

**RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM PAINÉIS BUBBLEDECK COM DIFERENTES  
LIGAÇÕES ENTRE SI**

**RAFAEL DE ALMEIDA SOBRAL**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF: JULHO – 2019

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

**RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM PAINÉIS BUBBLEDECK COM  
DIFERENTES LIGAÇÕES ENTRE SI**

**RAFAEL DE ALMEIDA SOBRAL**

ORIENTADOR: MARCOS HONORATO DE OLIVEIRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA / DF: JULHO-2019  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA

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

**RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM PAINÉIS BUBBLEDECK COM DIFERENTES  
LIGAÇÕES ENTRE SI**

**RAFAEL DE ALMEIDA SOBRAL**

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. Paulo Chaves de Rezende Martins, *Ph.D* (UnB)**  
(Examinador interno)

---

**Prof. Wanderley Gustavo Nicacio, *D.Sc* (IFB Campus Samambaia)**  
(Examinador externo)

BRASÍLIA/DF, 04 DE JULHO DE 2019

## FICHA CATALOGRÁFICA

SOBRAL, RAFAEL DE ALMEIDA

**Resistência à flexão em painéis Bubbledeck com diferentes ligações entre si**  
[Distrito Federal] 2019.

xxv, 44p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2019)  
Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Concreto Armado

2. Lajes com vazios

3. *Flexão*

4. Bubbledeck

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Bacharel)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOBRAL, R.A. (2019). Resistência à flexão em painéis Bubbledeck com diferentes ligações entre si. Monografia de Projeto Final II em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 45p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Rafael de Almeida Sobral

TÍTULO: Resistência à flexão em painéis Bubbledeck com diferentes ligações entre si.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil      ANO: 2019

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.

---

Rafael de Almeida Sobral

Rua 18 Sul, Lotes 9/11, Bloco A, Residencial Saint Moritz, Águas Claras.

CEP: 71.940-540 Brasília – DF – Brasil

e-mail: rafaell.sobrall@gmail.com

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelo dom da vida e pelas oportunidades concedidas à mim ao longo desses últimos 23 anos de vida.

Agradeço a minha família, especialmente a minha mãe, meu pai, minha Tia Mahina e a minha avó Rosa Maria, os quais sempre me deram todo o suporte desde o começo.

Ao professor orientador e grande amigo Marcos Honorato de Oliveira por me despertar a paixão pela engenharia, principalmente pela área de estruturas, e pela docência, sempre me oferecendo oportunidades de prática e pelas suas preciosas e duras críticas ao meu trabalho ao longo dos último 3 anos, sem contar os inúmeros conselhos de pai que foram proferidos ao longo dos últimos anos.

A professora Cládia Gurjão, a qual me apoiou desde o início no curso com toda a sua empatia e bondade, me oferecendo a primeira oportunidade de trabalhar com ciência.

Ao professor Maurício Pina, que foi parte fundamental na orientação deste trabalho.

Aos amigos Manoel Mangabeira, Patrícia Cândida, Renata Piazza, Jéssica Ribeiro, Gabriel Lanzaro, Daniel Guedes, Ellon Bernardes, Caio Senna, Danilo e Gustavo Scarparo pelos bons momento vividos e pela troca de experiências e conhecimentos ao longo desses últimos anos.

A população brasileira, pela oportunidade a mim dada de estudar em uma instituição pública de referência mundial, que o mais rápido eu possa retribuir todo esse investimento em mim a população.

Aos colegas e professores da Universidade de Brasília por todos os semestres que enfrentamos juntos.

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta resultados de ensaios em 4 de painéis Bubbledeck de concreto armado, sob carregamento estático e simétrico, com o objetivo de analisar a influência das ligações de acordo com o seu modo de montagem. Seu comportamento é descrito e discutido em termos de deslocamentos, deformações do concreto e das armaduras, ductilidade, modos e cargas de ruptura. Os resultados experimentais também são usados para avaliar as adaptações realizadas a partir das recomendações apresentadas pelas normas ABNT NBR 6118 (2014), Eurocode 2 (2004), ACI 318 (2014) e As3600 (2014). Todas as lajes romperam por flexão, ocorrendo o escoamento da armadura tracionada, e os resultados indicam que as adaptações das recomendações normativas são relativamente conservadoras, exceto para os casos dos painéis com pré-lajes.

## **ABSTRACT**

This work presents results of tests on 4 Bubbledeck panels of reinforced concrete, under static and symmetrical loading, in order to analyze the influence of the connections according to their mode of assembly. Its behavior is described and discussed in terms of displacements, deformations of concrete and reinforcement, ductility, modes and ultimate loads. The experimental results are also used to evaluate the adaptations made based on the recommendations presented by ABNT NBR 6118 (2014), Eurocode 2 (2004), ACI 318 (2014) and As3600 (2014). All the slabs failure by bending, with the yield of the reinforcement occurring, and the results indicate that the adaptations of the normative recommendations are relatively conservative, except for the panels with pre-slabs.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. MOTIVAÇÃO .....	4
1.2. JUSTIFICATIVA.....	4
1.3. OBJETIVOS.....	5
1.3.1. Objetivo Geral .....	5
1.3.2. Objetivos Específicos .....	5
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	7
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>8</b>
2.1. PESQUISAS SOBRE COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE LAJES TIPO BUBBLEDECK .....	8
2.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO.....	13
2.3. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	15
2.3.1. Taxa de armadura de flexão .....	15
2.3.2. Resistência à compressão do concreto .....	15
2.3.3. Altura útil da viga.....	15
2.3.4. Tensão de escoamento da armadura de flexão .....	15
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>16</b>
<b>4. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>17</b>
4.1. Característica das Lajes.....	17
4.2. Sistema de Ensaio e Instrumentação .....	20
4.3. Propriedades dos Materiais .....	23
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>24</b>

5.1. Deslocamentos Verticais .....	24
5.2. Deformações devidas à flexão.....	26
5.3. Cargas Últimas e modos de ruptura .....	28
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>32</b>



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 1 – Coeficientes experimentais das recomendações normativas.....	14
Tabela 2 – Características dos painéis ensaiados. ....	23
Tabela 3 – Propriedades dos materiais dos painéis. ....	23
Tabela 4 – Resultados dos painéis ensaiados. ....	29

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 1: Edifícios construídos utilizando o sistema Bubbledeck .....	2
Figura 2: Formas de execução dos painéis de Lajes Bubbledeck. ....	3
Figura 3: Acidente em edifício construído com sistema de Lajes Bubbledeck .....	3
Figura 4: Modelagem de uma laje Bubbledeck através de elementos finitos (ALI, 2014).....	12
Figura 5: Seção transversal da Laje Lisa (adaptado de Ibrahim 2013). ....	12
Figura 6: Esboço principal da laje <i>BubbleDeck</i> (adaptado de GUDMAND-HØYER, 2003) ...	8
Figura 7: Mecanismos de ruptura 1 e 2 (adaptado de GUDMAND-HØYER, 2003). ....	9
Figura 8: Mecanismo de ruptura 3a a 3c (adaptado de GUDMAND-HØYER, 2003). ....	10
Figura 9: Mecanismos de ruptura 4, 5 e 6 (adaptado de GUDMAND-HØYER, 2003). ....	11
Figura 10: Adaptação de cálculo. ....	13
Figura 11: Formas de execução dos painéis Bubbledeck. ....	19
Figura 12: Processo de execução dos espécimes. ....	20
Figura 13: Sistema de Ensaio. ....	21
Figura 14: Posição dos LVDTs. ....	22
Figura 15: Localização dos extensômetros. ....	22
Figura 16 : Comportamento carga-deslocamento dos espécimes. ....	25
Figura 17: Curva momento-curvatura .....	26
Figura 18: Deformações dos espécimes.....	27
Figura 19: Deformações reais do aço e do concreto nos painéis antes da ruptura. ....	28
Figura 20: Carga última dos painéis.....	28
Figura 21: Modos de Ruptura.....	30

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$A_s$	Área da seção transversal das barras de aço tracionadas;
$A'_s$	Área da seção transversal das barras de aço comprimidas;
$b_w$	Largura da viga;
$c$	Altura do bloco retangular de distribuição de tensões do concreto equivalente;
$d$	Distância do ponto comprimido mais extremo da viga ao centroide da armadura inferior;
$d'$	Distância do ponto comprimido mais extremo da viga ao centroide da armadura superior;
$E_c$	Módulo estático de elasticidade à compressão do concreto;
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço;
$f_c$	Resistência à compressão do concreto;
$f_{cd}$	Tensão de resistência de projeto do concreto à compressão;
$f_{ck}$	Tensão de resistência característica do concreto à compressão;
$f_{ys}$	Tensão de escoamento do aço da armadura inferior;
$f'_{ys}$	Tensão de escoamento do aço da armadura superior;
$f_s$	Tensão no aço da armadura inferior;
$f'_s$	Tensão no aço da armadura superior;
$h$	Altura total da viga;
$M_u$	Momento último experimental;
$M_R$	Momento resistente teórico;
$x$	Altura da linha neutra em relação à fibra mais comprimida;
$\alpha_1$	Fator multiplicador do $f'_c$ para determinar a intensidade de um bloco retangular de distribuição de tensões do concreto equivalente;

$\beta_1$	Razão entre a profundidade do bloco de tensões retangular equivalente e a profundidade do eixo neutro;
$\delta_g$	Fator redutor da profundidade da linha neutra para o bloco de tensões equivalente;
$\varepsilon_{ys}$	Deformação de escoamento do aço;
$\varepsilon_s$	Deformação efetiva do aço da armadura inferior;
$\varepsilon'_s$	Deformação efetiva do aço da armadura superior;
$\varepsilon_c$	Deformação no concreto;
$\varepsilon_{cu}$	Deformação última do concreto;
$\rho$	Taxa de armadura de flexão total da viga antes do reforço;
$\rho'$	Taxa de armadura de flexão da viga na parte comprimida;

## 1. INTRODUÇÃO

As lajes tipo Bubbledeck são um novo método construtivo no qual se insere esferas plásticas de poliestireno em lajes lisas de concreto armado, uniformemente espaçadas entre duas telas de aço, substituindo o concreto na região intermediária da laje. O sistema foi criado pelo engenheiro Jorge Breuning, na década de 80, no concurso do governo dinamarquês que buscava desenvolver soluções construtivas de lajes flexíveis mais econômicas, sustentáveis e aplicáveis em larga escala.

