teórico que investigou a capacidade resistente à punção de lajes biaxiais de concreto armado com vazios. A fim de aumentar a capacidade resistente à punção das lajes lisas, foi colocada uma armadura de cisalhamento entre vazios nas nervuras de concreto. Foram analisadas lajes de 3090 mm x 3090 mm com vazios em toda a área da laje, com maciço em forma de cruz e maciço quadrado na região do pilar, cujas características e resultados experimentais estão apresentadas na Tabela 4. As Figuras 34 a 36 mostram as características geométricas das lajes.

Tabela 4 – Características e resultados experimentais das lajes ensaiadas por Valivonis *et al.* (2017).

Laje	d (mm)	H _{vazio} (mm)	ρ (%)	F _{ck} (MPa)	Geometria Maciço	Vu (kN)	Vu méd (kN)
BPR1-1	234,6	180	0,5	26,5	-	600,2	600,1
BPR1-2	234,7	180	0,5	26,5	-	600,1	
BPR2-1	232,9	180	0,5	28,9	Cruz	776,3	740,4
BPR2-2	235,0	180	0,5	28,9	Cruz	704,5	
BPR3-1	152,8	95	0,5	28,0	Quadrado	385,4	406,8
BPR3-2	150,0	95	0,00416	28,0	Quadrado	428,1	

Obs: Todas as lajes tinham pilares quadrados de 350 mm x 350 mm e altura de 200 mm

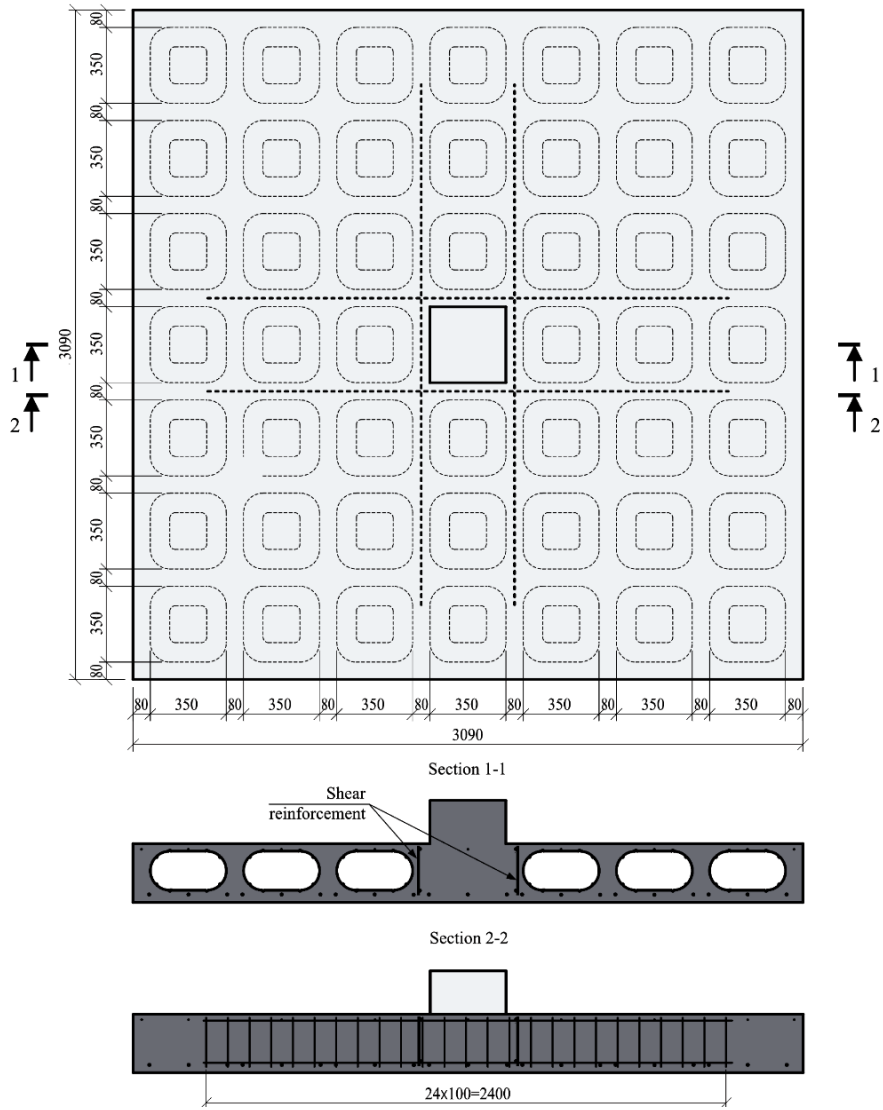


Figura 34 – Características das lajes BPR1.

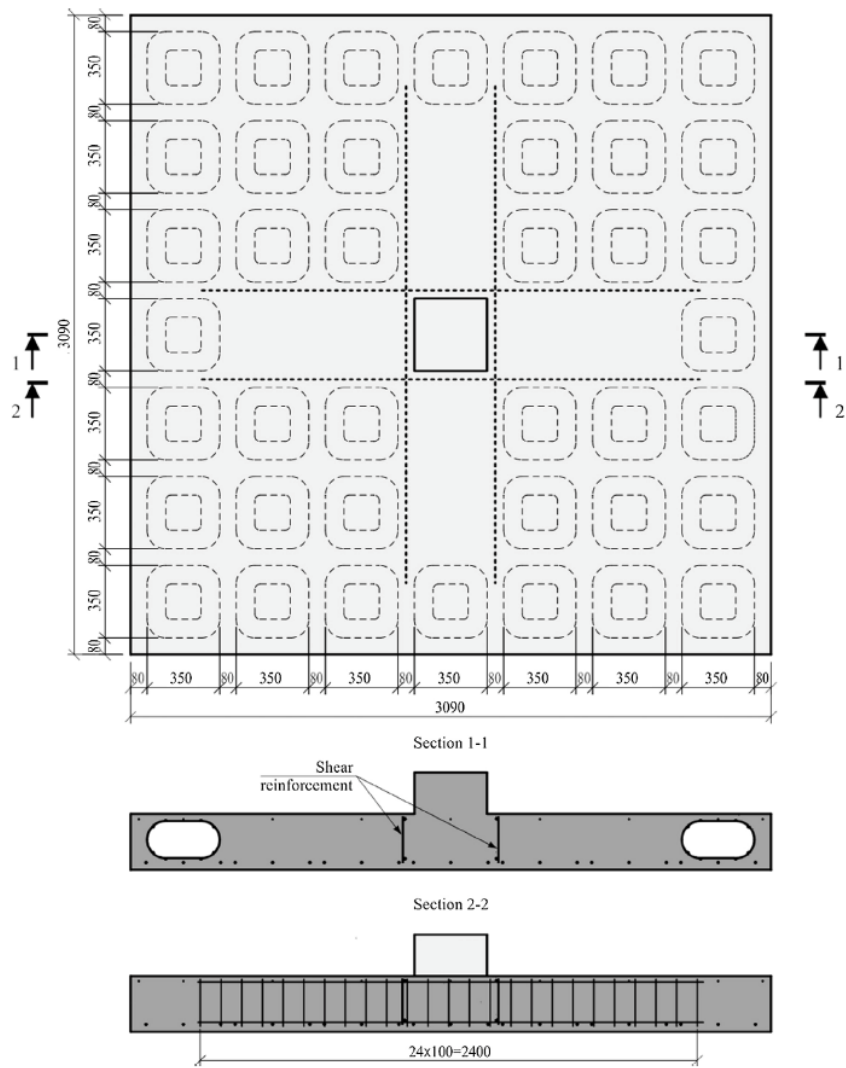


Figura 35 – Características das lajes BPR2.

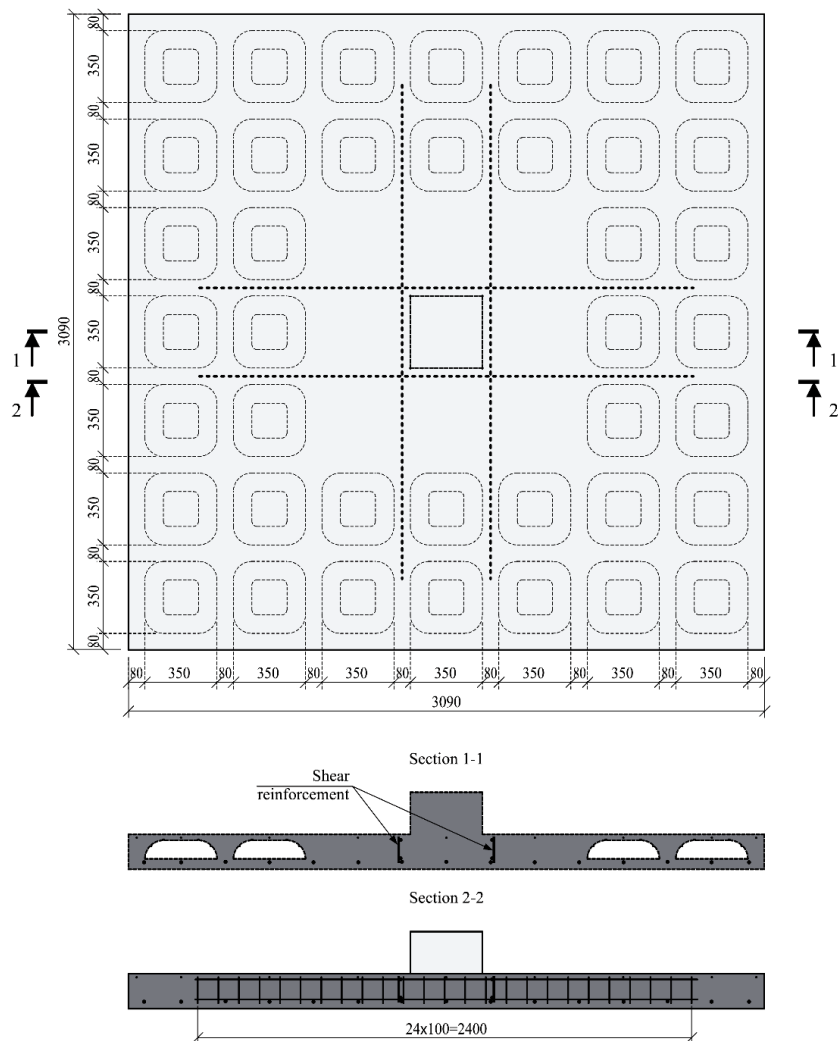


Figura 36 – Características da laje BPR3.

Através da análise dos resultados, foi verificado que o modo de ruptura de todas as lajes foi bastante similar e que a presença do maciço em forma de cruz apresentou um ganho de resistência de 18% quando comparado à laje sem a presença do maciço. Foi observado também que o deslocamento do ponto do meio do vão da laje não é afetado pela distribuição dos vazios da laje antes da fissuração. Porém, depois da fissuração, o deslocamento da laje BPR1 foi maior que o da laje BPR2.

Além disso, os autores propuseram um método para calcular a capacidade resistente à punção com base na metodologia do Eurocode 2, reduzindo a área de corte da laje devido à presença dos vazios, conforme mostra a Equação 3.

$$u_{eff} = u_1 - \sum b_i / \left(\frac{d}{h_b} \right) \quad \text{Equação 3}$$

Onde,

u_{eff} : comprimento do perímetro de controle efetivo;

u_1 : comprimento do perímetro de controle do EC2;

b_i : largura da forma do vazio;

h_b : altura da forma do vazio.

A Tabela 5 mostra a comparação entre os resultados experimentais e os valores teóricos calculados conforme a mudança do perímetro de controle proposta pelo autor. Porém, as lajes BPR3 foram calculadas conforme o modelo do Eurocode 2 sem adaptações devido à geometria de sua região maciça.

Tabela 5 - Comparação entre os resultados experimentais e os resultados calculados pelo método teórico proposto.

Laje	$V_{u,exp}$	U_1	V_{EC2}	$V_{u,exp}/V_{EC2}$	u_{eff}	$V_{u,calc}$	$V_{u,exp}/V_{u,calc}$
BPR2-1	776,33	4325	856,5	0,9	3243	703,26	1,10
BPR2-2	704,46	4325	862,6	0,81	3279	710,73	0,99
BPR1-1	600,16	4377	850,4	0,7	2198	558,15	1,07
BPR1-2	600,12	4222	815,9	0,73	2201	548,82	1,10
BPR3-1	385,43	3319	456,4	0,84	3319	456,44	0,84
BPR3-2	428,13	3284	447,5	0,96	3284	447,55	0,96

A comparação mostrou que o método proposto para lajes sem a presença de maciços pode ser considerado como preciso, pois, a diferença média entre o valor experimental e o valor calculado para essas lajes foi de 6,3%. O autor também concluiu que os valores experimentais são 10-30% inferiores aos valores calculados de acordo com a metodologia do Eurocode 2.

