



FACULDADE DE EDUCAÇÃO E MEIO AMBIENTE

LEILIANE NERY VIEIRA GODINHO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LAJES BUBBLEDECK
COMPARADO AO DE LAJES MACIÇAS TRADICIONAIS**

ARIQUEMES - RO

2020

LEILIANE NERY VIEIRA GODINHO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LAJES BUBBLEDECK
COMPARADO AO DE LAJES MACIÇAS TRADICIONAIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Educação e Meio Ambiente como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador (a): Prof. Ms. Silênia Priscila da Silva Lemes

ARIQUEMES - RO

2020

FICHA CATALOGRÁFICA
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Júlio Bordignon - FAEMA

G585e GODINHO, Leiliane Nery Vieira.

Estudo do comportamento estrutural de lajes bubbledeck comparado ao de lajes maciças tradicionais. / por Leiliane Nery Vieira Godinho. Ariquemes: FAEMA, 2020.

67 p.

TCC (Graduação) - Bacharelado em Engenharia Civil - Faculdade de Educação e Meio Ambiente - FAEMA.

Orientador (a): Profa. Ma. Silênia Priscila da Silva Lemes.

1. Método. 2. Inovação. 3. Esferas. 4. Deslocamentos. 5. Sustentabilidade. I Lemes, Silênia Priscila da Silva . II. Título. III. FAEMA.

CDD:620.1

Bibliotecária Responsável
Herta Maria de Açucena do N. Soeiro
CRB 1114/11

LEILIANE NERY VIEIRA GODINHO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE LAJES BUBBLEDECK
COMPARADO AO DE LAJES MACIÇAS TRADICIONAIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Educação e Meio Ambiente como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador (a): Prof. Ms. Silênia Priscila da Silva Lemes

Banca examinadora

Prof.^a Orientadora Ms. Silênia Priscila da Silva Lemes
Faculdade de Educação e Meio Ambiente – FAEMA

Prof. Ana Carolina Silvério
Faculdade de Educação e Meio Ambiente – FAEMA

Prof. Ruan Iuri de Oliveira Guedes
Faculdade de Educação e Meio Ambiente – FAEMA

ARIQUEMES- RO

2020

Dedico a finalização desta monografia, primeiramente a Deus, por proporcionar saúde, sabedoria, discernimento e entendimento. Dedico a minha família pelo apoio e compreensão nos momentos difíceis, com apoio incondicional nos, aos amigos de jornada que compartilharam os conhecimentos para que juntos pudéssemos alcançar um só objetivo, nossa tão sonhada formação acadêmica. Aos professores e orientadores dedicados e assíduos aos seus ensinamentos.

AGRADECIMENTOS

Deus sempre acima de todas as coisas, pela saúde, sabedoria e condições para continuar buscando a realização de sonhos.

Os professores, orientadora e em especial, ao professor Rafael Nascimento Magalhães, pelas orientações, apoio e para a elaboração e concretização dessa monografia.

A minha família por acreditar em mim, serem apoio fundamental, pela compreensão nos momentos difíceis, sendo eles meu alicerce para a concretização desse sonho.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para que fosse possível a minha formação durante essa jornada acadêmica, meu muito obrigada por cada passo que somamos juntos.

“Nenhuma Engenharia constrói caráter, mas com caráter se faz os melhores engenheiros”.

Jordan Lucas.