Desde sua criação, diversas obras utilizando o sistema de lajes bubbledeck já foram construídas dadas suas vantagens: não necessidade no uso de vigas, redução no consumo de concreto, economia de tempo, de logística e de custos, assim como a redução no peso próprio da estrutura. A primeira construção utilizando esse sistema construtivo foi o edifício Glostrup City Hall and Office (ver Figura 1a), outra obra de grande porte foi o prédio Millenium Tower (ver Figura 1b) com 35 pavimentos e 149 metros de altura, considerada a segunda maior construção da Holanda. No Brasil, grandes estruturas foram construídas com lajes bubbledeck, dentre elas, o edifício garagem do aeroporto do Galeão no Rio de Janeiro com 100 mil metros quadrados e o Centro Administrativo do Distrito Federal com 180 mil metros quadrados, conforme visto na Figura 1c e na Figura 1d, respectivamente.



a) Glostrup City Hall and Office



b) Millenium Tower

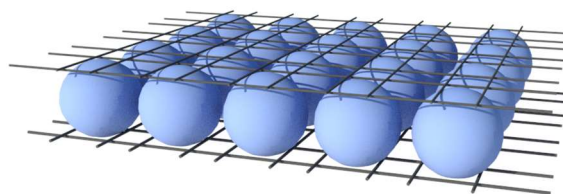


c) Sede da Oderbecht

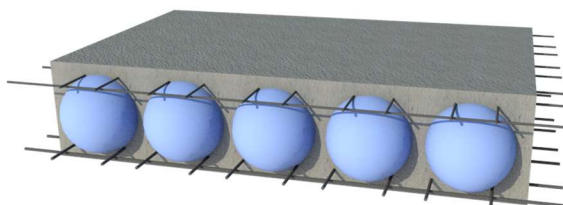
d) Centro Administrativo do DF

Figura 1: Edifícios construídos utilizando o sistema Bubbledeck

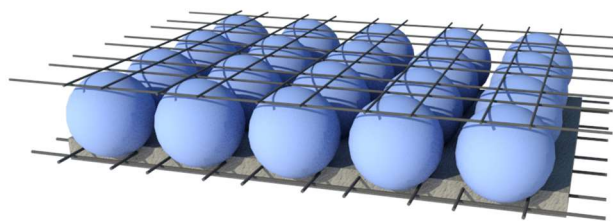
O sistema de lajes Bubbledeck apresenta três formas de execução: módulo reforçado, painéis acabados e pré-lajes, conforme a Figura 2. O primeiro consiste na adição de esferas entre telas de aço e seu posicionamento na forma para a realização da concretagem em dois estágios, a primeira camada com seis centímetros (Figura 2a). No segundo processo, a armação e a concretagem ocorrem na fábrica, sendo entregue na obra pronta para uso, como ilustrado na Figura 2b. No último sistema, ocorre a execução de painéis pré-moldados de seis centímetros na fábrica juntamente com a armação, sendo a concretagem a única etapa executada na obra (Ver Figura 2c). Não se pode afirmar que as lajes Bubbledeck apresentem os mesmos comportamentos à flexão para diferentes modos de montagem.



a) Módulo Reforçado



b) Painéis Acabados



c) Pré-laje

Figura 2: Formas de execução dos painéis de Lajes Bubbledeck.

No dia 27 de maio de 2017, ocorreu o primeiro acidente de uma estrutura construída com o sistema Bubbledeck. O edifício garagem do aeroporto de Eindhoven, na Holanda, sofreu colapso parcial da sua estrutura, conforme pode ser visto na Figura 3. De acordo Allen (2017), a Organização holandesa de pesquisa científica aplicada (TNO) cita como uma das causas do colapso a ligação entre painéis na região de momento positivo que foi realizada de maneira incorreta, contudo, poucas recomendações normativas apresentam prescrições sobre como realizar esse tipo de ligação devido à falta de estudos nessa área.



a)



b)

Figura 3: Acidente em edifício construído com sistema de Lajes Bubbledeck.

Este trabalho apresenta resultados de ensaios em 4 testes, sob carregamento estático e simétrico, de resistência à flexão da seção transversal localizada nas ligações entre dois painéis Bubbledeck no qual se variou a espessura da região maciça de concreto na ligação, a taxa de armadura de flexão e a altura útil. A metodologia empregada será a comparação dos resultados teóricos obtidos através dos métodos de cálculo, com os resultados experimentais de ensaios

realizados neste trabalho, composto de quatro lajes lisas de concreto armado, sendo uma maciça, uma Bubbledeck com módulo reforçado e duas Bubbledecks com pré-lajes. As cargas últimas e os modos de ruptura são apresentados e comparados com as adaptações das recomendações das normas ACI 318M (2014), Eurocode 2 (2004) e a ABNT NBR 6118 (2014), além do método apresentado pela Bubbledeck Internacional baseada na norma australiana AS-3600 (2009).

## **1.1. MOTIVAÇÃO**

A utilização de novos sistemas construtivos, devido a necessidade de diminuir os custos das edificações e torná-las ambientalmente menos agressivas, tem sido muito aplicada em situações de projeto pelo mundo, o sistema de lajes Bubbledeck apresenta um menor impacto ambiental dado que diminui o peso próprio da estrutural além de permitir ao engenheiro calculista utilização de maiores vãos na estrutura. Porém, observando o cenário nacional, não há nenhuma recomendação normativa a qual contenha o cálculo de lajes com vazios, gerando uma certa resistência do mercado brasileiro em utilizá-la.

Deste modo, a motivação do trabalho está no fato de não existirem recomendações brasileiras sobre esta temática, sendo a sua análise uma fonte de estudo promissora e atual, além de tratar-se de uma nova tecnologia de sistema estrutural.

## **1.2. JUSTIFICATIVA**

O concreto é o segundo material utilizado no mundo, sendo a primeira estrutura de concreto armado construída no século dezenove nos Estados Unidos, a Ward House. Ao longo dos séculos, vários sistemas construtivos utilizando o concreto armado foram sendo pesquisados e utilizados com o intuito de aumentar a segurança e economia de estruturas de concreto armado, dentre eles o sistema mais utilizado até os dias atuais, criado por Joseph Monier, em que se utiliza lajes, vigas e pilares ao longo da estrutura. Em meados do século XXI iniciou-se vários estudos e técnicas para o desenvolvimento de sistemas construtivos usando lajes com vazios.



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.

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**

#### **1.3.1. OBJETIVO GERAL**

Este trabalho de projeto final de curso tem como objetivo principal avaliar o comportamento a flexão da ligação entre painéis Bubbledeck de 4 lajes concreto armado com diferentes tipos de ligações para a avaliação de parâmetros que influenciam de maneira considerável no comportamento mecânico dessas ligações e também nas adaptações das formulações propostas pelo ACI 318M (2014), Eurocode 2 (2004), ABNT NBR 6118 (2014) e AS 3600 (2009) para a estimativa de capacidade resistente dos painéis Bubbledeck.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Avaliar a influência de cada tipo de ligação no comportamento à flexão dos painéis do tipo Bubbledeck;

Comparar o comportamento à flexão dos painéis tipo Bubbledeck com o comportamento à flexão da laje maciça de referência;

Calcular os resultados experimentais obtidos com propostas de adaptações das recomendações normativas do ACI 318M (2014), Eurocode 2 (2004), ABNT NBR 6118 (2014) e AS 3600 (2009).

## **1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO**

O trabalho está dividido em 6 capítulos.

O presente Capítulo 1 introduz o leitor nos assuntos abordados no trabalho.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica onde alguns fundamentos teóricos são apresentados. Trabalhos de autores que já abordaram os assuntos tratados nesta pesquisa são mostrados, evidenciando suas conclusões e outras considerações pertinentes. São apresentadas as adaptações das formulações normativas para o cálculo da resistência à flexão de lajes tipo Bubbledeck e seus parâmetros responsáveis por exercer influência sobre o comportamento à flexão.

O Capítulo 3 descreve a metodologia do trabalho experimental e das análises realizadas.

No Capítulo 4 são expostos as características do programa experimental realizado, mostrando as características dos 4 espécimes ensaiados, o sistema de ensaio e instrumentação utilizados bem como as informações que tinham por objetivo serem adquiridas a partir desses ensaios. Por último apresenta-se as propriedades dos materiais utilizados na confecção dos espécimes.

O Capítulo 5 é reservado para a apresentação dos resultados obtidos através dos ensaios realizados nos quatro espécimes. Foram analisados os deslocamentos verticais, diagrama momento-curvatura, deformações do aço e concreto, cargas últimas e modos de ruptura, além da comparação das cargas últimas experimentais com os valores obtidos com as adaptações das recomendações normativas.

Por fim, o Capítulo 6 traz as conclusões do trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados maiores detalhes sobre o comportamento à flexão de lajes tipo Bubbledeck e os parâmetros que influenciam neste sistema. Serão expostas também algumas pesquisas anteriores envolvendo este tipo de sistema construtivo.

### 2.1. PESQUISAS SOBRE COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE LAJES TIPO BUBBLEDECK

GUDMAND-HØYER (2003) elaborou estudo sobre ligações entre painéis pré-moldados de lajes tipo BubbleDeck para verificar o mecanismo de ruptura da laje e os efeitos causados pela ancoragem das barras de reforço. Os autores determinaram a transmissão de carga através dos esforços internos. Foram construído cinco painéis com pré-lajes, nos quais foram colocadas malhas de aço na parte inferior e superior e armaduras transversais, sendo colocadas esferas plásticas e inseridas barras de ligação para o reforço dos painéis, conforme é ilustrado na Figura 4.