Os valores calculados da capacidade resistente à punção foram bastante semelhantes aos valores experimentais quando a metodologia proposta foi aplicada, sendo até 16% menores do que os valores experimentais.

2.3.5. HAI *et al.* (2013)

Os autores realizaram um programa experimental composto por cinco lajes com vazios, sendo duas destas lajes com vazios esféricos de 186 mm de diâmetro e as três restantes com vazios elípticos de 240 mm de diâmetro e 180 mm de altura, mostrados na Figura 37.

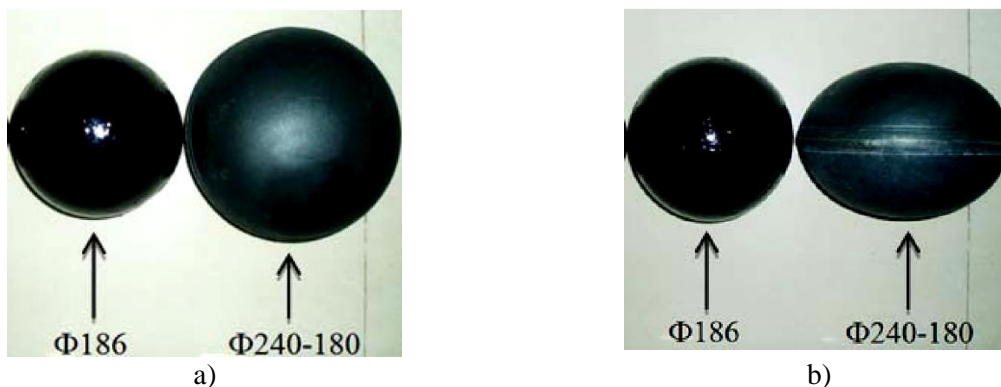


Figura 37 – Dimensões das formas plásticas dos vazios das lajes – a) Visão Superior e b) Visão Lateral.

Todos os modelos ensaiados eram de dimensões de 1900 x 800 x 230 mm, mostrados de forma mais detalhada na Figura 38. A Tabela 6 apresenta as características dos modelos em relação ao concreto e ao tipo de vazio utilizados, bem como, os principais resultados experimentais.

Tabela 6 – Características das lajes ensaiadas por Hai *et al.* (2013)

Laje	Concreto	Vazio	Carga última (kN)	Flecha (mm)	Tipo de ruptura
A.BD.2	B25	Esférico	175	16,15	Cisalhamento
B.BD.2	B35	Esférico	185	21,06	Flexão
A.BD.3	B25	Elíptico	195	23,04	Flexão
B.BD.3	B35	Elíptico	180	15,18	Cisalhamento
A.BD.4*	B25	Elíptico	200	20,22	Flexão

*Essa laje tem armadura de cisalhamento

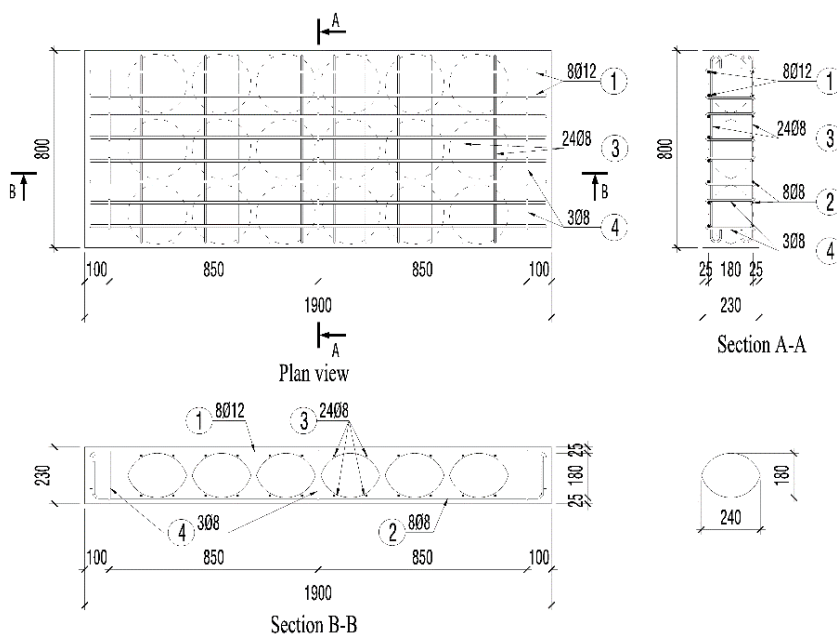


Figura 38- Características das lajes ensaiadas por Hai *et al.* (2013).

Com base nos resultados experimentais, os autores verificaram que a carga última usando os vazios modificados *Bubbledeck*, ou seja, utilizando vazios elípticos, são de 6% a 11% maiores quando comparado às lajes com vazios esféricos.

Além do programa experimental, os autores fizeram uma análise numérica, usando o método de elementos finitos, dos modelos ensaiados utilizando o *software* ANSYS, cujo modelo é mostrado na Figura 39. A Tabela 7 mostra a comparação entre os resultados experimentais e da análise numérica realizada dos valores obtidos de carga última e deflexão no centro da laje.

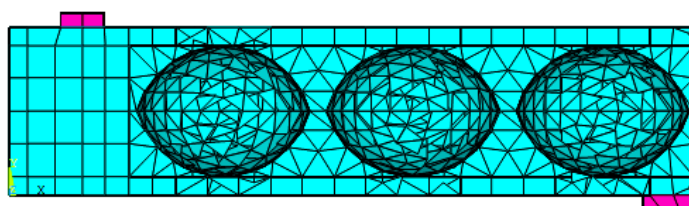


Figura 39 – Modelo numérico da laje com vazios esféricos.

Tabela 7 – Comparação entres os resultados experimentais e da análise numérica.

Laje	Carga última (kN)			Flecha (mm)		
	Experimental	ANSYS	Erro (%)	Experimental	ANSYS	Erro (%)
A.BD.2	175	199,2	13,8	16,2	13,5	-16,4
A.BD.3	185	209,0	13,0	21,1	18,9	-10,3
A.BD.4	195	222,1	13,9	23,0	19,7	-14,5
B.BD.2	180	206,5	14,7	15,2	12,8	-15,7
B.BD.3	200	226,8	13,4	20,2	16,7	-14,4

Os autores propuseram uma modificação no modelo de cálculo para a capacidade resistente de flexão e cisalhamento da norma do Vietnã (Vietnamese Construction Buildings Codes – TCXDVN).

2.4. PRESCRIÇÕES NORMATIVAS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À PUNÇÃO DE LAJES LISAS MACIÇAS

Para o cálculo de resistência à punção de lajes maciças, as normas propõem verificações de compressão na biela de concreto e tração diagonal do concreto. A seguir, são apresentados os modelos de estimativa da capacidade resistente de ligações em lajes lisas maciças com carregamento simétrico com uso ou não de armadura de cisalhamento propostos pelas normas Eurocode 2 e suas correções AC Eurocode 2 (2010) e BS Eurocode 2 (2014), ABNT NBR 6118 (2014) e ACI 318 (2014) e o código modelo *fib* Model Code 2010 (2013).

2.4.1. ABNT NBR 6118 (2014)

No modelo teórico adotado pela norma brasileira para a verificação da resistência punção de lajes sem armadura de cisalhamento, é necessário verificar a tensão de compressão diagonal na biela de concreto e a resistência à tração diagonal. Dessa forma, estas verificações, cujas expressões são dadas pelas Equações Equação 4 e Equação 5, são feitas através da tensão de cisalhamento em dois perímetros de controle, um no contorno do pilar (u_0) e outro afastado da face do pilar de duas vezes a altura útil da laje (u_1), conforme mostra a Figura 40.

$$V_{R,máx} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{f_c}{250}\right) \cdot f_{ck} \cdot u_0 \cdot d \quad \text{Equação 4}$$

$$V_{R,c} = 0,182 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} u_1 \cdot d \quad \text{Equação 5}$$

Onde,

ξ : *size effect* calculado pela expressão dada pela Equação 6;

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \quad (d \text{ em mm}) \quad \text{Equação 6}$$

ρ : taxa geométrica de armadura de flexão;

f_{ck} : resistência característica à compressão do concreto;

d : altura útil da laje.

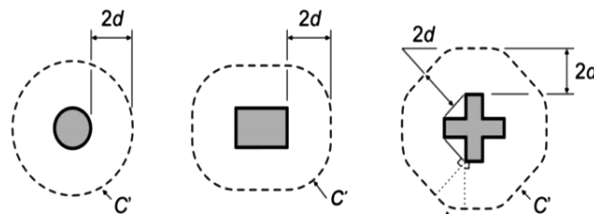


Figura 40 – Definição do perímetro de controle u_1 de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014).

Já para lajes com armadura de cisalhamento, tem-se a verificação da compressão diagonal da biela de concreto, a verificação da tração diagonal do concreto no mesmo perímetro u_1 , porém agora com a contribuição da parcela de aço existente. Além dessas, deve-se verificar também a tração diagonal do concreto na região externa às armaduras de cisalhamento num perímetro afastado de duas vezes a altura útil da última camada da armadura de cisalhamento (u_{out}), conforme mostra a Figura 41. Portanto, as três verificações para lajes com armadura de cisalhamento são dadas pelas Equações Equação 4, Equação 7 e Equação 8, respectivamente.

$$V_{R,cs} = 0,14 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} u_1 \cdot d + 1,5 \cdot \frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,ef} \quad \text{Equação 7}$$

$$V_{R,out} = 0,182 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} u_{out} \cdot d \quad \text{Equação 8}$$

Onde,

$f_{yw,ef}$: tensão efetiva da armadura de cisalhamento;

A_{sw} : área de aço correspondente a uma camada da armadura de cisalhamento;

s_r : distância entre duas camadas da armadura de cisalhamento.

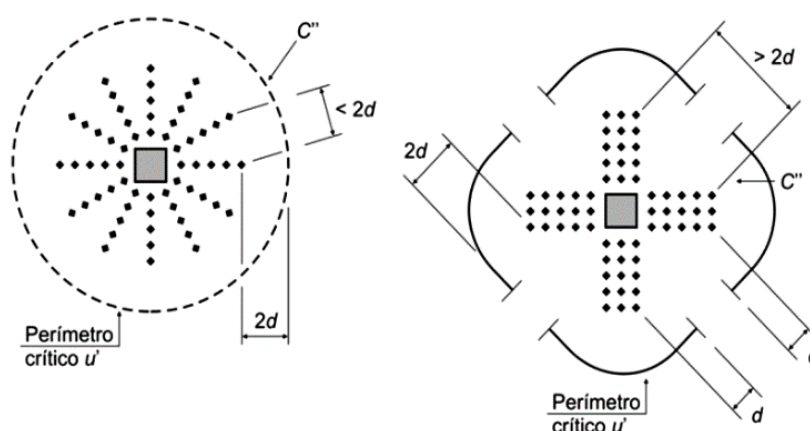


Figura 41 – Definição do perímetro de controle u_{out} de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014).

2.4.2. EUROCODE 2

O modelo de cálculo do Eurocode 2 é análogo ao da norma brasileira, portanto, os perímetros de controle serão os mesmos com exceção do perímetro u_{out} que para esta norma é afastado 1,5 vezes a altura útil da laje da face do pilar, conforme mostra a Figura 42. As expressões para as verificações propostas por esta norma também são bastante similares com as da norma brasileira, sendo apenas alguns coeficientes ligeiramente diferentes conforme mostram as Equações Equação 9 a Equação 12.