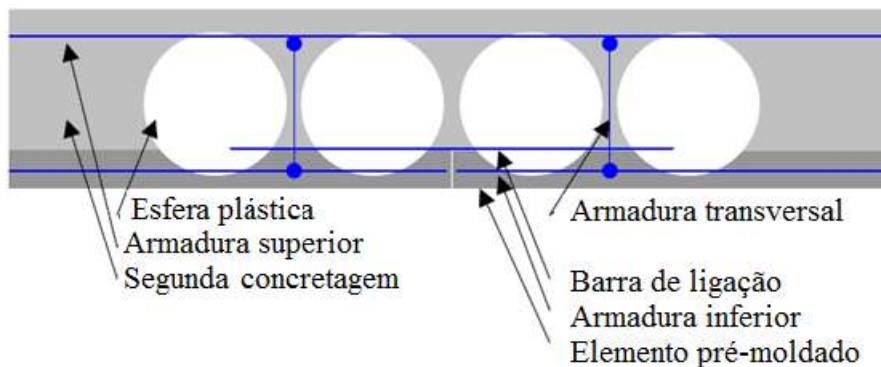


Figura 4: Esboço principal da laje *BubbleDeck* (SILVA, 2016)

A partir das análises experimentais foram identificados seis mecanismos de ruptura. Os mecanismos 1 e 2, a ruptura ocorreu por conta do escoamento da malha e das barras de ligação devido à flexão, ocorrendo rupturas dúcteis conforme é desejado em projeto (Figura 5).

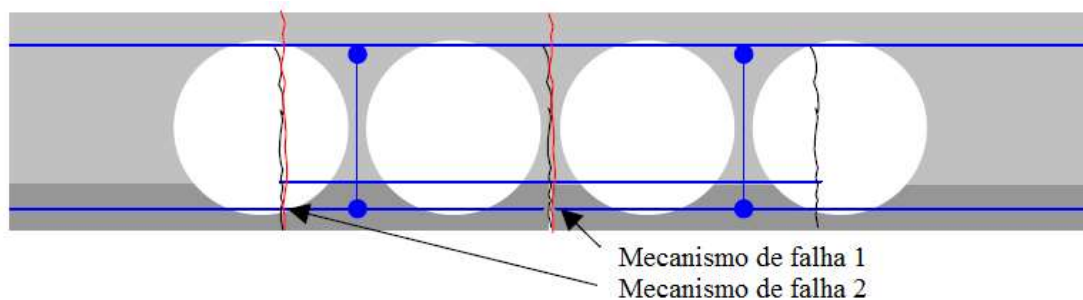


Figura 5: Mecanismos de ruptura 1 e 2 (SILVA, 2016).

No mecanismo 3 de ruptura deve ser considerado o arrancamento da barra de ligação, a falha local devida a falta de aderência e a falha do concreto. O mecanismo de ruptura 3a apresenta três contribuições: falha local, falha do concreto e contribuição da armadura, conforme pode ser visto na Figura 6. No que tange ao mecanismo de ruptura 3b (Figura 6), pode ser considerada uma combinação de fatores, dentre eles o fendilhamento: ruptura local, ruptura do concreto, insuficiência de armadura inferior e ruptura de aderência. Por último, o mecanismo de ruptura 3b ocorre por conta da ruptura de aderência entre os concretos da pré-lajes (Figura 6). Neste mecanismo temos quatro contribuições para a dissipação sendo: ruptura local, ruptura de aderência, esforço flexão e contribuição do reforço.

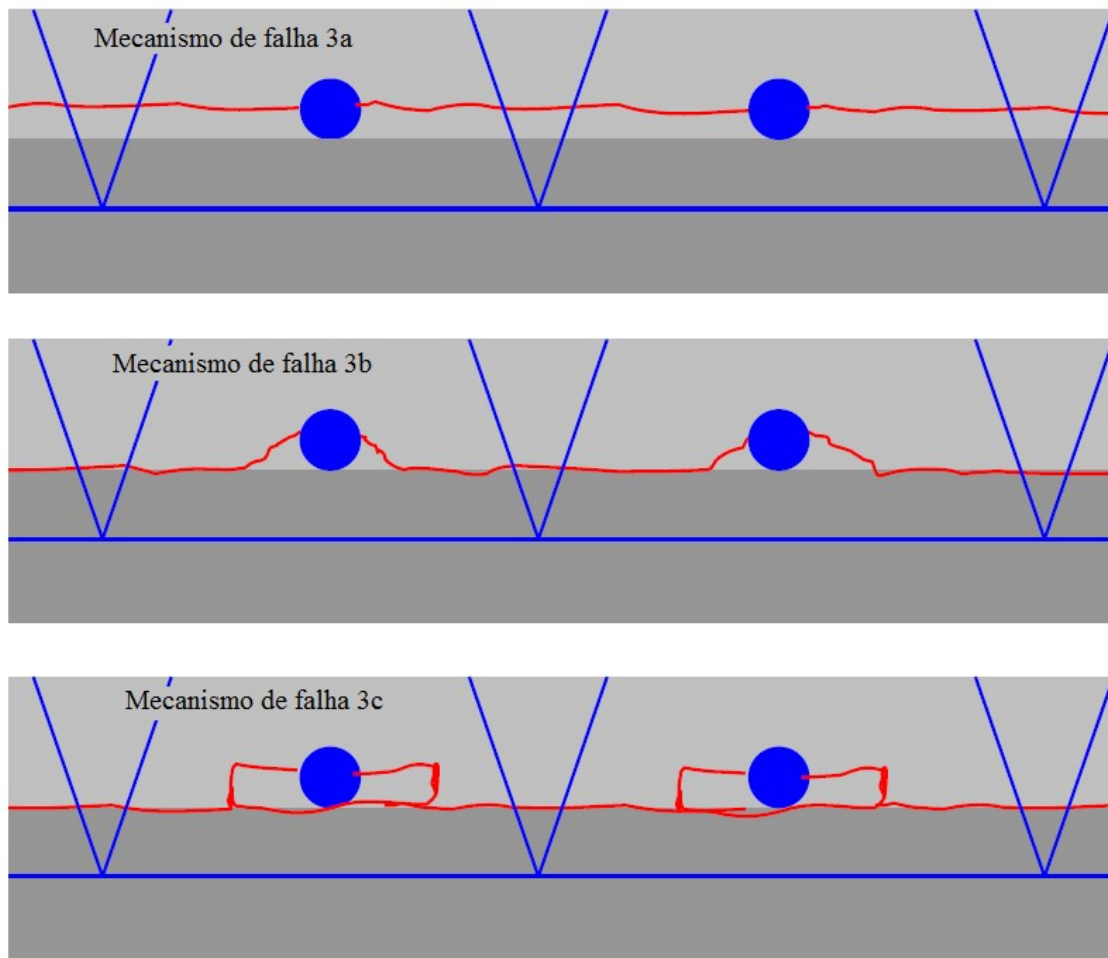


Figura 6: Mecanismo de ruptura 3a a 3c (SILVA, 2016).

O mecanismo de ruptura 4 consiste no arrancamento da malha de flexão localizada na pré-laje, enquanto que o mecanismo 5 é decorrente do cisalhamento na junta de construção. Por último, o mecanismo 6 ocorre por conta da ruptura por tração da armadura de flexão. Esses mecanismos podem ser visualizados na Figura 9.



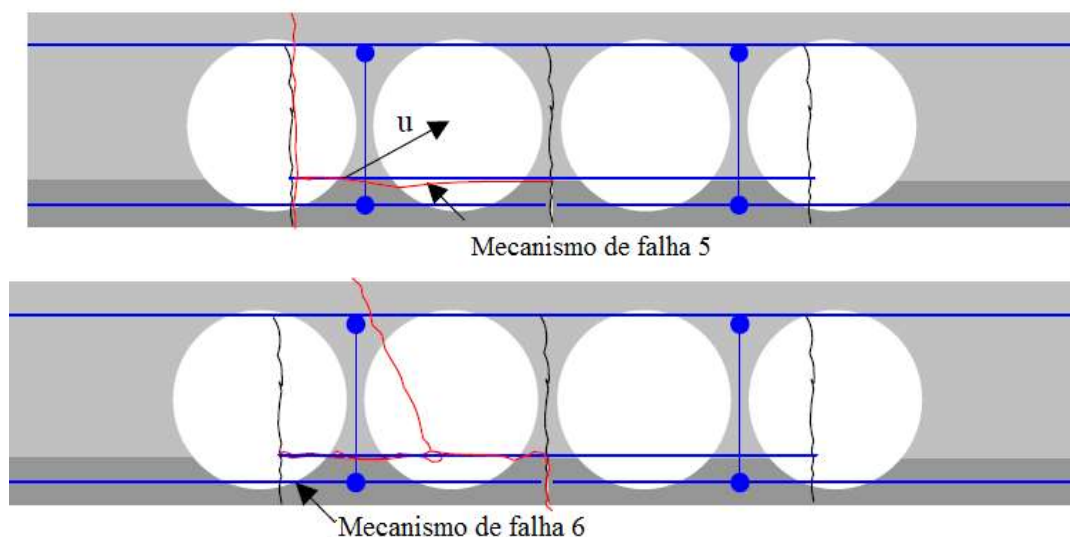


Figura 7: Mecanismos de ruptura 4, 5 e 6 (SILVA, 2016).

Chung e Park (2010) realizaram uma modelagem computacional para simular uma laje bidirecional com vazios biapoiada de dimensões 8900mmx300mmx250mm e diâmetro da esfera plástica de 140mm. Essa modelagem tridimensional foi realizada no software LUSA utilizando uma análise não linear pelo método dos elementos finitos com elementos de malha tetraédricos de 30mm por conta do formato da esfera. Na aplicação da carga foi considerado apenas o peso próprio, carga permanente e acidental.

Os resultados da modelagem mostraram que a carga última da laje maciça foi de 34,36kN/m<sup>2</sup>, apresentando uma deflexão de 2,16mm sendo que a ruptura ocorreu por flexão, enquanto que a laje com vazios esféricos apresentou carga última de 33,80kN/m<sup>2</sup>, deflexão de 3,86mm e ruptura por flexão, concluindo-se que as lajes com vazios esféricos se comportam à flexão da mesma maneira que as lajes maciças apresentando deflexão maior.

IBRAHIM et al. (2013), através de ensaios em 6 lajes bidirecionais, sendo duas maciças de referência e quatro Bubbledeck (ver Figura 8a e Figura 8b) observou que as lajes Bubbledeck apresentam menor rigidez e maior deformação no concreto em relação às lajes maciças, embora apresente resultados de resistência à flexão das lajes Bubbledeck muito próximo aos valores da laje de referência, confirmando os resultados de ALI (2014).

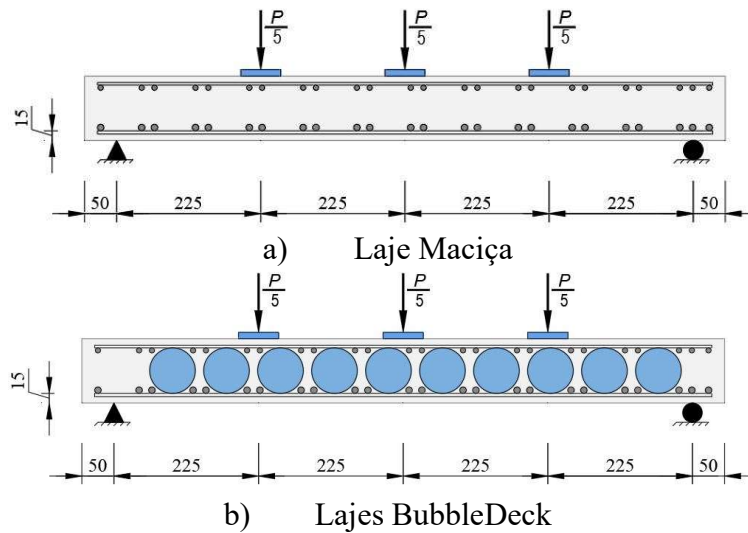


Figura 8: Seção transversal da Laje Lisa (adaptado de Ibrahim, 2013).

A rigidez é uma propriedade dos materiais definida como sendo a capacidade de um corpo a resistir à deformação. Características dos elementos estruturais como o volume de vazios dos materiais, propriedades geométricas da seção transversal e resistência a compressão e tração influenciam o valor da rigidez nesses elementos. Para avaliar a variação de rigidez causada pelos vazios, ALI (2014) realizou uma análise computacional comparando modelos de lajes maciças e cinco lajes bubbledeck de igual espessura através do programa Ansys utilizando o método dos elementos finitos, conforme ilustrado na Figura 9. Os resultados mostraram que a rigidez das lajes bubbledeck apresentaram cerca de 80% da rigidez das lajes maciças, contudo a capacidade resistente a flexão das lajes bubbledeck tiveram valores muito próximos a resistência à flexão das lajes maciças de mesma espessura.

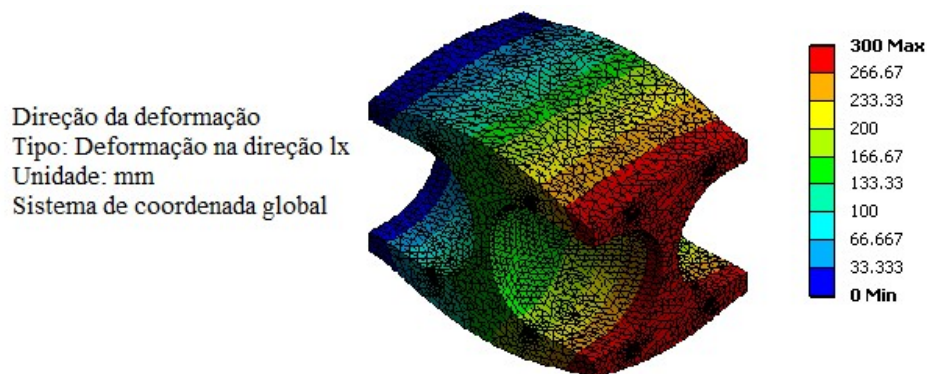


Figura 9: Modelagem de uma laje Bubbledeck através de elementos finitos (ALI, 2014).



## 2.2. RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO

De acordo com o ACI 318 (2014), NBR 6118 (2014), Eurocode 2 (2004) e AS 3600 (2009), a resistência a flexão de lajes submetidas a cargas em apenas uma direção é obtido a partir de uma simplificação, considerando validas as hipóteses de Bernoulli, a compatibilidade de deformações lineares entre o aço e concreto, a contribuição da resistência do concreto à tração é desprezada no estado limite último e as distribuições de tensões de compressão no concreto podem ser simplificadas por um diagrama retangular, conforme ilustrado na Figura 10.

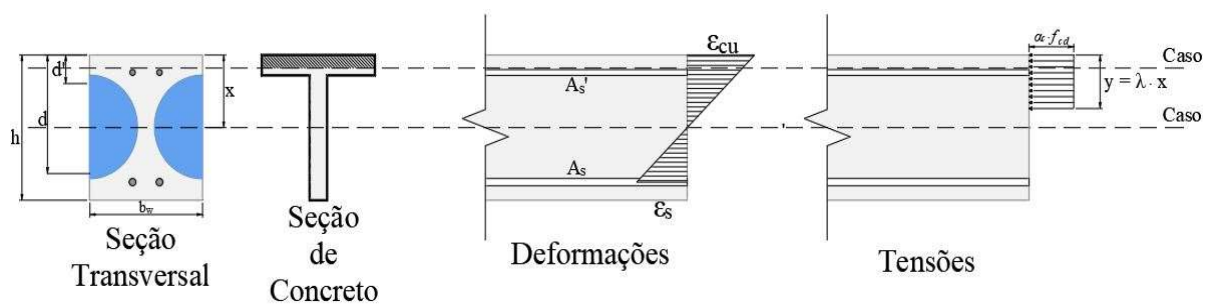


Figura 10: Adaptação de cálculo.

Devido à falta de recomendações normativas específicas para o cálculo da resistência à flexão de painéis bubbledeck, foi utilizado o modelo de cálculo de resistência à flexão de vigas, considerando dois casos possíveis: no primeiro caso, a altura da linha neutra não passa pela região dos vazios, apresentando uma seção comprimida de concreto retangular. No segundo caso, a altura da linha neutra secciona a região das esferas, logo a seção de concreto comprimida tem o formato em T. Para os modelos de painéis utilizados, apenas o caso 1 ocorreu, portanto a resistência à flexão dos painéis com seção retangular de concreto, armadura inferior e superior tracionadas com escoamento do aço no estado limite último, pode ser estimada conforme a Equação 1 e a Equação 2.

$$M_u = A_s \cdot f_{ys} \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2}\right) + A_s' \cdot f_{ys}' \cdot \left(d' - \frac{\lambda \cdot x}{2}\right) \quad \text{Equação 1}$$

$$x = \frac{(A_s \cdot f_{ys} + A_s' \cdot f_{ys}')}{(\alpha_c \cdot f_c \cdot b_w \cdot \lambda)}$$

Equação 2

Onde:

$x$  é a altura da linha neutra do painel Bubbledeck;

$A_s$  é a área de aço da armadura inferior;

$f_{ys}$  é a tensão de escoamento da armadura inferior;

$A_s'$  é a área de aço da armadura inferior;

$f_{ys}'$  é a tensão de escoamento da armadura inferior;

$\alpha_c$  é um coeficiente experimental relacionado a geometria da viga;

$f_c$  é a resistência à compressão do concreto;

$b_w$  é a largura da seção transversal da laje bubbledeck;

$\lambda$  é um coeficiente experimental relacionado a altura do bloco de compressão.

A diferença entre as recomendações normativas se encontra nos valores adotados para cada coeficiente experimental e para a deformação máxima do concreto à compressão, conforme pode ser visto na tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes experimentais das recomendações normativas.

Parametro	NBR 6118 (2014)	Eurocode 2 (2004)	ACI 318M (2014)	AS 3600 (2009)
$\lambda$	0,80	0,80	0,71	0,72
$\alpha_c$	1,00	1,00	1,00	1,00
$\epsilon_{cu}$	0,0035	0,0035	0,0030	0,0030

## **2.3. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A RESISTÊNCIA À FLEXÃO**

### **2.3.1. TAXA DE ARMADURA DE FLEXÃO**

A taxa de armadura de flexão total ( $\rho$ ), dada pela relação entre a área de aço da armadura – inferior e superior – e a área de concreto, interfere na resistência à flexão, o que pode ser evidenciado pelo modelo adotado para o cálculo do momento resistente das vigas, cujo valor depende da área de aço de armadura utilizada.

### **2.3.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO**

Fundamentalmente, a resistência à flexão de uma viga de concreto armado é função direta da resistência à tração do concreto. Como em geral esta resistência é obtida correlacionando-a com sua resistência à compressão, as formulações teóricas existentes e as pesquisas experimentais costumam depender deste valor, visto que a definição da altura da linha neutra depende diretamente deste parâmetro, o que influencia o valor do momento resistente teórico.

### **2.3.3. ALTURA ÚTIL DA VIGA**

É intuitivo que uma viga de altura útil ( $d$ ) maior suporte uma carga superior e, dessa forma, apresente uma resistência à flexão superior. Assim, valores maiores de altura útil do elemento proporcionam um momento resistente superior, pois tornam o braço de alavanca de cada força normal atuando na seção superior, aumentando o seu respectivo momento de contribuição.