É importante ressaltar que, diferentemente da norma brasileira, o Eurocode 2 limita o *size effect* (ξ) em 2,0 e a taxa geométrica de armadura (ρ) em 0,02.

$$V_{R,c} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} u_1 \cdot d \quad \text{Equação 9}$$

$$V_{R,cs} = 0,75 \cdot V_{R,c} + \left(1,5 \cdot \frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,ef} \right) \quad \text{Equação 10}$$

$$V_{R,out} = 0,18 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} u_{out} \cdot d \quad \text{Equação 11}$$

$$V_{R,máx} = 0,24 \cdot f_{ck} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \cdot u_0 \cdot d \quad \text{Equação 12}$$

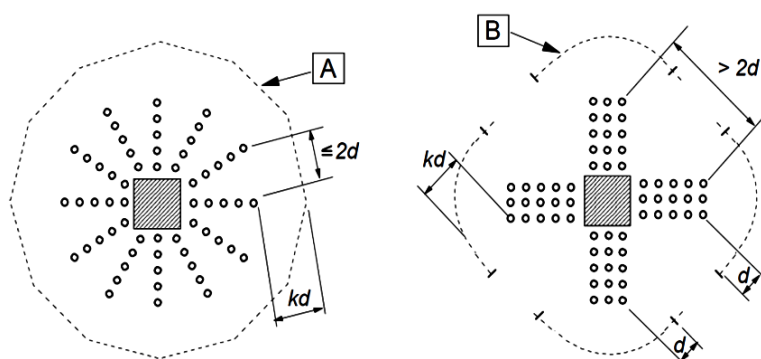


Figura 42 – Definição do perímetro de controle u_{out} de acordo com o Eurocode 2.

2.4.3. ACI 318 (2014)

Segundo o ACI 318 (2014) a resistência à punção para lajes sem armadura de cisalhamento é dada pelo valor mínimo de três expressões, dadas na Equação 13. Diferentemente das outras normas, a norma americana não leva em consideração a contribuição da taxa de armadura de flexão e *size effect*, porém esta considera o efeito da retangularidade do pilar e a localização da ligação laje-pilar. Os perímetros adotados neste modelo também são diferentes das outras normas, sendo, para lajes sem armadura de cisalhamento, afastado de metade da altura útil da laje da face do pilar, conforme mostra a Figura 43.

$$V_{R,c} = \min \begin{cases} 0,17 \cdot \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \\ 0,083 \cdot \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{u_1} + 2 \right) \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \\ 0,33 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_1 \cdot d \end{cases} \quad \text{Equação 13}$$

Onde,

α_s é uma constante que assume valor igual a 40 para pilar interno, 30 para pilar de borda e 20 para pilar de canto;

β é a razão entre o maior e o menor lado do pilar.

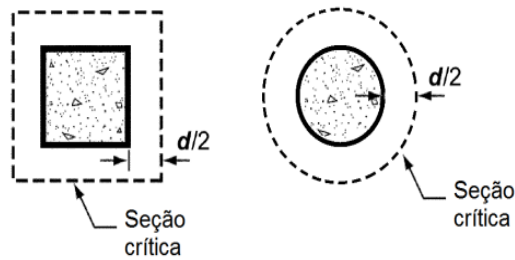


Figura 43 – Definição do perímetro de controle u_1 de acordo com o ACI 318 (2014).

Para lajes com armadura de cisalhamento, o perímetro de controle u_{out} é afastado de metade da altura útil da última camada de armadura de cisalhamento, conforme mostra a Figura 44, e as expressões para esta verificação são dadas pelas Equações 14 a 16.

$$V_{R,máx} = \begin{cases} 0,66 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{out} \cdot d & \text{para conectores de aço} \\ 0,5 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{out} \cdot d & \text{para estribo} \end{cases} \quad \text{Equação 14}$$

$$V_{R,cs} = \begin{cases} 0,25 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{out} \cdot d + \left(\frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw} \right) & \text{para conectores de aço} \\ 0,17 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{out} \cdot d + \left(\frac{d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw} \right) & \text{para estribo} \end{cases} \quad \text{Equação 15}$$

$$V_{R,out} = 0,17 \cdot \sqrt{f_c} \cdot u_{out} \cdot d \quad \text{Equação 16}$$

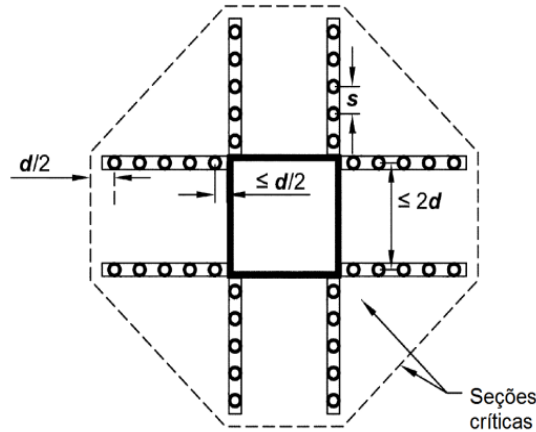


Figura 44 – Definição do perímetro de controle u_{out} de acordo com o ACI 318 (2014).

2.4.4. Fib Model Code 2010 (2013)

O modelo de cálculo para a estimativa de capacidade resistente à punção adotado pelo *fib* Model Code 2010 (2013) é baseado na “Teoria da Fissura Crítica de Cisalhamento” desenvolvida por MUTTONI (2008). Nesta teoria a resistência à punção da laje depende da magnitude da abertura de uma fissura crítica, que é correlacionada com a rotação da laje (ψ), ilustrada na Figura 45.

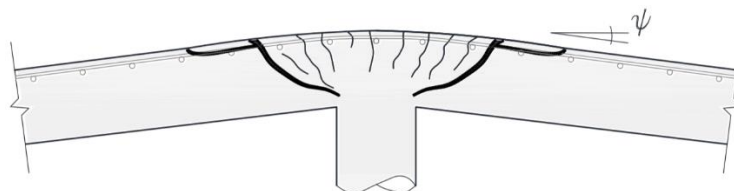


Figura 45 – Rotação ψ da laje.

Para este modelo, a altura útil que entrará na resistência será a altura útil efetiva (d_v), que resiste ao cisalhamento, diferentemente das outras normas que consideram a altura útil de flexão (d). A Figura 46 mostra como deve ser considerado esse parâmetro.

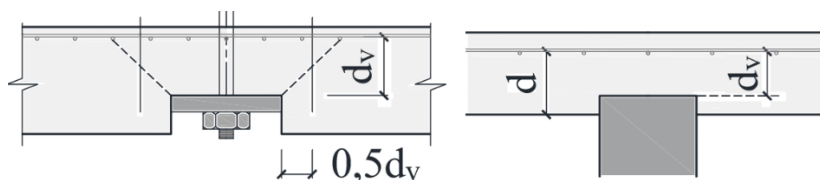


Figura 46 – Altura útil efetiva considerada no modelo do *fib* Model Code 2010 (2013).

O perímetro de controle básico (b_l) é afastado de metade da altura útil efetiva da área carregada, como mostra a Figura 47.

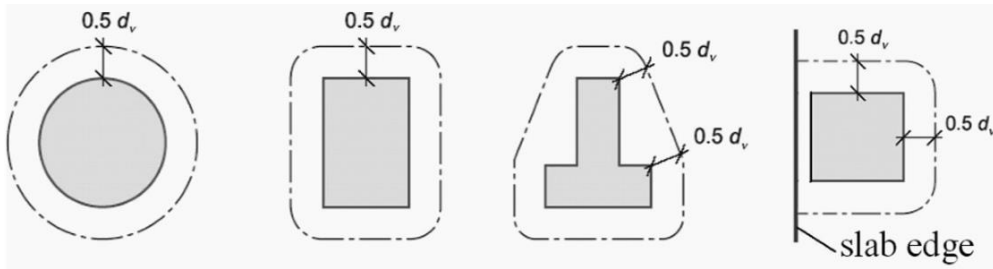


Figura 47 – Perímetro de controle básico em volta da área carregada (b_l).

Quando a área carregada for muito grande, o perímetro de controle básico deve ser reduzido ($b_{l,red}$), conforme ilustrado na Figura 48.

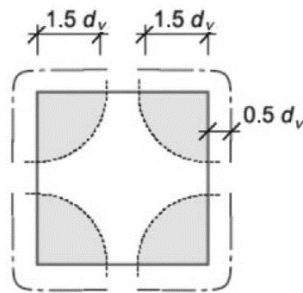


Figura 48 - Redução do perímetro de controle básico para grandes áreas carregadas.

A contribuição do concreto para a capacidade resistente à punção é dada pela Equação 17.

$$V_{R,c} = k_{\psi} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_0 \cdot d_v \quad \text{Equação 17}$$

O parâmetro k_{ψ} é calculado pela Equação 18 e irá levar em consideração a influência da rotação da laje (ψ) e a contribuição do engrenamento dos agregados na capacidade resistente.

$$k_{\psi} = \frac{1}{1,5 + 0,9 \cdot k_{dg} \cdot \psi \cdot d} \leq 0,6 \quad \text{Equação 18}$$

Sendo,

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75 \quad \text{Equação 19}$$

Onde,

d_g é o diâmetro máximo do agregado graúdo;

d é a altura útil de flexão (conforme mostrado na Figura 36);

O cálculo da rotação da laje (ψ) pode ser feita em quatro “níveis de aproximações” diferentes. No nível I, para lajes lisas retangulares de acordo com uma análise elástica sem significantes redistribuição de esforços, uma estimativa segura da rotação na ruptura dada pela a Equação 20.

$$\psi = 1,5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_y}{E_s} \quad \text{Equação 20}$$

Onde,

r_s é a posição onde o momento fletor radial é zero em relação ao eixo do apoio. O valor de r_s pode ser aproximado como 0,22 L_x ou 0,22 L_y para direções x e y , respectivamente, para lajes lisas retangulares onde a razão dos vãos está entre 0,5 e 2,0;

f_y é a tensão de escoamento do aço;

E_s é o módulo de elasticidade do aço;

O nível II oferece uma estimativa para casos onde há significativa redistribuição de momento fletor. Para esse nível de aproximação a rotação é dada pela a Equação 21.

$$\psi = 1,5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_y}{E_s} \cdot \left(\frac{V_e / 8}{m_r} \right)^{1,5} \quad \text{Equação 21}$$

Onde,

m_r é o momento resistente por unidade de largura da laje;

V_e é a carga solicitante;

O nível III oferece uma melhor estimativa para lajes calculadas por modelo linear-elástico, substituindo o coeficiente 1,5 na Equação 21 por 1,2, resultando na Equação 22

$$\psi = 1,2 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_y}{E_s} \cdot \left(\frac{V_e / 8}{m_r} \right)^{1,5} \quad \text{Equação 22}$$

Por fim, o nível IV é utilizado com bases em análises não lineares da estrutura, levando em conta os efeitos da fissuração e enrijecimento, escoamento das armaduras e outros efeitos não lineares relevantes.

Em lajes com armadura de cisalhamento na região interna a essas, além da contribuição do aço, dado pela Equação 23, haverá também a contribuição do aço. Dessa forma, a capacidade resistente da ligação laje-pilar é dada pela Equação 23.

$$V_{R,cs} = V_{R,c} + V_{R,s} \quad \text{Equação 23}$$

Sendo $V_{r,s}$ a contribuição das armaduras de cisalhamento, dada pela Equação 24.

$$V_{R,s} = \sum A_{sw} \cdot k_e \cdot \sigma_{sw} \cdot \text{sen}\alpha \quad \text{Equação 24}$$

Onde,

ΣA_{sw} é a soma das áreas da seção transversal das armaduras de cisalhamento localizadas dentro da zona delimitada pelas distâncias de $0,35d$ e d das extremidades da área carregada;

α é o ângulo de inclinação entre o eixo da armadura de cisalhamento e o plano da laje;

σ_{sw} é a tensão que é ativada nas armaduras, calculada pela Equação 25.

$$\sigma_{sw} = \frac{E_s \cdot \psi}{6} \cdot \left(1 + \frac{f_b}{f_{yw}} \cdot \frac{d}{\phi_w} \right) \leq f_{yw} \quad \text{Equação 25}$$

Onde,

σ_w é o diâmetro da armadura de cisalhamento;

f_{yw} é a tensão de escoamento da armadura de cisalhamento;

f_b é a tensão de aderência ao concreto, que para barras corrugadas pode ser adotada igual a 3 MPa;

Na região externa às armaduras de cisalhamento, a resistência à punção é dada pela Equação 26.

$$V_{R,c,out} = k_{\psi} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_{out} \cdot d_v \quad \text{Equação 26}$$

b_{out} é o comprimento do perímetro de controle afastado de metade da altura útil efetiva da camada mais externa de cisalhamento, respeitando-se os limites mostrados na Figura 49.