### **2.3.4. TENSÃO DE ESCOAMENTO DA ARMADURA DE FLEXÃO**

A resistência à flexão depende diretamente da tensão de escoamento da armadura de flexão. Esta resistência é obtida através do processo de produção do aço, caso seja formado a frio apresenta resistência de 600 MPa e se for formado a quente apresenta 500 MPa.

### **3. METODOLOGIA**

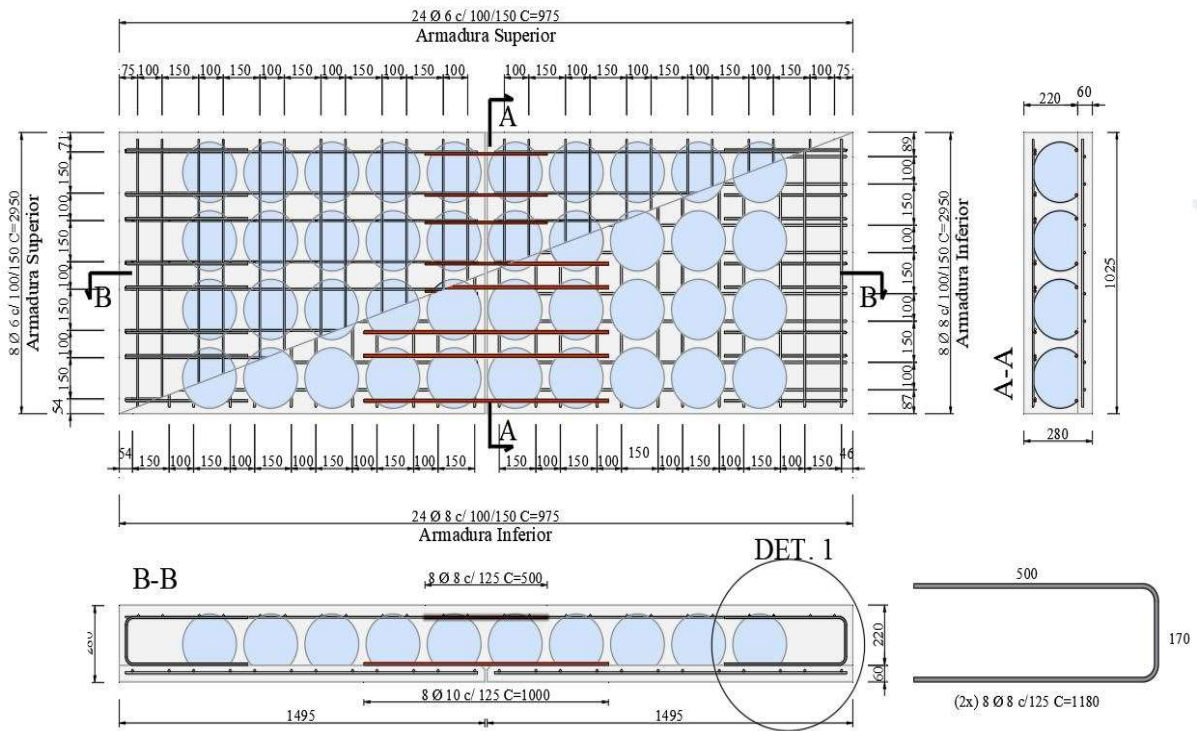
A metodologia a ser seguida neste trabalho consistirá em utilizar os resultados dos ensaios realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília por Silva (2016) para analisar o comportamento à flexão das ligações das lajes lisas do tipo Bubbledeck com 3 tipos diferentes de ligações. Nestes ensaios foram analisados os seguintes parâmetros: deslocamentos verticais, cargas de ruptura, momento-curvatura, deformação específica no concreto e na armadura de flexão. As cargas de ruptura serão comparadas com as estimadas segundo adaptações das recomendações normativas ACI 318 (2014), Eurocode 2 (2004), ABNT NBR 6118 (2014) e AS 3600 (2009).

## **4. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

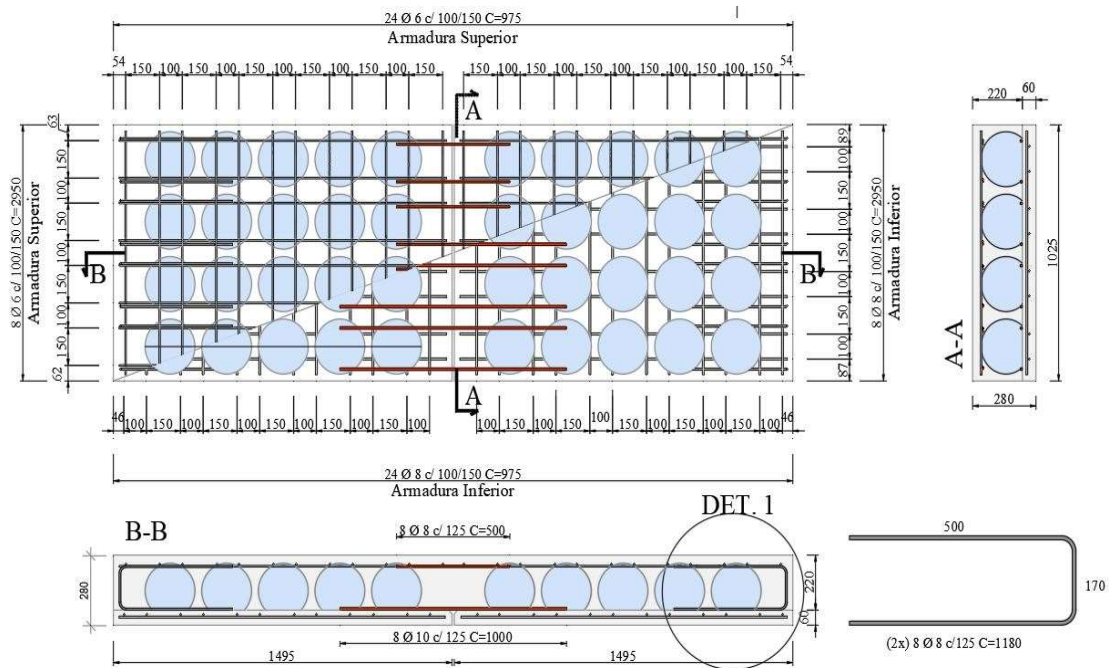
### **4.1. Característica das Lajes**

Foram ensaiadas quatro painéis de concreto armado na Universidade de Brasília, Brasil. Sendo um maciço de referência (RSF-28), um bubbledeck com pré-laje única (BD28-F1) e os outros dois painéis bubbledeck com duas pré-lajes e junta de ligação (BD28-F2 e BD28-F3), no qual a diferença entre elas é a seção de concreto na junta. Os painéis apresentaram seção transversal de (1025 x 280) mm<sup>2</sup>, comprimento de 3000 mm e vão ensaiado de 2700 mm, propriedades mecânicas do concreto complementar iguais (mesma betonada). As armaduras de flexão foram compostas por telas soldadas com fios de aço CA-60 com 8,0 mm de diâmetro na face inferior e 6,0 mm na face superior. Para garantir a ancoragem das barras na extremidade foram utilizadas barras de aço CA50, em forma de “U”, com 8 mm de diâmetro. Na parte inferior dos painéis BD28-F2 e BD28-F3 foram adicionadas barras de transferência CA-50 com 10 mm de diâmetro e comprimento de 1000 mm e na parte superior foram colocadas barras de transferência CA-50 com diâmetro de 8 mm e comprimento de 500 mm (Tabela 2). Assim a influência da junta de ligação e da seção de concreto nessa região foi verificada comparando-se os resultados experimentais da RSF-28, BD28-F1, BD28-F2 e BD28-F3. A Figura 11 apresenta as características e detalhes dos painéis.





c) BD28-F2



d) BD28-F3

Figura 11: Formas de execução dos painéis Bubbledeck (adaptado de Silva, 2016).

Após a montagem das formas de aço, com 6 mm de espessura, parafusadas em suas bordas e aplicação de desmoldante, foram colocadas duas malhas de aço, uma superior e outra inferior

sendo as quais receberam espaçadores e foram posicionadas cuidadosamente com o intuito de padronizar os cobrimentos das armaduras evitando que o empuxo hidrostático levante as esferas plásticas e, conseqüentemente, diminua a altura útil. Entre as duas malhas de aço, foram colocadas as bolas com vazios nas lajes do tipo Bubbledeck. Os painéis e os corpos de prova foram concretados em duas etapas, em primeiro lugar concretou-se as pré-lajes junto com seus respectivos corpos de prova e por último foram concretadas os painéis e seus corpos de prova, sendo lançados e adensados com vibradores mecânicos de imersão com diâmetro da agulha de 25 mm para as lajes e para os corpos de prova. Após a concretagem, regularizou-se a superfície do concreto e foi iniciado o processo de cura com sacos de algodão umedecidos e lona preta durante os sete primeiros dias. A Figura 12 mostra o processo executivo das lajes.



a) Concretagem das pré-lajes      b) Posicionamento dos painéis na forma      c) Concretagem final e cura

Figura 12: Processo de execução dos espécimes (SILVA, 2016).

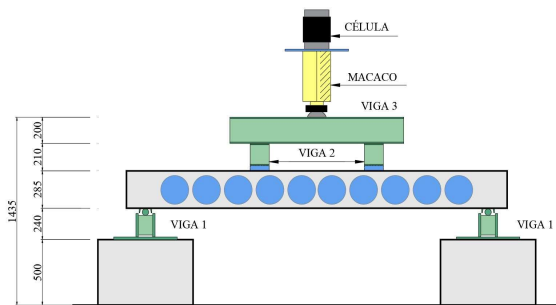
## 4.2. Sistema de Ensaio e Instrumentação

O comportamento a flexão foi analisado utilizando o sistema de quatro pontos (ensaio de Stuttgart), posicionando os painéis em apoios de primeiro gênero montados em placas de aço niveladas e apoiadas sobre os blocos de concreto. Esse tipo de ensaio de flexão proporciona um momento fletor constante no meio do vão, no qual os máximos, deslocamentos, deformações e momentos ocorrem, e, conseqüentemente, onde se encontra a ligação entre os painéis.

Na segunda etapa, o sistema de aquisição de dados, HBM Spider 8, compatível com o software Catman, foi conectado a todos os extensômetros do painel, seguido da montagem do macaco e da célula de carga no pórtico de reação. O ensaio foi realizado com a aplicação do carregamento com passos de carga de 2,5 kN, por meio de um atuador hidráulico com capacidade de 1000



kN, que é transferido para uma viga rígida metálica a qual distribui a carga para outras duas vigas metálicas com tiras de neoprene, aplicando a carga em dois pontos equidistantes da superfície do painel, gerando uma região de momento fletor constante. Os painéis foram simplesmente apoiados por dois roletes resultando em um vão efetivo de 2700 mm, uma região de flexão pura de 900 mm e dois vãos de cisalhamento simétricos de 900 mm. O atuador hidráulico aplicou o carregamento até a ruína da peça, sendo que o monitoramento do carregamento aplicado foi realizado por uma célula de carga padrão com capacidade de 1000 kN e precisão de 1 kN, ligada ao leitor de uma célula para mostrar a magnitude do carregamento o qual pode ser visto na Figura 13.



(a) Desenho Esquemático

(b) Fotografia

Figura 13: Sistema de Ensaio (adaptado de Silva, 2016).

Para monitoramento dos deslocamentos verticais das vigas ao longo do ensaio, foram selecionados sete pontos na parte superior dos painéis para a colocação dos Transdutores de Variação de Deslocamento Linear (LVDT), conforme Figura 14.

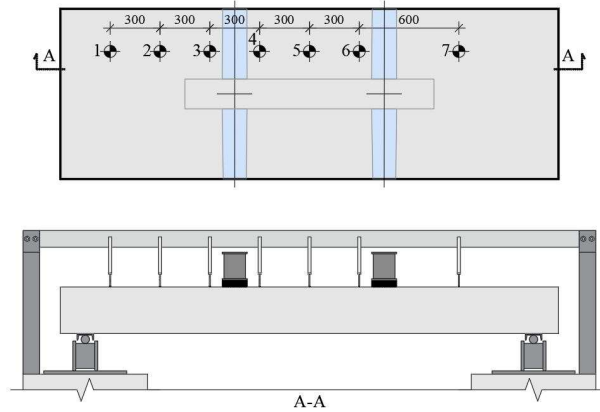


Figura 14: Posição dos LVDTs (adaptado de Silva, 2016).

No que tange ao monitoramento das deformações foram utilizados três extensômetros elétricos de resistência no aço da malha inferior da armadura de flexão, três extensômetros elétricos nas barras de transferência e dois na superfície superior do concreto, totalizando cinco extensômetros na região de momento fletor constante, como pode ser visualizado na Figura 15.

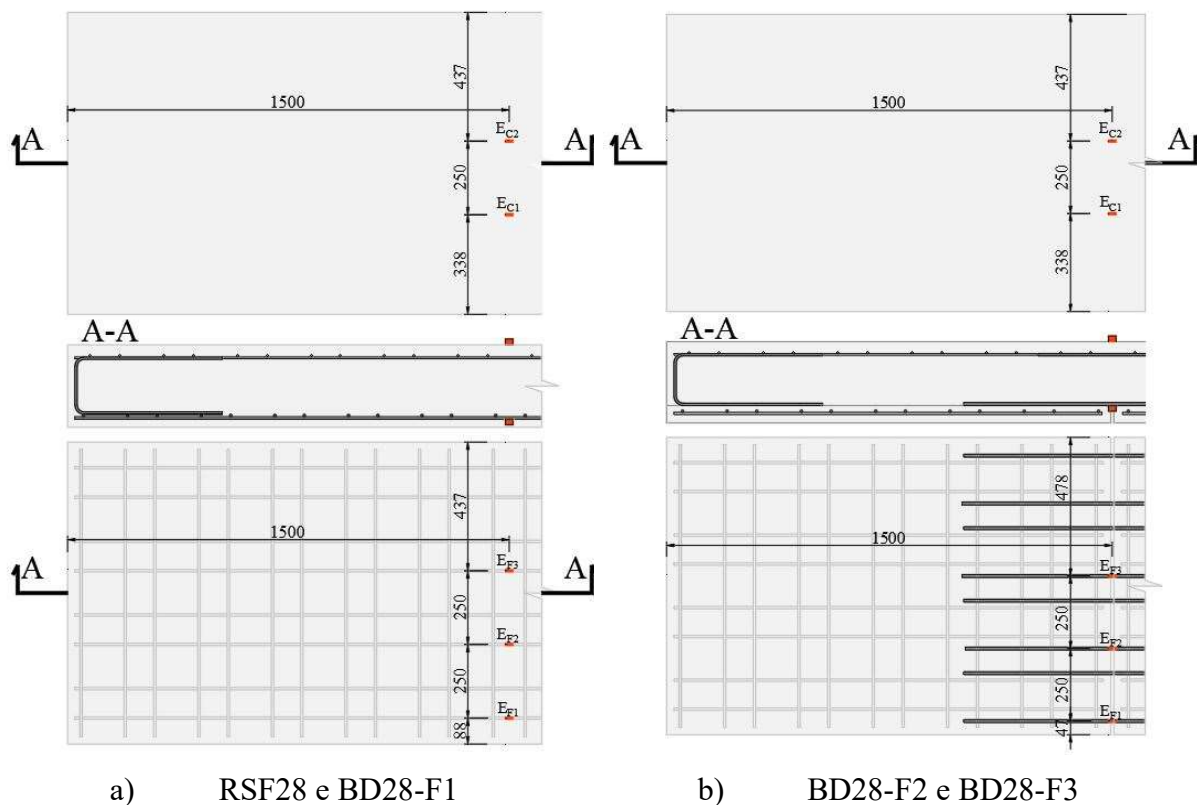


Figura 15: Localização dos extensômetros (adaptado de Silva, 2016).

### 4.3. Propriedades dos Materiais

A moldagem dos corpos de prova cilíndricos segundo a NBR 5739 (2007) ocorreu simultaneamente à concretagem das lajes, sendo retirados nove corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento para cada um dos ensaios previstos, totalizando vinte e oito corpos de prova. A determinação da resistência à compressão foi realizada de acordo com a NBR 5738 (2015) no mesmo dia em que os painéis foram ensaiados, a medição da resistência à tração por compressão diametral seguiu o estabelecido pela NBR 7222 (2011) e o módulo de elasticidade secante foi obtido conforme as recomendações da NBR 8522 (2008). A Tabela 2 apresenta os resultados das propriedades mecânicas do concreto.

Tabela 2 – Características dos painéis ensaiados.

Lajes	$b_w$ (mm)	$h$ (mm)	$d$ (mm)	$d'$ (mm)	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	$A_s'$ (cm <sup>2</sup> )
RSF28	1025	280	247,7	44,2	4,02	2,49
BD28-F1	1025	280	247,7	44,2	4,02	2,49
BD28-F2	1025	280	215,0	45,2	6,28	4,02
BD28-F3	1025	280	215,0	45,2	6,28	4,02

Os valores médios das tensões de escoamento, das tensões de ruptura, da deformação de escoamento e do módulo de elasticidade das três amostras de aço dos fios de aço com 6 mm e 8 mm, utilizados na armadura de flexão, e das barras de aço de 8 mm e 10 mm, utilizadas como barra de transferência entre duas pré-lajes, são apresentados na Tabela 3 junto com as propriedades mecânicas do concreto.

Tabela 3 – Propriedades dos materiais dos painéis.

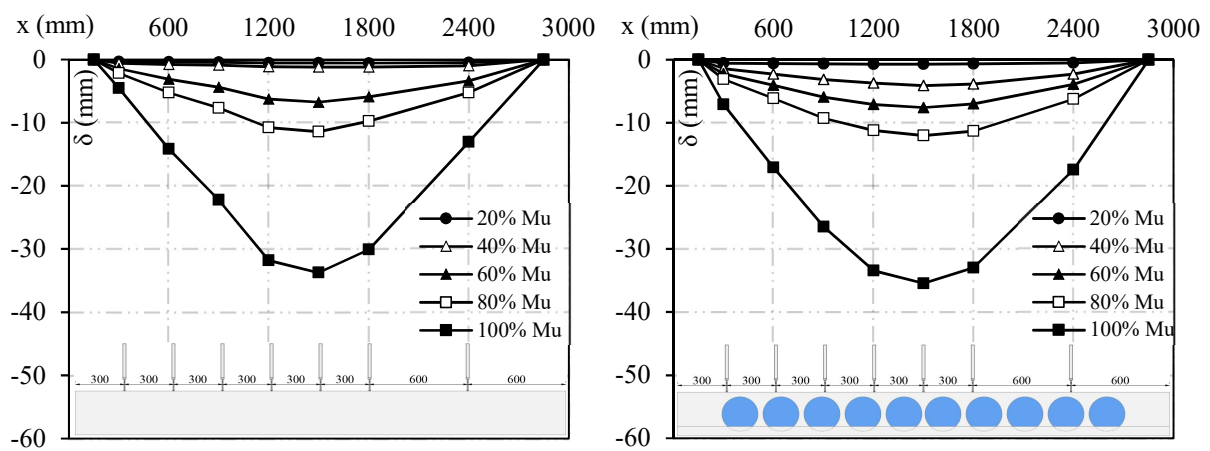
$\varnothing$ (mm)	$f_{ys,med}$ (MPa)	$\epsilon_{ys,med}$ (‰)	$E_{s,med}$ (GPa)	$f_{u,med}$ (MPa)
6,0	697	3,58	195	755
8,0	644	3,31	195	727
8,0	558	2,86	195	676
10,0	553	2,86	193	669