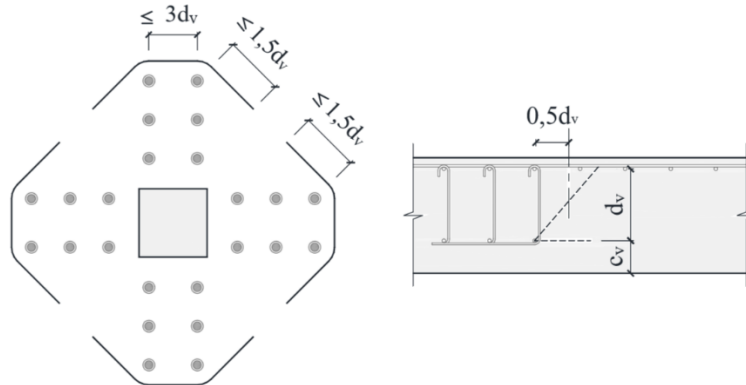


Figura 49 – Perímetro de controle para lajes com armadura de cisalhamento (u_{out}).

Por fim, para lajes com armadura de cisalhamento, deve-se verificar a resistência da biela de concreto, dada pela Equação 27.

$$V_{R,máx} = k_{sys} \cdot k_{\psi} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_0 \cdot d_v \leq \sqrt{f_{ck}} \cdot b_0 \cdot d_v \quad \text{Equação 27}$$

Onde,

k_{sys} é o parâmetro que considera o desempenho das armaduras de cisalhamento para controlar a fissuração e para confinar as bielas comprimidas. Simplificadamente, k_{sys} pode ser tomado igual a 2,0;

3. METODOLOGIA

Nenhuma das prescrições normativas apresentadas (Eurocode 2 (2014), ACI 318 (2014) e NBR 6118 (2014), *fib* Model Code 2010 (2013)) levam em consideração os vazios presentes no sistema de laje lisa tipo *Bubbledeck*, sendo assim, é inadequado usar esses modelos de cálculo para estimar a resistência à punção deste tipo de laje. Dessa forma, é necessário que sejam propostas adaptações a estes modelos a fim de considerar as mudanças no comportamento da laje devido à presença de vazios.

Portanto, a finalidade do trabalho é a adaptação dos modelos de cálculo de resistência à punção previstos nas normas), visto que nenhuma destas normas prevê estimativa de capacidade resistente em lajes com vazios. Para isto, a metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho será a elaboração de cálculos em planilhas eletrônicas para estimar os valores de resistência à punção com adaptações nos modelos teóricos existentes, e compará-los com os resultados experimentais obtidos em pesquisas realizadas. Para tal, foram elaboradas cinco hipóteses de cálculo que serão comparados com um banco de dados de resultados de pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília (LABEST – UnB) e também no exterior, para verificar se estas adaptações serão ou não satisfatórias e também, a avaliação dos dados de deslocamento, deformações e carga coletados durante os ensaios para uma melhor compreensão do comportamento mecânico dos modelos ensaiados.

3.1. COLETA DO BANCO DE DADOS

Para avaliar se os resultados das adaptações são satisfatórios é necessário compará-los com resultados obtidos experimentalmente. Para isso, foi montado um banco de dados com os resultados experimentais de lajes lisas com vazios ensaiadas à punção. A Tabela 8 apresenta o banco de dados utilizado nesse trabalho.

Tabela 8 – Banco de dados das lajes lisa com vazios

Autores	Laje	d (mm)	ρ (%)	Armadura de cisalhamento								Treliça		Materiais			Vu (kN)
				\varnothing_w (mm)	Tipo	Padrão	Nº Linhas	A_{sw} / camada (mm ²)	Nº camada	S ₀ (mm)	S _r (mm)	α_t (°)	\varnothing_t (mm)	f _c (MPa)	f _{ysw} (MPa)	f _{yst} (MPa)	
Nicácio (2018)	BD28-P1	250	0,48	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	47,7	---	---	642
	BD28-P2	255	0,46	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	47,7	---	---	651
	BD28-P3	252	0,46	6,3	Estribo	BD	8	249,4	3	100	100	---	---	47,7	622	---	697
	BD1	241	0,50	8,0	Estribo	BD	8	402,1	5	163	125	---	---	44,6	675	---	817
	BD2	255	0,45	8,0	Estribo	BD	8	402,1	5	163	125	---	---	44,6	675	---	833
	BD3	242	0,50	8,0	Estribo	Cruz	8	402,1	5	100	125	---	---	47,1	675	---	995
	BD4	253	0,46	8,0	Estribo	Cruz	8	402,1	5	100	125	---	---	47,1	675	---	846
Ceballos (2016)	BD - A01	236	1,04	8,0	Stud	Cruz	8	402,1	3	110	115	63	6,3	29,0	580	623	742
	BD - A02	241	0,98	8,0	Stud	Cruz	8	402,1	3	110	115	60	6,3	37,0	580	623	967
	BD - A03	243	0,96	8,0	Stud	Cruz	8	402,1	3	110	115	45	6,3	37,0	580	623	871
	BD - A04	242	0,97	---	---	---	---	---	---	---	---	60	6,3	29,0	---	623	762
	BD - A05	244	0,95	---	---	---	---	---	---	---	---	45	6,3	37,0	---	623	902
Valivonis (2017)	BPR1-1	235	0,49	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	26,5	---	---	600
	BPR1-2	235	0,49	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	26,5	---	---	600
	BPR2-1	233	0,49	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	28,9	---	---	776
	BPR2-2	235	0,49	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	28,9	---	---	704
	BPR3-1	153	0,40	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	28	---	---	385
	BPR3-2	150	0,42	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	28	---	---	428
Held (2002)	D1-24	190	1,81	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	37	---	---	520
	D2-24	190	1,81	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	44	---	---	580
	D3-24	190	1,81	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	40	---	---	525
	D4-45	380	1,06	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	24	---	---	935
	D5-45	380	1,06	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	31	---	---	990
	D6-45	380	1,06	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	33	---	---	1180

3.2. ADAPTAÇÕES AOS MODELOS DE CÁLCULO DE PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

3.2.1. Hipóteses de cálculo 1, 2, 3 e 4

Na hipótese de que o perímetro de controle intercepta as esferas, HELD (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), LEDO (2016) e NÍCACIO (2018) contribuíram com pequenas alterações a estas formulações com a finalidade de adequá-las às normas da ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2014) e a recomendação do *fib* Model Code 2010 (2013).

Dessa maneira, uma das adaptações a serem feitas nos modelos de cálculo é a mudança nas áreas dos perímetros de controle (produto do perímetro de controle e altura útil da laje) considerados para as verificações da resistência à punção, pois como a área de concreto na seção transversal vai combater os esforços de cisalhamento nessa região, os vazios deixados pelas esferas devem ser descontados para o cálculo da resistência, como mostra a Figura 50a. Dessa forma, com ajuda do *software* de desenho AutoCAD, foram desenhados os perímetros estabelecidos por cada norma e verificado a quantidade e a seção das esferas cortadas por estes perímetros, como mostra a Figura 50b. Feito isso, descontou-se a área total de vazios deixados pelas esferas da área total delimitada pelos perímetros de acordo com as Equações 28 e 29.

$$A_{c,ef} = u \cdot d - \sum \frac{l_{arc} \cdot \pi}{4} \quad \text{Equação 28}$$

$$V_c = v \cdot A_{c,ef} \quad \text{Equação 29}$$

Onde,

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

u é o perímetro de controle;

d é a altura útil da laje;

l_{arc} é o comprimento da corda correspondente ao arco gerado pela interseção entre o perímetro e esfera, como ilustrado na Figura 50b;

v é a tensão de cisalhamento nominal.

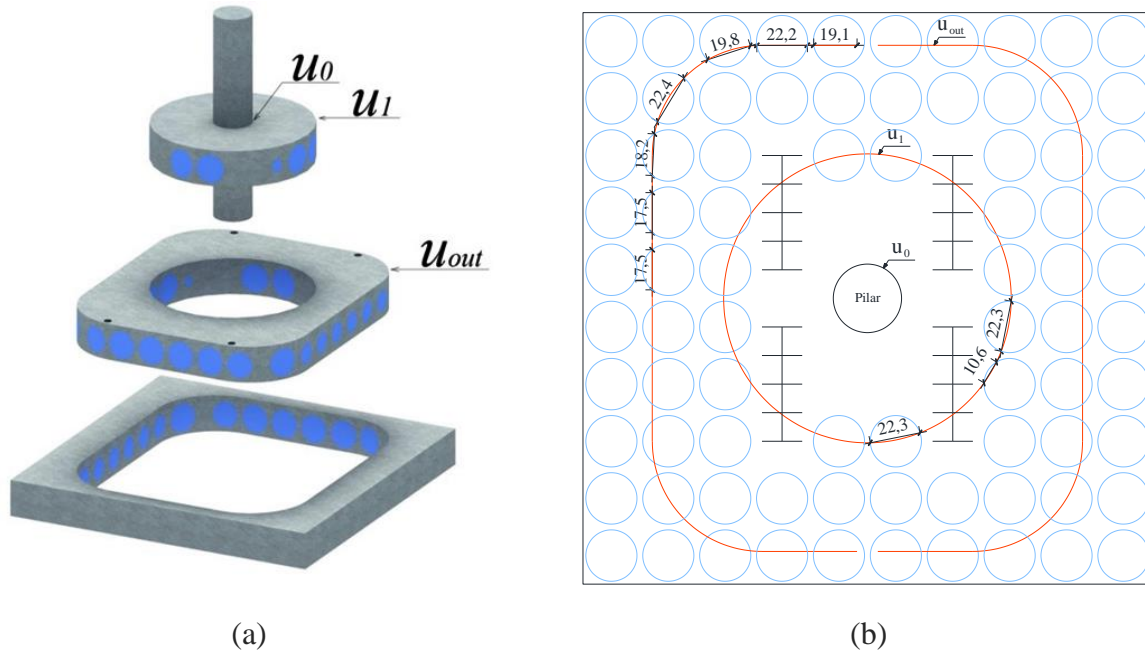


Figura 50– (a) Exemplificação dos vazios deixados pelas esferas na seção delimitada pelo perímetro (b) Exemplificação de como foram tomados os valores a serem descontados da área da seção do perímetro (SANTOS, 2016)

Outra adaptação é a mudança no cálculo na taxa geométrica de armadura de flexão. Segundo as normas do Eurocode 2 e ABNT NBR 6118 (2014) esse parâmetro, para lajes lisas sem vazios, é calculado pela razão entre a área de aço e a área de concreto dentro de um perímetro afastado da face do pilar de três vezes a altura útil. Portanto, de forma análoga, para as lajes com vazios a taxa de armadura passou a ser calculada pela razão do volume de aço pelo volume efetivo de concreto delimitado pelo perímetro citado anteriormente, conforme é apresentado pela Equação 30. Essa mudança no cálculo da taxa de armadura não traz diferença de resultado para as lajes lisas sem vazios.

$$\rho = \frac{V_{aço}}{V_{concreto}} \quad \text{Equação 30}$$

Onde,

ρ é a taxa de armadura de flexão;

$V_{aço}$ é o volume de aço dado pelas barras de armadura dentro do perímetro quadrado afastado de $3d$ da face do pilar;

$V_{concreto}$ é o volume efetivo de concreto dentro do perímetro quadrado afastado de $3d$ da face do pilar.

Além disso, para as lajes de CEBALLOS (2017) é necessário considerar a contribuição da treliça. Para tal, as treliças interceptadas pelos perímetros de controle serão consideradas na parcela de contribuição das armaduras de cisalhamento dos modelos de cálculo de estimativa da resistência à punção. Devido ao fato das treliças não estarem ancoradas e pelos baixos níveis de deformação observados nos ensaios, optou-se por considerar apenas 50% de eficiência destas. Ressalta-se que o perímetro externo à região das armaduras de cisalhamento presentes na região maciça da laje também terá a contribuição da treliça, portanto na estimativa desse tipo de ruptura também haverá uma parcela de contribuição de aço. Dessa forma, para essas lajes, de uma maneira geral teremos as Equações 31 e 32 para as estimativas dos modelos de cálculo em questão.

$$V_{R,cs} = V_c + V_{s,stud} + 0,5 \cdot V_{s,treliça} \quad \text{Equação 31}$$

$$V_{R,out.s} = V_{c,out} + 0,5 \cdot V_{s,treliça} \quad \text{Equação 32}$$

Ressalta-se que para os modelos de cálculo da NBR e Eurocode 2 a parcela do concreto (V_c) é multiplicada por um fator de minoração de 0,75.

A fim de analisar avaliar cada uma das adaptações nos resultados estimados e qual representa melhor os resultados experimentais, foram elaboradas quatro hipóteses de modelos de cálculo combinando as adaptações citadas. O resumo de cada uma das hipóteses está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Resumo das hipóteses de cálculo 1 a 4 adotadas.

	Taxa de armadura de flexão	Contribuição da Treliça
Hipótese 1	Calculado como laje maciça	Não
Hipótese 2	Calculado como laje com vazios (Eq. 29)	Não
Hipótese 3*	Calculado como laje maciça	Sim
Hipótese 4*	Calculado como laje com vazios (Eq. 29)	Sim
*Aplicável somente às lajes de CEBALLOS (2017)		
Obs: Para todas as hipóteses foi descontada da área do perímetro os vazios interceptados por ele, conforme a Equação 28.		

3.2.2. Hipótese de cálculo 5

As hipóteses de cálculo 1 a 4, além de sofrerem grandes variações em função da posição do perímetro, necessitam de um software de desenho para verificar e quantificar os vazios interceptados pelo perímetro de controle, apresentando pouco praticidade, principalmente para uma situação de projeto.

Portanto, de modo a simplificar os cálculos e considerar o tamanho do maciço, baseado na observação que a resistência das lajes *Bubbledeck* varia proporcionalmente ao tamanho do maciço em torno do pilar, resolveu-se relacionar a redução do volume de concreto das lajes com a redução da resistência, quando comparadas com uma laje maciça de mesma altura. Para isso foi elaborado um gráfico que relaciona a relação $Vol.laje\ com\ vazios / Vol.laje\ maciça$ com a relação entre a estimativa da capacidade resistente para a laje calculada como uma laje maciça e o valor de carga última experimental, como mostram as Figuras 51 a 54.

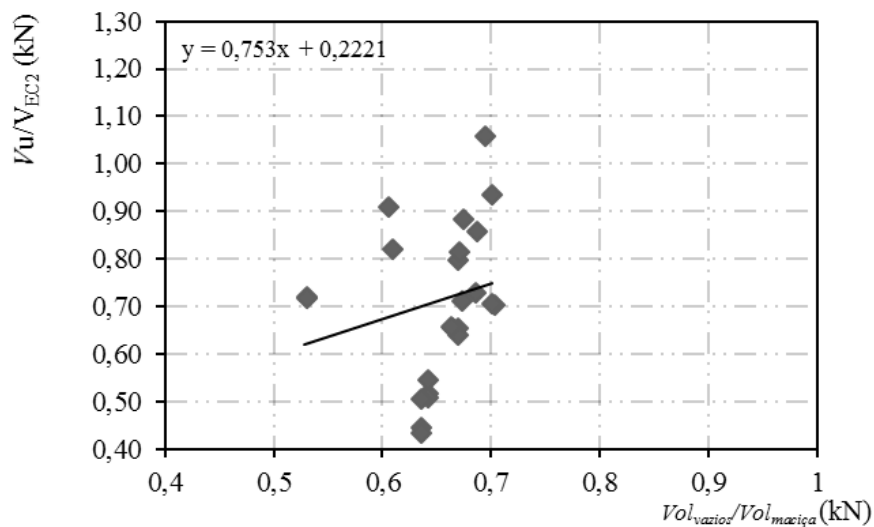


Figura 51 – Relação entre a redução de volume e a redução da capacidade resistente para a estimativa do Eurocode 2 (2014).

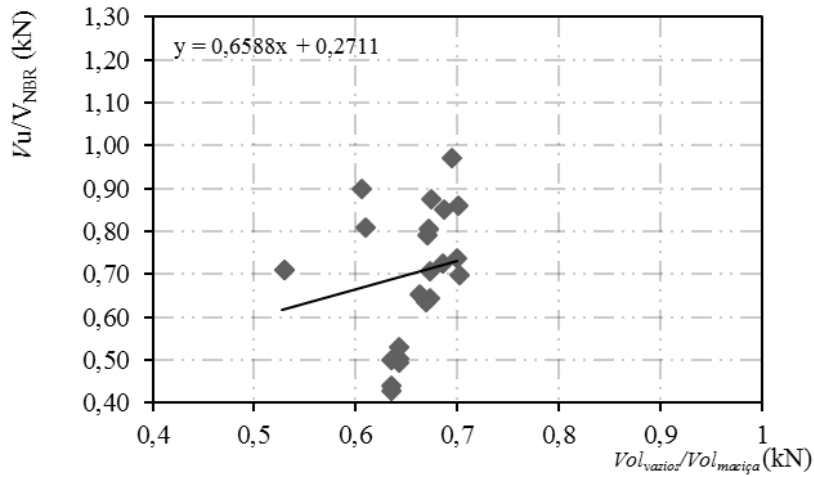


Figura 52 – Relação entre a redução de volume e a redução da capacidade resistente para a estimativa da ABNT NBR 6118 (2014).

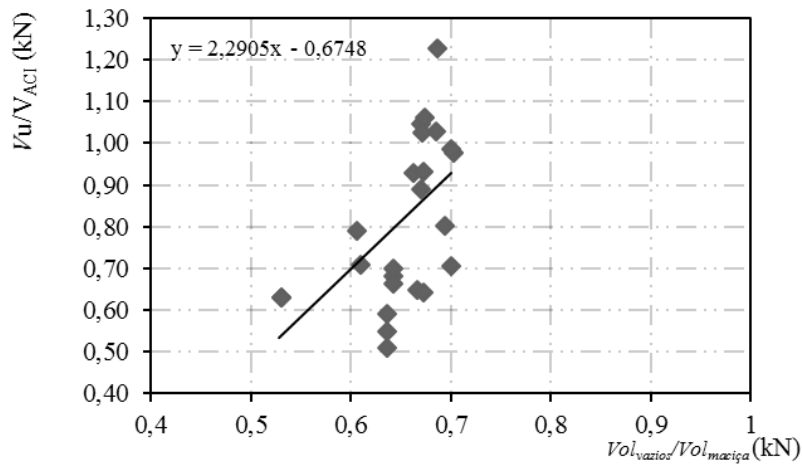


Figura 53 – Relação entre a redução de volume e a redução da capacidade resistente para a estimativa do ACI 318 (2014).

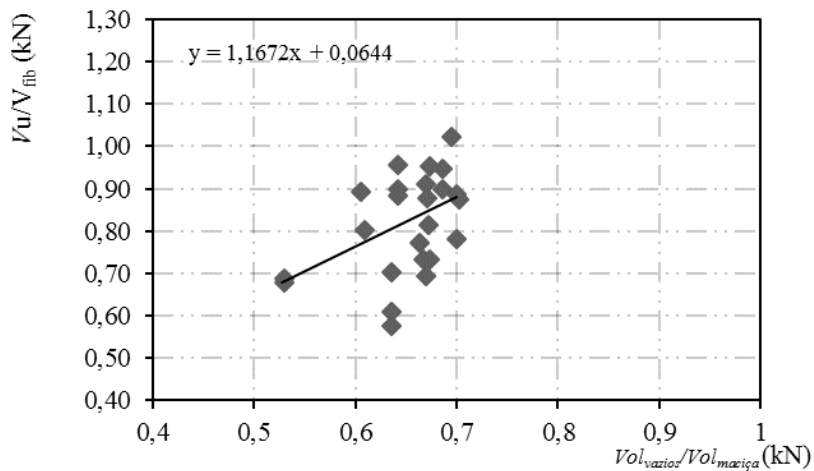


Figura 54 – Relação entre a redução de volume e a redução da capacidade resistente para a estimativa do *fib* Model Code 2010 (2013).

Portanto, com as equações das retas de tendência dos gráficos de cada recomendação normativa, obtêm-se um fator de minoração da resistência à punção em função da redução do volume de concreto, quando comparada com uma laje maciça de mesma altura. Dessa maneira, para a estimativa da resistência à punção, considerando a hipótese em questão, as lajes com vazios serão calculadas seguindo os modelos de cálculo para lajes lisas maciças e estes valores serão minorados de acordo com as equações das retas.

4. RESULTADOS

Todas as lajes do banco de dados tiveram suas capacidades resistentes à punção estimada seguindo as seis hipóteses citadas no capítulo anterior deste trabalho. Os resultados encontrados para a hipótese 1 para as normas da ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2014) e recomendação do *fib* Model Code 2010 (2013) estão apresentados nas Tabelas 10 a 13.

Tabela 10 – Resultados da hipótese de cálculo 1 para o Eurocode 2 (2014).

Laje	$V_{R,c}$ (kN)	$V_{R,s}$ (kN)	$V_{R,cs}$ (kN)	$V_{R,out}$ (kN)	$V_{R,max}$ (kN)	V_{EC2} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_R
BD28-P1	527	---	---	---	---	527	642	1,22
BD28-P2	518	---	---	---	---	518	651	1,26
BD28-P3	532	339	738	804	2200	738	697	0,94
BD1	592	415	859	1055	1999	859	817	0,95
BD2	605	444	898	1080	2115	898	833	0,93
BD3	842	417	1049	584	2091	584	995	1,70
BD4	834	440	1065	684	2186	684	846	1,24
BD - A01	584	440	878	641	1368	641	742	1,16
BD - A02	601	451	902	741	1718	741	967	1,30
BD - A03	591	455	899	761	1733	761	871	1,14
BD - A04	549	---	---	---	---	549	762	1,39
BD - A05	586	---	---	---	---	586	902	1,54
BPR1-1	630	---	---	---	---	630	600	0,95
BPR1-2	630	---	---	---	---	630	600	0,95
BPR2-1	633	---	---	---	2.003	633	776	1,23
BPR2-2	650	---	---	---	2.021	650	704	1,08
BPR3-1	410	---	---	---	1.276	410	385	0,94
BPR3-2	402	---	---	---	1.252	402	428	1,07
D1-24	437	---	---	---	---	437	520	1,19
D2-24	463	---	---	---	---	463	580	1,25
D3-24	449	---	---	---	---	449	525	1,17
D4-45	907	---	---	---	---	907	935	1,03
D5-45	988	---	---	---	---	988	990	1,00
D6-45	1009	---	---	---	---	1009	1180	1,17

Tabela 11 – Resultados da hipótese de cálculo 1 para a ABNT NBR 6118 (2014).

Laje	$V_{R,c}$ (kN)	$V_{R,s}$ (kN)	$V_{R,cs}$ (kN)	$V_{R,out}$ (kN)	$V_{R,max}$ (kN)	V_{NBR} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_R
BD28-P1	533	---	---	---	2923	533	642	1,20
BD28-P2	524	---	---	---	2970	524	651	1,24
BD28-P3	538	339	697	774	2970	697	697	1,00
BD1	598	415	824	873	2698	824	817	0,99
BD2	612	444	860	1106	2855	860	833	0,97
BD3	852	417	965	901	2823	901	995	1,10
BD4	843	440	983	763	2951	763	846	1,11
BD - A01	590	440	957	938	1847	938	742	0,79
BD - A02	607	451	980	1107	2320	980	967	0,99
BD - A03	597	455	979	1146	2339	979	871	0,89
BD - A04	555	---	---	---	---	555	762	1,37
BD - A05	593	---	---	---	---	593	902	1,52
BPR1-1	637	---	---	---	---	637	600	0,94
BPR1-2	637	---	---	---	---	637	600	0,94
BPR2-1	640	---	---	---	2704	640	776,33	1,21
BPR2-2	657	---	---	---	2729	657	704,46	1,07
BPR3-1	444	---	---	---	1722	444	385,43	0,87
BPR3-2	438	---	---	---	1690	438	428,13	0,98
D1-24	448	---	---	---	---	448	520	1,16
D2-24	474	---	---	---	---	474	580	1,22
D3-24	460	---	---	---	---	460	525	1,14
D4-45	917	---	---	---	---	917	935	1,02
D5-45	999	---	---	---	---	999	990	0,99
D6-45	1020	---	---	---	---	1020	1180	1,16

Tabela 12 – Resultados da hipótese de cálculo 1 para o ACI 318 (2014).