Lote	$f_{c,med}$ (MPa)	$f_{ct,med}$ (MPa)	$E_{c,med}$ (GPa)
Pré-laje	56,1	3,4	27,5
Complemento	47,7	3,9	25,8

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Deslocamentos Verticais

A Figura 16 apresenta o perfil do deslocamento vertical ao longo da direção longitudinal para os painéis RSF28, BD28-F1, BD28-F2 e BD28-F3, do início do carregamento até a carga próxima da ruptura, sendo o deslocamento limite de 50mm devido ao LVDT. Essa figura ilustra o comportamento carga-deslocamento dos painéis ensaiados com os diferentes tipos de ligação. Quase todos os painéis apresentaram uma variação praticamente linear de deslocamento ao longo do vão desde o início até o final dos ensaios, exceto o painel BD28-F2.



a) RSF-28

b) BD28-F1

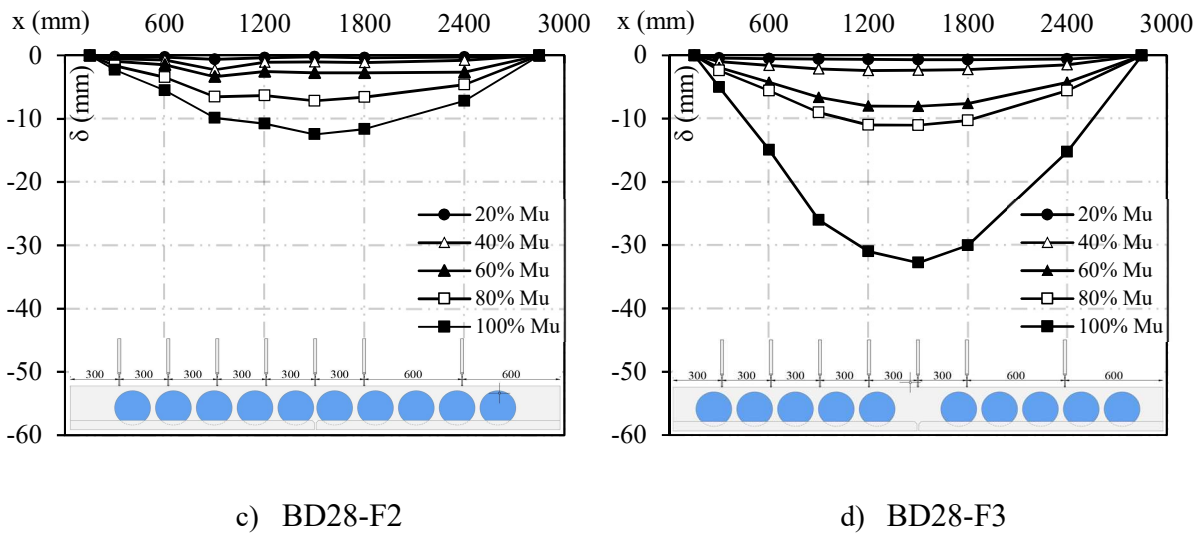


Figura 16 : Comportamento carga-deslocamento dos espécimes.

No caso dos painéis BD28-F1 e BD28-F3, observou-se maior variação nos deslocamentos verticais ao longo da direção transversal quando comparado com o painel de referência (RSF-28). Nesses casos, os deslocamentos máximos medidos no painel foram em torno de 9% a mais no caso do painel com uma pré-laje única e 20% a mais no painel que contem a região maciça na ligação, quando comparadas com o painel de referência, enquanto que o deslocamento no painel da laje BD28-F2 ficou aproximadamente 47% menor em relação a referência. Observou-se que os painéis apresentaram deslocamento inicial similar até a carga de fissuração, sendo que a laje maciça apresentou menores deslocamentos quando comparado com os painéis Bubbledeck BD28-F1 e BD28-F3 devido à sua maior rigidez. Para o caso do painel BD28-F2, foi possível notar que seu deslocamento foi menor em consequência de apresentar uma carga de ruptura em torno de 20% menor que a do painel de referência. Esses gráficos também mostram que os deslocamentos ao longo dos painéis apresentaram simetria, o que ratifica a aplicação simétrica de carregamento no sistema de ensaio.

A Figura 17 refere-se ao diagrama da relação momento-curvatura dos 4 painéis ensaiados, essa relação depende do material e das propriedades geométricas bem como do nível de aplicação de carga. O cálculo da curvatura  $\varphi$ , assumindo a hipótese de Euler- Bernoulli e na distribuição de deformação linear ao longo da seção transversal, é baseada na deformação do concreto da face superior,  $\varepsilon_c$ , na deformação do da armadura tracionada,  $\varepsilon_s$ , ambos na região de momento fletor constante, e na altura útil,  $d$ , conforme calculado pela Equação 03.

$$\phi = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d}$$

Equação 3

A ductilidade de uma estrutura pode ser avaliada quantitativamente a partir da deflexão e da curvatura. Como pode ser observado, quando comparadas com o painel de referência, apenas as lajes BD28-F1 e BD28-F3 apresentaram uma ductilidade maior, sendo que o acréscimo do maciço na região da ligação (BD28-F3) proporcionou uma curvatura maior em torno de 25% em relação à referência. Enquanto que o painel que apresentou menor ductilidade foi o BD28-F2, corroborando com os gráficos carga-deslocamento. Além disso, o painel BD28-F3 apresentou o maior momento de fissuração, em torno de 27,5 kNm, enquanto que o menor momento de fissuração ocorreu no painel BD28-F2, 13kNm, mostrando que a região de ligação entre dois painéis com pré-lajes diminui a ductilidade da peça e que o maior afastamento entre as esferas de concreto nessa região com o aumento da largura da seção de concreto retomam a ductilidade da peça, sendo o momento de fissuração maior que a da laje de referência o qual foi de aproximadamente 22,5 kNm. Conseqüentemente, as mudanças na região de ligação influenciam a curvatura da seção transversal.

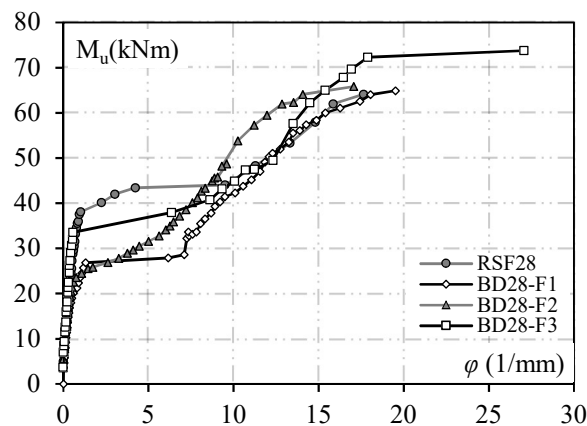


Figura 17: Curva momento-curvatura

## 5.2. Deformações devidas à flexão

Apenas as deformações longitudinais do meio do vão foram medidas para todos os painéis, a Figura 18 mostra a deformação versus o momento aplicado. Essas deformações foram medidas a partir da média dos dois extensômetros no concreto e três no aço, todos localizados no meio

do vão. Em geral, os resultados mostram que nenhuma dos painéis rompeu pelo esmagamento do concreto, sendo que o painel BD28-F3 apresentou a maior deformação no concreto de 1872,11 mm/m, enquanto que o BD28-F2 teve a menor deformação próxima à ruptura de 6993,95 mm/m, confirmando o aumento da capacidade resistente relacionado ao acréscimo da região maciça na ligação.

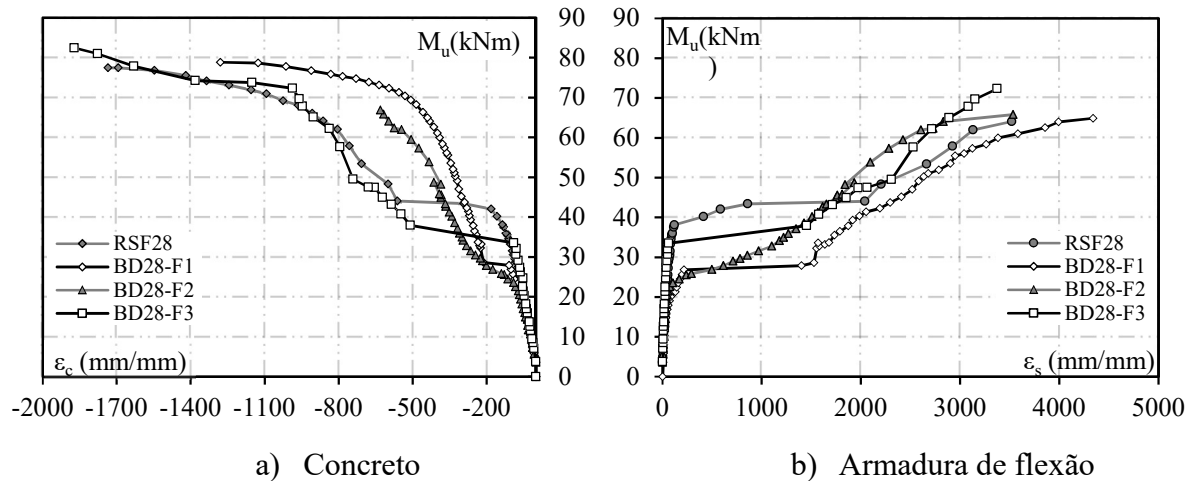


Figura 18: Deformações dos espécimes.