Laje	V_{c1} (kN)	V_{c2} (kN)	V_{c3} (kN)	$V_{R,cs}$ (kN)	V_{out} (kN)	$V_{R,max}$ (kN)	V_{ACI} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_R
BD28-P1	983	1900	1504	---	---	---	983	642	0,65
BD28-P2	1006	1957	1539	---	---	---	1006	651	0,65
BD28-P3	1006	1957	1539	777	771	1509	771	697	0,90
BD1	912	1742	1396	791	786	1368	786	817	1,04
BD2	990	1935	1515	849	850	1485	849	833	0,98
BD3	942	1803	1441	807	802	1413	802	995	1,24
BD4	1005	1958	1538	854	863	1507	854	846	0,99
BD - A01	713	1351	1091	882	596	1412	596	742	1,24
BD - A02	831	1587	1271	977	690	1644	690	967	1,40
BD - A03	840	1611	1286	987	696	1664	696	871	1,25
BD - A04	740	1415	1132	---	---	---	740	762	1,03
BD - A05	846	1623	1294	---	---	---	846	902	1,07
BPR1-1	495	741	757	---	---	---	495	600	1,21
BPR1-2	496	743	759	---	---	---	496	600	1,21
BPR2-1	931	1390	1424	---	---	---	931	776	0,83
BPR2-2	940	1408	1438	---	---	---	940	704	0,75
BPR3-1	542	680	829	---	---	---	542	385	0,71
BPR3-2	529	658	809	---	---	---	529	428	0,81
D1-24	493	722	754	---	---	---	493	520	1,05
D2-24	538	787	823	---	---	---	538	580	1,08
D3-24	513	750	784	---	---	---	513	525	1,02
D4-45	972	1836	1487	---	---	---	972	935	0,96
D5-45	1104	2087	1690	---	---	---	1104	990	0,90
D6-45	1139	2153	1743	---	---	---	1139	1180	1,04

Tabela 13 – Resultados da hipótese de cálculo 1 para o *fib* Model Code 2010 (2013).

Laje	$V_{R,c}$ Level III	$V_{R,s}$ Level III	$V_{R,cs}$ Level III	$V_{R,out}$ Level III	$V_{R,máx}$ Level III	$V_{R, MC2010}$ Level III	V_u (kN)	$V_u/V_{calc.}$ Level III
BD28-P1	869	---	---	---	1153	869	642	0,74
BD28-P2	882	---	---	---	1168	882	651	0,74
BD28-P3	793	202	995	1168	1168	982	697	0,71
BD1	759	144	903	1093	1093	903	817,2	0,91
BD2	800	143	944	1145	1145	944	832,5	0,88
BD3	688	356	1044	1112	1112	869	994,6	1,14
BD4	722	351	1073	1153	1153	916	845,6	0,92
BD - A01	772	182	954	1170	1170	954	742	0,78
BD - A02	852	202	1054	1282	1282	1054	967	0,92
BD - A03	860	202	1061	1292	1292	1061	871	0,82
BD - A04	861	---	---	---	1197	861	762	0,89
BD - A05	941	---	---	---	1296	941	902	0,96
BPR1-1	595	---	---	---	1187	595	595	1,01
BPR1-2	589	---	---	---	1168	589	589	1,02
BPR2-1	864	---	---	---	1162	864	864	0,90
BPR2-2	872	---	---	---	1171	872	872	0,81
BPR3-1	432	---	---	---	571	432	432	0,89
BPR3-2	417	---	---	---	549	417	417	1,03
D1-24	447	---	---	---	757	447	447	1,16
D2-24	471	---	---	---	790	471	471	1,23
D3-24	460	---	---	---	777	460	460	1,14
D4-45	1111	---	---	---	2194	1111	1111	0,84
D5-45	1140	---	---	---	2159	1140	1140	0,87
D6-45	1177	---	---	---	2230	1177	1177	1,00

Para essa hipótese de cálculo, de uma maneira geral para as normas da NBR e EC2, pode-se afirmar que os resultados encontrados estão numa margem de segurança aceitável. Porém o mesmo não se pode afirmar para as normas do ACI e MC2010, que apresentaram mais da metade de seus resultados contra a segurança.

Os resultados encontrados para a hipótese de cálculo 2 estão apresentados nas Tabelas 14 a 16. A única diferença desta hipótese para a primeira é a formulação para o cálculo da taxa de armadura de flexão, portanto, como o ACI não leva em consideração a taxa de armadura em seu modelo de cálculo, os resultados serão iguais aos da hipótese 1.

Tabela 14 – Resultados da hipótese de cálculo 2 para o Eurocode 2 (2014).

Laje	$V_{R,c}$ (kN)	$V_{R,s}$ (kN)	$V_{R,cs}$ (kN)	$V_{R,out}$ (kN)	$V_{R,max}$ (kN)	V_{EC2} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_R
BD28-P1	589	---	---	---	2165	589	642	1,09
BD28-P2	572	---	---	---	2200	572	651	1,14
BD28-P3	582	339	776	880	2200	776	697	0,90
BD1	647	415	900	1153	1999	900	817	0,91
BD2	644	444	927	1149	2115	927	833	0,90
BD3	920	417	1107	638	2091	638	995	1,56
BD4	890	440	1107	730	2186	730	846	1,16
BD - A01	644	440	923	708	1368	708	742	1,05
BD - A02	666	451	950	821	1718	821	967	1,18
BD - A03	656	455	947	845	1733	845	871	1,03
BD - A04	609	---	---	---	1403	609	762	1,25
BD - A05	651	---	---	---	1740	651	902	1,39
BPR1-1	760	---	---	---	1868	760	600	0,79
BPR1-2	761	---	---	---	1870	761	600	0,79
BPR2-1	730	---	---	---	2003	730	776	1,06
BPR2-2	749	---	---	---	2021	749	704	0,94
BPR3-1	495	---	---	---	1276	495	385	0,78
BPR3-2	485	---	---	---	1252	485	428	0,88
D1-24	452	---	---	---	1725	452	520	1,15
D2-24	479	---	---	---	1984	479	580	1,21
D3-24	464	---	---	---	1839	464	525	1,13
D4-45	1002	---	---	---	2374	1002	935	0,93
D5-45	1091	---	---	---	2972	1091	990	0,91
D6-45	1114	---	---	---	3135	1114	1180	1,06

Tabela 15 – Resultados da hipótese de cálculo 2 para a ABNT NBR 6118 (2014).

Laje	$V_{R,c}$ (kN)	$V_{R,s}$ (kN)	$V_{R,cs}$ (kN)	$V_{R,out}$ (kN)	$V_{R,max}$ (kN)	V_{NBR} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_R
BD28-P1	595	---	---	---	2923	595	642	1,08
BD28-P2	578	---	---	---	2970	578	651	1,13
BD28-P3	589	339	725	847	2970	725	697	0,96
BD1	654	415	855	955	2698	855	817	0,96
BD2	651	444	882	1176	2855	882	833	0,94
BD3	930	417	1008	984	2823	984	995	1,01
BD4	900	440	1014	814	2951	814	846	1,04
BD - A01	651	440	990	1036	1847	990	742	0,75
BD - A02	673	451	1016	1226	2320	1016	967	0,95
BD - A03	663	455	1015	1272	2339	1015	871	0,86
BD - A04	616	---	---	---	1894	616	762	1,24
BD - A05	658	---	---	---	2349	658	902	1,37
BPR1-1	769	---	---	---	2522	769	600	0,78
BPR1-2	769	---	---	---	2524	769	600	0,78
BPR2-1	738	---	---	---	2704	738	776	1,05
BPR2-2	757	---	---	---	2729	757	704	0,93
BPR3-1	536	---	---	---	1722	536	385	0,72
BPR3-2	528	---	---	---	1690	528	428	0,81
D1-24	463	---	---	---	2329	463	520	1,12
D2-24	491	---	---	---	2678	491	580	1,18
D3-24	475	---	---	---	2482	475	525	1,10
D4-45	1013	---	---	---	3205	1013	935	0,92
D5-45	1103	---	---	---	4012	1103	990	0,90
D6-45	1126	---	---	---	4232	1126	1180	1,05

Tabela 16 – Resultados da hipótese de cálculo 2 para o *fib* Model Code 2010 (2013).

Laje	$V_{R,c}$ Level III	$V_{R,s}$ Level III	$V_{R,cs}$ Level III	$V_{R,out}$ Level III	$V_{R,máx}$ Level III	V_R , MC2010 Level III	V_u (kN)	V_u/V_{calc} . Level III
BD28-P1	1000	---	---	---	1354	642	642	0,64
BD28-P2	1001	---	---	---	1351	651	651	0,65
BD28-P3	926	154	1080	1115	1335	697	697	0,65
BD1	874	112	985	1261	1244	817	817,2	0,83
BD2	885	121	1005	1263	1255	833	832,5	0,83
BD3	831	259	1091	981	1265	995	994,6	1,01
BD4	832	278	1110	1003	1270	846	845,6	0,84
BD - A01	879	134	1013	1171	1321	742	742	0,73
BD - A02	984	146	1130	1296	1464	967	967	0,86
BD - A03	995	146	1140	1307	1479	871	871	0,76
BD - A04	954	---	---	---	1361	762	762	0,80
BD - A05	1052	---	---	---	1486	902	902	0,86
BPR1-1	602	---	---	---	1207	602	595	1,00
BPR1-2	603	---	---	---	1208	603	589	0,99
BPR2-1	860	---	---	---	1156	860	864	0,90
BPR2-2	868	---	---	---	1165	868	872	0,81
BPR3-1	420	---	---	---	553	420	432	0,92
BPR3-2	412	---	---	---	543	412	417	1,04
D1-24	691	---	---	---	1398	691	447	0,75
D2-24	743	---	---	---	1487	743	471	0,78
D3-24	714	---	---	---	1438	714	460	0,74
D4-45	1417	---	---	---	3347	1417	1111	0,66
D5-45	1586	---	---	---	3682	1586	1140	0,62
D6-45	1629	---	---	---	3766	1629	1177	0,72

Comparando os resultados da hipótese de cálculo 2 com a primeira hipótese, pode-se afirmar que, de uma maneira geral, a consideração dos vazios da laje no cálculo da taxa de armadura tende a deixar os resultados das normas da NBR e EC2 menos conservadores, porém o oposto acontece para as previsões do MC2010.

A hipótese de cálculo 3 leva em consideração a contribuição da treliça usada como armadura de cisalhamento nas nervuras das lajes. Portanto, essa hipótese é aplicada somente para as lajes BD-A02, BD-A03, BD-A04, BD-A05 de CEBALLOS (2017). As Tabelas 17 e 18 apresentam os resultados encontrados para essa hipótese para as normas da ABNT NBR 6118 (2014), Eurocode 2 (2014). Ressalta-se que para a norma do ACI 318 (2014) e recomendação

do *fib* Model Code 2010 (2013) esta hipótese de cálculo não foi considerada, pois o perímetro de controle de ambas não intercepta a região armada das nervuras.

Tabela 17 – Resultados da hipótese de cálculo 3 para o Eurocode 2 (2014).

Laje	$V_{R,c}$ (kN)	$V_{R,s}$ (kN)	$V_{R,s\ treliça}$ (kN)	$V_{R,cs}$ (kN)	$V_{R,out}$ (kN)	$V_{R,cs\ out}$ (kN)	$V_{R,max}$ (kN)	V_{EC2} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_R
BD - A02	601	451	242	1023	741	879	1718	879	967	1,10
BD - A03	591	455	115	956	761	762	1733	762	871	1,14
BD - A04	549	---	243	534	---	---	1403	534	762	1,43
BD - A05	586	---	115	497	---	---	1740	497	902	1,81

Tabela 18 – Resultados da hipótese de cálculo 3 para a ABNT NBR 6118 (2014).

Laje	$V_{R,c}$ (kN)	$V_{R,s}$ (kN)	$V_{R,s\ treliça}$ (kN)	$V_{R,cs}$ (kN)	$V_{R,out}$ (kN)	$V_{R,cs\ out}$ (kN)	$V_{R,max}$ (kN)	V_{NBR} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_R
BD - A02	607	451	242	1088	1107	1177	2320	1088	967	0,89
BD - A03	597	455	115	990	1146	1150	2339	990	871	0,88
BD - A04	555	---	243	599	---	---	1894	599	762	1,27
BD - A05	593	---	115	531	---	---	2349	531	902	1,70

Para esta hipótese de cálculo, verifica-se que os resultados estimados para as lajes com armadura de cisalhamento na região maciça (BD – A02 e BD – A03) encontram-se numa faixa aceitável de segurança, enquanto que para as lajes sem a presença destas armaduras na região maciça encontram-se bastante conservadores. Porém, devido ao número insuficiente de lajes ensaiadas com essas características, não se pode afirmar se essa adaptação é suficiente para uma estimativa razoável da capacidade resistente à punção de lajes com vazios com armaduras de cisalhamento na região das nervuras.

Os resultados encontrados para a hipótese de cálculo 4 estão apresentados nas Tabelas 19 e 20. A única diferença desta hipótese para a hipótese de cálculo 3 é a formulação para o cálculo da taxa de armadura de flexão, portanto esta hipótese de cálculo não foi considerada para a norma do ACI 318 (2014) e recomendação do *fib* Model Code 2010 (2013) pela mesma razão da hipótese 3.

Tabela 19 – Resultados da hipótese de cálculo 4 para o Eurocode 2 (2014).

Laje	$V_{R,c}$ (kN)	$V_{R,s}$ (kN)	$V_{R,s}$ treliça (kN)	$V_{R,cs}$ (kN)	$V_{R,out}$ (kN)	$V_{R,s}$ treliça out (kN)	$V_{R,cs out}$ (kN)	$V_{R,max}$ (kN)	V_{EC2} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_R
BD - A02	666	451	242	1071	821	646	939	1718	939	967	1,03
BD - A03	656	455	115	1005	845	306	846	1733	846	871	1,03
BD - A04	609	---	243	578	---	---	---	1403	578	762	1,32
BD - A05	651	---	115	546	---	---	---	1740	546	902	1,65

Tabela 20 – Resultados da hipótese de cálculo 4 para a ABNT NBR 6118 (2014).

Laje	$V_{R,c}$ (kN)	$V_{R,s}$ (kN)	$V_{R,s}$ treliça (kN)	$V_{R,cs}$ (kN)	$V_{R,out}$ (kN)	$V_{R,s}$ treliça out (kN)	$V_{R,cs out}$ (kN)	$V_{R,max}$ (kN)	V_{NBR} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_R
BD - A02	673	451	242	1137	1226	694	1267	2320	1137	967	0,85
BD - A03	663	455	115	1039	1272	328	1245	2339	1039	871	0,84
BD - A04	616	---	243	644	---	---	---	1894	644	762	1,18
BD - A05	658	---	115	580	---	---	---	2349	580	902	1,55

Ao comparar as estimativas de resistência à punção da hipótese de cálculo 4 com as da hipótese 3, verifica-se que a consideração dos vazios da laje no cálculo da taxa de armadura de flexão tornou os resultados menos dispersos. Porém, assim como na hipótese anterior, devido ao número insuficiente de lajes ensaiadas com essas características, não se pode afirmar que esta adaptação é suficiente para este caso.

Os resultados encontrados para a hipótese de cálculo 5 para as normas da ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2014) e recomendação do *fib* Model Code 2010 (2013) estão apresentados nas Tabelas 21 a 24.

Tabela 21 – Resultados da hipótese de cálculo 5 para o Eurocode 2 (2014).

Lajes	$\frac{Vol_{\text{vazios}}}{Vol_{\text{maciça}}}$	$V_{\text{vazios}}/V_{\text{maciça}}$	$V_{\text{maciça EC2}}$ (kN)	V_{EC2} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_R
BD28-P1	0,66	0,72	974	702	642	0,92
BD28-P2	0,67	0,72	989	716	651	0,91
BD28-P3	0,67	0,72	1081	783	697	0,89
BD1	0,68	0,74	1111	818	817	1,00
BD2	0,70	0,75	1175	881	833	0,95
BD3	0,68	0,74	1151	849	995	1,17
BD4	0,70	0,75	1190	890	846	0,95
BD - A01	0,66	0,72	1120	806	742	0,92
BD - A02	0,67	0,72	1203	872	967	1,11
BD - A03	0,67	0,73	1213	881	871	0,99
BD - A04	0,67	0,73	928	673	762	1,13
BD - A05	0,67	0,73	1014	738	902	1,22
BPR1-1	0,53	0,62	828	513	600	1,17
BPR1-2	0,53	0,62	829	514	600	1,17
BPR2-1	0,60	0,68	848	573	776	1,35
BPR2-2	0,61	0,68	854	580	704	1,21
BPR3-1	0,70	0,75	410	306	385	1,26
BPR3-2	0,69	0,74	402	299	428	1,43
D1-24	0,64	0,70	996	701	520	0,74
D2-24	0,64	0,70	1055	743	580	0,78
D3-24	0,64	0,70	1022	720	525	0,73
D4-45	0,63	0,70	2074	1450	935	0,65
D5-45	0,63	0,70	2259	1579	990	0,63
D6-45	0,63	0,70	2307	1612	1180	0,73

Tabela 22 – Resultados da hipótese de cálculo 5 para a ABNT NBR 6118 (2014).

Lajes	$\frac{Vol_{\text{vazios}}}{Vol_{\text{maciça}}}$	$V_{\text{vazios}}/V_{\text{maciça}}$	$V_{\text{maciça NBR}}$ (kN)	V_{NBR} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_R
BD28-P1	0,66	0,71	985	698	642	0,92
BD28-P2	0,67	0,71	1000	713	651	0,91
BD28-P3	0,67	0,71	1089	774	697	0,90
BD1	0,68	0,72	1119	807	817	1,01
BD2	0,70	0,73	1183	867	833	0,96
BD3	0,68	0,72	1159	837	995	1,19
BD4	0,70	0,73	1140	833	846	1,02
BD - A01	0,66	0,71	1127	796	742	0,93
BD - A02	0,67	0,71	1211	861	967	1,12
BD - A03	0,67	0,71	1221	870	871	1,00
BD - A04	0,67	0,71	938	668	762	1,14
BD - A05	0,67	0,71	1025	731	902	1,23
BPR1-1	0,53	0,62	838	518	600	1,16
BPR1-2	0,53	0,62	838	519	600	1,16
BPR2-1	0,60	0,67	857	573	776	1,35
BPR2-2	0,61	0,67	864	579	704	1,22
BPR3-1	0,70	0,73	444	325	385	1,19
BPR3-2	0,69	0,73	438	318	428	1,35
D1-24	0,64	0,69	1020	707	520	0,74
D2-24	0,64	0,69	1081	749	580	0,77
D3-24	0,64	0,69	1047	725	525	0,72
D4-45	0,63	0,69	2097	1443	935	0,65
D5-45	0,63	0,69	2284	1572	990	0,63
D6-45	0,63	0,69	2332	1605	1180	0,74

Tabela 23 – Resultados da hipótese de cálculo 5 para o ACI 318 (2014).

Lajes	$\frac{Vol_{\text{vazios}}}{Vol_{\text{maciça}}}$	$V_{\text{vazios}}/V_{\text{maciça}}$	$V_{\text{maciça}}_{\text{ACI}}$ (kN)	V_{ACI} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_R
BD28-P1	0,66	0,85	983	832	642	0,77
BD28-P2	0,67	0,86	1006	867	651	0,75
BD28-P3	0,67	0,85	777	663	697	1,05
BD1	0,68	0,89	791	704	817	1,16
BD2	0,70	0,93	848	787	833	1,06
BD3	0,68	0,89	806	719	995	1,38
BD4	0,70	0,92	853	787	846	1,07
BD - A01	0,66	0,84	794	665	742	1,12
BD - A02	0,67	0,85	920	785	967	1,23
BD - A03	0,67	0,86	930	800	871	1,09
BD - A04	0,67	0,86	740	634	762	1,20
BD - A05	0,67	0,86	846	730	902	1,24
BPR1-1	0,53	0,53	942	502	600	1,19
BPR1-2	0,53	0,53	943	504	600	1,19
BPR2-1	0,60	0,71	974	689	776	1,13
BPR2-2	0,61	0,72	986	706	704	1,00
BPR3-1	0,70	0,92	542	501	385	0,77
BPR3-2	0,69	0,91	529	481	428	0,89
D1-24	0,64	0,79	755	597	520	0,87
D2-24	0,64	0,79	823	651	580	0,89
D3-24	0,64	0,79	785	621	525	0,85
D4-45	0,63	0,78	1688	1309	935	0,71
D5-45	0,63	0,78	1918	1487	990	0,67
D6-45	0,63	0,78	1979	1534	1180	0,77

Tabela 24 – Resultados da hipótese de cálculo 5 para o *fib* Model Code 2010 (2013).

Lajes	$\frac{Vol_{\text{vazios}}}{Vol_{\text{maciça}}}$	$V_{\text{vazios}}/V_{\text{maciça}}$	$V_{\text{maciça}}$ MC2010 (kN)	V_{MC2010} (kN)	V_u (kN)	V_u/V_R
BD28-P1	0,66	0,84	869	730	642	0,88
BD28-P2	0,67	0,85	882	747	651	0,87
BD28-P3	0,67	0,84	995	839	697	0,83
BD1	0,68	0,86	903	778	817	1,05
BD2	0,70	0,88	944	832	833	1,00
BD3	0,68	0,86	1044	901	995	1,10
BD4	0,70	0,88	1073	943	846	0,90
BD - A01	0,66	0,84	954	797	742	0,93
BD - A02	0,67	0,84	1054	889	967	1,09
BD - A03	0,67	0,85	1061	899	871	0,97
BD - A04	0,67	0,84	861	728	762	1,05
BD - A05	0,67	0,85	941	798	902	1,13
BPR1-1	0,53	0,68	876	596	600	1,01
BPR1-2	0,53	0,68	865	588	600	1,02
BPR2-1	0,60	0,77	864	664	776	1,17
BPR2-2	0,61	0,77	872	674	704	1,05
BPR3-1	0,70	0,88	432	380	385	1,01
BPR3-2	0,69	0,87	417	363	428	1,18
D1-24	0,64	0,81	575	466	520	1,12
D2-24	0,64	0,81	603	489	580	1,19
D3-24	0,64	0,81	591	479	525	1,10
D4-45	0,63	0,80	1603	1288	935	0,73
D5-45	0,63	0,80	1610	1294	990	0,77
D6-45	0,63	0,80	1663	1336	1180	0,88

Para a hipótese de cálculo 5, de uma maneira geral para todas as recomendações normativas, as estimativas encontradas foram a favor da segurança, com exceção das lajes com a ausência de uma região maciça próxima aos pilares, que apresentaram boa parte de suas estimativas contra a segurança.

Devido as muitas variáveis presentes nas lajes do banco de dados e a inviabilidade de comparar todos os resultados, optou-se por dividir as lajes em três grupos de comparação, de modo a obter um grupo de lajes com características mais similares, sendo estes: lajes sem a presença de uma região maciça, lajes com armadura de cisalhamento e lajes com presença de maciço sem armadura de cisalhamento. As Tabelas 25 a 27 apresentam as lajes que compõe cada um desses grupos.

Tabela 25 – Grupo 1: Lajes sem a presença de uma região maciça

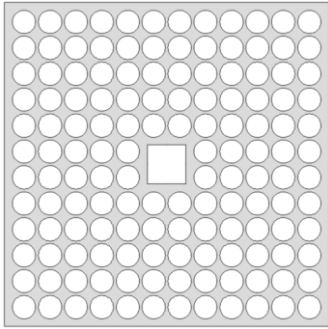
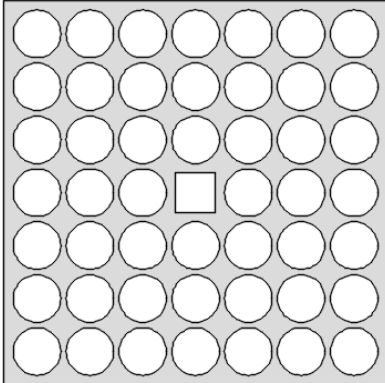
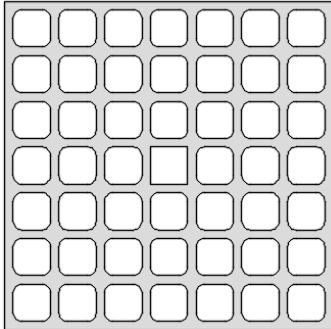
Held (2002)						Valivonis (2017)	
D1-24	D2-24	D3-24	D4-45	D5-45	D6-45	BPR1-1	BPR1-2
							
<p>Em comum: dimensões dos pilares, ausência de uma região maciça próxima ao pilar, ausência de armadura de cisalhamento, resistência à compressão do concreto.</p> <p>Variáveis: taxa de armadura de flexão, dimensões dos vazios, altura útil.</p>							

Tabela 26 – Grupo 2: Lajes sem a presença de armadura de cisalhamento na região maciça.