A resposta à flexão dos painéis, medidos pela deformação da armadura de flexão, foram similares em todos os ensaios. Os painéis RSF28 e BD28-F3 apresentaram o maior momento de escoamento, em torno de 35kNm, enquanto que a BD28-F1 e BD28-F2 escoaram antes, com um momento de 27,5kNm. O painel que apresentou a maior deformação antes da ruptura foi o BD28-F1. A Figura 19 apresenta a altura da linha neutra das seções transversais e pode ser visto que o painel BD28-F1 apresentou valor muito próximo ao painel de referência. Apenas os painéis que apresentavam uma região de ligação apresentaram uma linha neutra significativamente menor. Essa diferença é atribuída a menor rigidez da peça devido aos vazios e a diminuição da altura útil na região de ligação o qual leva a uma menor deformação na zona de compressão, e conseqüentemente, a uma diminuição na altura da linha neutra.

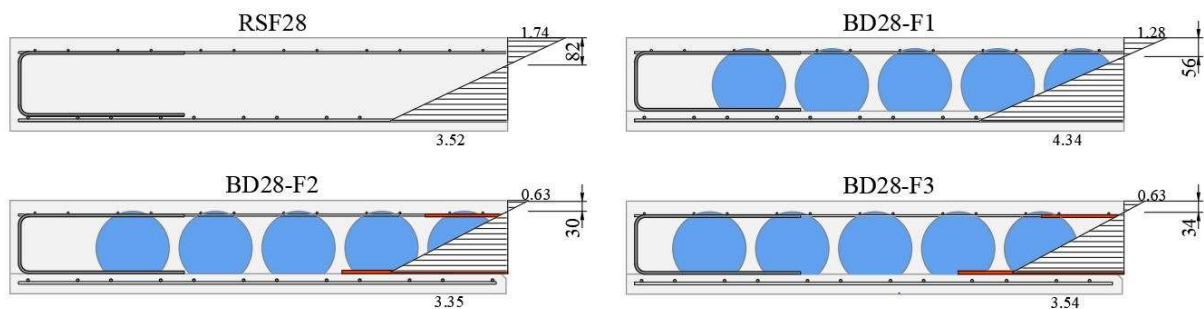


Figura 19: Deformações reais do aço e do concreto nos painéis antes da ruptura.

### 5.3. Cargas Últimas e modos de ruptura

A partir dos resultados experimentais obtidos em relação aos diferentes modelos de painéis ensaiados, foi possível fazer uma comparação entre os mesmos com o intuito de analisar a influência dos vazios, das pré-lajes, das barras de ligação e do aumento da região maciça de concreto nas juntas, conforme mostra a Figura 20. Comparando os resultados de momento último, fica evidente que o painel bubbledeck sem pré laje apresentou carga de ruptura semelhante ao painel maciço. Porém, ao ser avaliado o painel com pré-laje sem a presença de maciços na região da ligação, houve uma considerável redução de resistência em relação ao painel maciço (14%). Por outro lado, o painel bubbledeck com pré-laje, com a presença de maciço na região de ligação, apresentou carga de ruptura semelhante à de referencia, apenas 6% superior, evidenciando que maciços na região da ligação evitam rupturas prematuras da ligação.

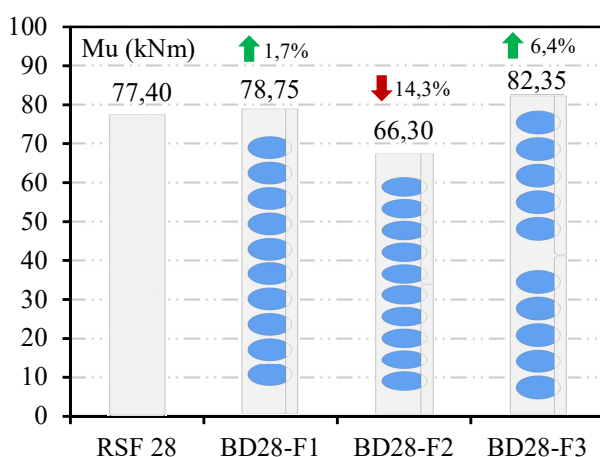


Figura 20: Carga última dos painéis.



Com as recomendações das normas Eurocode 2 (2004) e ACI 318 (2014) para ruptura à flexão na região das juntas de ligação, foi possível calcular, para cada painel, a resistência teórica à flexão da laje ( $M_{teo}$ ), para que pudessem ser confrontados com os valores obtidos em ensaio ( $M_u$ ), em relação as suas características, conforme a Tabela 4.

A partir da Tabela 4 verifica-se que todas as normas apresentam valores de resistência à flexão teóricos muito próximos devido a utilização das mesmas concepções teóricas sendo que a diferença entre os valores experimentais utilizados são desprezíveis no cálculo. Com ressalva para a laje BD28-F2, as recomendações normativas estimam com precisão e a favor da segurança o valor da resistência à flexão para as lajes bubbledeck com vazios e com uma região maciça de concreto mais espessa na junta de ligação, sendo essas lajes mais resistentes do que a laje de referência.

Tabela 4 – Resultados dos painéis ensaiados.

Lajes	$f_c$ (MPa)	$f_{ys}$ (MPa)	$M_u/M_{EN}$	$M_u/M_{ACI}$	$M_u/M_{u,ref}$
RSF28	47,10	640	1,13	1,13	1,00
BD28-F1	47,10	640	1,14	1,14	1,02
BD28-F2	47,10	546	0,74	0,74	0,86
BD28-F3	47,10	546	0,92	0,92	1,06

Os painéis ensaiados foram projetados para ter comportamento dúctil, consequentemente a armadura de flexão escoou antes do esmagamento do concreto. As fissuras de flexão ocorreram na região de maior momento fletor, iniciando-se na região inferior da laje no meio do vão. Assim que a carga vai aumentando, essas fissuras de flexão crescem verticalmente em direção à zona de compressão. Logo que a deformação na armadura de flexão atinge o escoamento, as fissuras de flexão no meio do vão se estendem e a deflexão começa a crescer rapidamente. Por último, todos os painéis romperam por flexão devido ao escoamento da armadura longitudinal.

Além do mais, na ruptura, o painel BD28-F1 apresentou mecanismo de ruptura igual ao do painel maciço de referência. Contudo, os painéis que continham duas pré-lajes com barras de ligação, BD28-F2 e BD28-F3, apresentaram um mecanismo diferente em que é visualizada uma fissura horizontal na região de ligação entre a pré-laje e a parte superior do painel seguida por uma fissura inclinada (Figura 21). Segundo Gudmand-Hoyer (2003), esse mecanismo decorre do arrancamento das barras de ligação, da falha local devia a falta de aderência e da ruptura na junta de concretagem.



a) RSF-28



b) BD28-F1



c) BD28-F2



d) BD28-F3

Figura 21: Modos de Ruptura (SILVA, 2016)

## 6. CONCLUSÕES

Nesse trabalho, o comportamento a flexão da ligação de painéis Bubbledeck foi determinado. Com base nos resultados, foram tomadas as seguintes conclusões. A primeira foi que as lajes Bubbledeck apresentaram maior deslocamento devido à falta de rigidez causados pela ausência de concreto nos vazios, sendo que o aumento da região maciça na região da ligação (BD28-F3), diminui os deslocamentos quando comparado com o painel sem maciço na região. Em segundo lugar, o escoamento da armadura de flexão e comportamento último dos painéis Bubbledeck são similares aos do painel maciço de referência, valendo ressaltar que o painel com região maciça na ligação foi o único que apresentou momento resistente maior do que o painel maciço. Consequentemente, os momentos últimos e deformações no aço não variaram significativamente quando comparados com a laje maciça.

Todos os painéis romperam por flexão, contudo os painéis sem pré-laje e com pré-laje e região maciça na ligação apresentaram maiores deformações no aço, e consequentemente maiores curvaturas do que o painel de referência. Por último, a relação entre o valor experimental e o valor calculado foi a mesma para ambas as adaptações das recomendações normativas, sendo que para o caso de uso de duas pré-lajes, esses valores ficam contra a segurança.

Por conseguinte, de acordo com o estudo realizado, o comportamento a flexão de ligações de painéis Bubbledeck pode ser previsto a partir da proposição de adaptação das recomendações normativas.

Contudo, mais trabalhos a respeito do comportamento estrutural utilizando testes experimentais são necessários para aumentar o banco de dados e permitir aos pesquisadores desenvolverem prescrições para o dimensionamento de painéis Bubbledeck com a mesma confiabilidade de estruturas convencionais de concreto armado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 318. Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2014.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro, 2003.

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

AUSTRALIAN STANDARD. Concrete structures. AS-3600. Sydney: Standards Australia International, 2009.

BS NA EN 1992-1-1 (English): UK National Annex to Eurocode 2. Design of Concrete Structures. General rules and rules for buildings. British Standards Institution, Londres, 2014.

ALI, Wondwosen Belay. Two Dimensional Micromechanics Based Computational Model for Spherically Voided Biaxial Slabs (SVBS). Mason Archival Repository Service Norwegian University of Science and Technology, 2014, 177p.

IBRAHIM et al. Flexural Capacities of Reinforced Concrete Two-Way Bubbledeck Slabs of Plastic Spherical Voids, Dyala Journal of Engineering Sciences, V.06, Nº 2, 2013.

J.H. Chung e J.H. Park. An analytical study on the impact of hollow shapes in bi-axial hollow slabs, Korea Concrete Institute, 2010.

ALLEN, Thomas (Ed.). Cause of Bam garage collapse. 2017. Disponível em: <<https://www.khl.com/construction-europe/cause-of-bam-garage-collapse/129461.article>>. Acesso em: 16 maio 2018.

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

BubbleDeck-UK (2008). Design Guide for compliance with BCA using AS3600 and EC2, BubbleDeck UK Ltd.

SILVA, W.V (2016).Análise Experimental do Comportamento à Flexão e Ligação Entre Painéis de Lajes Tipo BubbleDeck. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação ETD-00XX/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 10Xp.