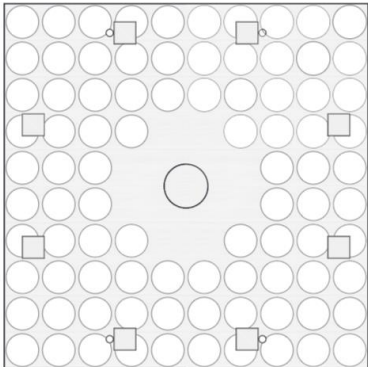
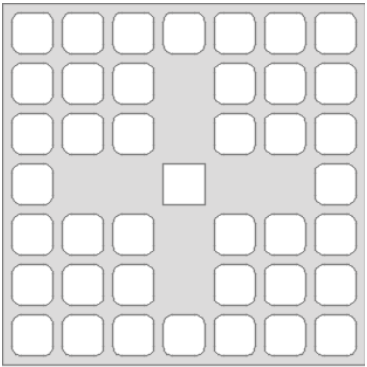
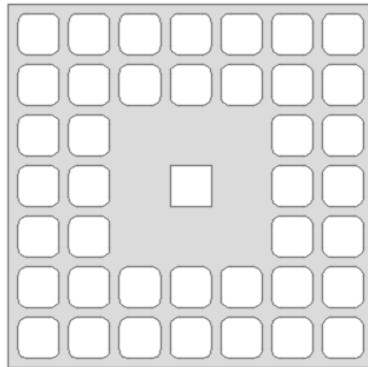
Nicácio (2018)		Valivonis (2017)			
BD28-P1	BD28-P2	BPR2-1	BPR2-2	BPR3-1	BPR3-2
					
<p>Em comum: dimensões dos pilares, presença de uma região maciça próxima ao pilar, taxa de armadura de flexão, resistência à compressão do concreto.</p> <p>Variáveis: dimensões dos vazios, altura útil e forma do maciço.</p>					

Tabela 27 – Grupo 3: Lajes com a presença de armadura de cisalhamento na região maciça.

Nicácio (2018)				
BD28-P3	BD1	BD2	BD3	BD4
Ceballos (2017)				
BD-A01	BD-A02	BD-A03		
<p>Em comum: dimensões dos pilares, presença de uma região maciça próxima ao pilar, taxa de armadura de flexão, resistência à compressão do concreto, presença de armadura de cisalhamento na região maciça da laje, altura útil.</p> <p>Variáveis: forma do maciço, distribuição das armaduras de cisalhamento na região maciça, presença de armadura de cisalhamento na região das nervuras.</p>				

Dessa maneira, foram calculados os valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação para cada um dos grupos, de forma a conseguir analisar de uma forma mais direta se os resultados encontrados foram a favor ou contra a segurança e, além disso, se apresentaram um grande nível de dispersão. Os resultados encontrados para cada hipótese de cálculos para cada um dos grupos de comparação estão apresentados nas Tabelas 28 a 30.

Tabela 28 – Resumo das hipóteses de cálculo para o Grupo 1.

Hip. de cálculo	EC2	NBR	ACI	MC2010
Hipótese 1	méd =1,10 d.p. = 0,12 c.v. = 0,11	méd =1,08 d.p. = 0,11 c.v. = 0,10	méd =1,05 d.p. = 0,11 c.v. = 0,10	méd =1,02 d.p. = 0,14 c.v. = 0,14
Hipótese 2	méd =1,00 d.p. = 0,16 c.v. = 0,17	méd =0,99 d.p. = 0,16 c.v. = 0,16	---	méd =0,75 d.p. = 0,14 c.v. = 0,19
Hipótese 5	méd =0,74 d.p. = 0,22 c.v. = 0,30	méd =0,74 d.p. = 0,21 c.v. = 0,29	méd =0,86 d.p. = 0,20 c.v. = 0,23	méd =1,02 d.p. = 0,17 c.v. = 0,17

Tabela 29 - Resumo das hipóteses de cálculo para o Grupo 2.

Hip. de cálculo	EC2	NBR	ACI	MC2010
Hipótese 1	méd =1,15 d.p. = 0,12 c.v. = 0,11	méd =1,14 d.p. = 0,15 c.v. = 0,13	méd = 0,73 d.p. = 0,08 c.v. = 0,11	méd = 0,85 d.p. = 0,11 c.v. = 0,13
Hipótese 2	méd =1,00 d.p. = 0,14 c.v. = 0,14	méd =0,99 d.p. = 0,16 c.v. = 0,16	---	méd =0,86 d.p. = 0,16 c.v. = 0,19
Hipótese 5	méd =1,24 d.p. = 0,22 c.v. = 0,18	méd =1,20 d.p. = 0,20 c.v. = 0,16	méd =0,83 d.p. = 0,15 c.v. = 0,18	méd =1,03 d.p. = 0,13 c.v. = 0,13

Tabela 30 - Resumo das hipóteses de cálculo para o Grupo 3.

Hip. de cálculo	EC2	NBR	ACI	MC2010
Hipótese 1	méd =1,15 d.p. = 0,26 c.v. = 0,22	méd =0,99 d.p. = 0,10 c.v. = 0,11	méd =1,14 d.p. = 0,18 c.v. = 0,15	méd =0,90 d.p. = 0,13 c.v. = 0,14
Hipótese 2	méd =1,04 d.p. = 0,22 c.v. = 0,21	méd =0,95 d.p. = 0,09 c.v. = 0,10	---	méd =0,83 d.p. = 0,11 c.v. = 0,13
Hipótese 5	méd =0,97 d.p. = 0,10 c.v. = 0,10	méd =1,01 d.p. = 0,10 c.v. = 0,10	méd =1,10 d.p. = 0,11 c.v. = 0,10	méd = 0,99 d.p. = 0,10 c.v. = 0,10

Em relação as hipóteses de cálculo 1 e 2, pode-se afirmar que os resultados estimados para todas as normas foram satisfatórios, apresentando médias a favor da segurança e dispersões

dos resultados dentro de um nível aceitável, com exceção da estimativa do ACI e MC2010 para as lajes que compõem o Grupo 2, apresentando resultados contra a segurança. Isso pode ser explicado pelo fato de os perímetros de controle destas recomendações normativas para lajes sem armadura de cisalhamento se encontrarem na região maciça da laje. Logo, o resultado encontrado foi o mesmo que o obtido para a laje maciça, o que não representa o comportamento real da laje com vazios.

Já para a hipótese de cálculo 5, os resultados encontrados foram majoritariamente contra a segurança e apresentaram grandes variações dos resultados. Isso pode ser explicado devido ao grande número de variáveis das lajes do banco de dados, visto que esta hipótese é uma análise direta dos resultados experimentais. Portanto, para que esta hipótese realmente possa ter uma margem de segurança para as estimativas de resistência à punção de lajes com vazios, deve-se ter um banco de dados mais extenso.

Comparando os resultados encontrados para a NBR e EC2 para as estimativas de resistência do Grupo 3 (lajes com armadura de cisalhamento na região maciça), observa-se que a diferença do desvio padrão destas duas normas mostra a sensibilidade da adaptação do modelo de cálculo em relação a posição do perímetro de controle, pois, como estas normas são análogas, a diferença significativa entre elas é justamente o afastamento do perímetro u_{out} .

Para os Grupos 1 e 2, cuja diferença é a presença do maciço, pode-se observar que para as normas da NBR e EC2 o coeficiente de variação dos resultados é praticamente igual, porém a média fica melhor representada para o Grupo 1. Portanto, pode-se concluir que a adaptação de subtração de áreas do perímetro de controle resulta em um resultado um pouco mais conservador para as lajes que tem uma região maciça próxima ao pilar.

5. CONCLUSÕES

As normas ABNT NBR 6118 (2014), Eurocode 2 e suas correções AC Eurocode 2 (2010) e BS Eurocode 2 (2014), ACI 318 (2014) e fib Model Code 2010 (2013) não preveem verificação de lajes lisas com vazios em seus modelos de cálculo adotados e por isso neste trabalho foram realizadas adaptações a este modelo, a fim de atender este tipo de laje. Com base nos dados experimentais e a análise realizada, pode-se afirmar que as hipóteses de cálculo 1 e 2 apresentaram resultados satisfatórios para a estimativa de resistência à punção de lajes com vazios. Comparando estas duas hipóteses, pode-se concluir que a consideração dos vazios no cálculo da taxa de armadura de flexão (hipótese 2) torna os resultados, de uma maneira geral, menos conservadores, porém a dispersão dos resultados aumenta.

A hipótese de cálculo 5, quando comparada as hipóteses 1 e 2, apresentou as piores médias e resultados mais dispersos, com exceção das estimativas para as lajes com armadura de cisalhamento na região maciça (Grupo 3). Isso pode ser explicado devido ao fato desta hipótese ser baseada diretamente nos resultados experimentais, portanto, como esse grupo apresenta um maior número de parâmetros similares, a estimativa deste grupo fica melhor representada que os demais. Para que esta hipótese apresente resultados menos dispersos, é necessário que haja um banco dados maior, a fim de conseguir descrever de uma maneira mais segura o comportamento experimental das lajes com vazios.

Já para a norma do ACI 318 (2014) e a recomendação do *fib* Model Code 2010 (2013) os resultados encontrados para as lajes com a presença de uma região maciça e ausência de armadura de cisalhamento não foram satisfatórios, pois o perímetro de controle intercepta apenas a região maciça da laje, tornando os resultados contra a segurança. Sendo assim, para estes tipos de laje em questão, é necessário que outra adaptação seja feita para adequar este modelo de cálculo.

Ressalta-se que, embora as estimativas obtidas através das adaptações foram satisfatórias, elas não devem ser generalizadas, pois o número de lajes presentes no banco de dados é insuficiente para tal análise, além de apresentarem uma grande variabilidade dos parâmetros experimentais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318 – *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-11) and Commentary*. Farmington Hills, EUA, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – *Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.

BUBBLEDECK BRASIL, disponível em <<http://www.bubbledeck.com.br/site>>. Acesso em: agosto de 2017.

BUBBLEDECK INTERNATIONAL, disponível em <<http://www.bubbledeck.com>>. Acesso em: agosto de 2017.

CEBALLOS, M. A. *Análise Experimental à Punção em Lajes Tipo Bubbledeck com Armadura de Cisalhamento*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.DM – 014 A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2016. 124p.

Comité Euro-International du Béton. *CEB-FIP Model Code 1990. Design Code*. Thomas Telford. Londres, Inglaterra, 1993.

EUROPEAN STANDARD. EUROCODE 2: *Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. European Committee for Standardization. Brussels, Belgium, 2004, 225 p.

FERREIRA, M. P. *Punção em Lajes Lisas de Concreto Armado com Armaduras de Cisalhamento e Momentos Desbalanceados*. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.TD – 007 A/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2010. 275p.

GUANDALINI, S., *Poinçonnement Symetrique des Dalles en Beton Arme*. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2006, 257 p.

HAI et al., *The Experimental Analysis of Bubbledeck Slab Using Modified Elliptical Balls*. Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers, 2013.

HELD, M. S.; PFEFFER, K. *Punching Behavior of Biaxial Hollow Slabs*. Cement & Concrete Composites Journal. n. 24. Institute for Concrete Structures and Materials, Darmstadt University of Technology, Darmstadt, Alemanha, 2002.

LEDO, M. M. *Análise Experimental à Punção de Lajes Lisas Tipo Bubbledeck com Pilar Interno*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.DM – 015 A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2016. 140p.

LIMA, H. J. N. *Análise Experimental à Punção de Lajes Lisas tipo BubbleDeck*. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.DM – 002 A/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2015. 111p.

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

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.

SAGASETA, J.; TASSINARI, L.; FERNÁNDEZ RUIZ, M.; MUTTONI, A. *Punching of flat slabs supported on rectangular columns*. Engineering Structures, v. 77, p. 17–33, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.007>>.

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, 2017.