RESUMO

A construção civil está em constante desenvolvimento, a tecnologia traz consigo mudanças e modernidade, sendo essas, em sua maioria viáveis economicamente. O sistema construtivo proposto pelo engenheiro Jorgen Breuning, com estruturas de lajes tipo BubbleDeck, tendo como princípio a adição de esferas “*bubbles*” vazios, dentro das lajes, o que poderá proporcionar uma redução considerável do consumo de concreto. A pesquisa fez referência à análise experimental do comportamento estrutural de lajes tipo BubbleDeck. Objetiva-se realizar a análise do desempenho estrutural de lajes tipo Bubbledeck, através da utilização do software Sap 2000, a partir de modelos ensaiados em laboratórios, comparando-as em relação a lajes maciças, observando o comportamento estrutural ao estado limite de serviço. Buscando compreender como realmente se comporta uma estrutura de laje Bubbledeck com sua geometria real. A metodologia desenvolvida se baseou em referências bibliográfica, estudo existente, utilizando-se de um modelo de análise estrutural realizado como referência, para fins de calibração com o modelo a ser desenvolvido com a utilização do Software Sap 2000, comparando os deslocamentos verticais. Tendo como resultados conclusos que deverá ser considerado apenas um coeficiente para diminuir a rigidez da laje para que tenha o mesmo desempenho estrutural da laje convencional. Este trabalho avaliou o comportamento estrutural, em específico os deslocamentos verticais em uma laje, comparando-se com um ensaio realizado experimentalmente no laboratório da UNB. O presente trabalho, teve como referência apenas umas das lajes ensaiadas pelo autor SILVA (2016), como principal resultado a necessidade da utilização de fatores de redução de projeto, sendo sugeridos para compensar essas diferenças de resistência. Possibilitou analisar a falta de informações quanto a esse sistema no Brasil, bem como a não utilização do mesmo pela falta de conhecimento relacionado ao mesmo.

Palavras chaves: Método. Deslocamentos. Inovação. Sustentabilidade. Esferas.

ABSTRACT

Civil construction is constantly developing, technology brings changes and modernity, most of which are economically viable. The construction system proposed by engineer Jorgen Breuning, with BubbleDeck slab structures, with the principle of adding empty "bubble" spheres inside the slabs, which may provide a considerable reduction in concrete consumption. The research referred to the experimental analysis of the structural behavior of BubbleDeck slabs. The objective is to perform the analysis of the structural performance of Bubbledeck slabs, using the Sap 2000 software, based on models tested in laboratories, comparing them in relation to solid slabs, observing the structural behavior to the service limit state. Seeking to understand how a Bubbledck slab structure with its real geometry really behaves. The methodology developed was based on bibliographic references, an existing study, using a structural analysis model performed as a reference, for calibration purposes with the model to be developed using the Sap 2000 software, comparing vertical displacements. With the final results that should only be considered a coefficient to decrease the slab stiffness so that it has the same structural performance as the conventional slab. This work evaluated the structural behavior, specifically the vertical displacements in a slab, comparing it with a test carried out experimentally in the UNB laboratory. The present work had as reference only one of the slabs tested by the author SILVA (2016), as the main result the need to use design reduction factors, being suggested to compensate for these differences in strength. It made it possible to analyze the lack of information regarding this system in Brazil, as well as the non-use of it due to the lack of knowledge related to it.

Keywords: Method. Displacements. Innovation. Sustainability. Spheres.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FAEMA	Faculdade de Educação e Meio Ambiente
CADF	Centro Administrativo do Distrito Federal
DF	Distrito Federal
LVDT	Transdutores de Variação de Deslocamento Linear
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
MEF	Métodos de Elementos Finitos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Edifício Milenium Tower.....	20
Figura 2 - Le Coie Hotel, Jersey UK- Reino Unido.....	21
Figura 3 - Figura 3 - Reino Unido- Torre Piemonte, Torino- Itália.....	21
Figura 4 - Execução da Sede da Odebrecht.....	22
Figura 5 - Sede da Empresa Odebrecht Brasil.....	23
Figura 6 - Etapas construtiva do Novo centro administrativo.....	24
Figura 7 - Etapas construtiva do Novo centro administrativo.....	24
Figura 8 - Módulo de laje Bubbledeck.....	26
Figura 9 - Exemplo de laje BubbleDeck com pré-laje.....	27
Figura 10 - Método dos painéis acabados.....	28
Figura 11 - Componentes do Sistema Bubbledeck.....	28
Figura 12 - Placa pré-moldada concretada.....	29
Figura 13 - Dimensões das Lajes ensaiadas.....	42
Figura 14 - Laje Maciça de Referência RSF28. Dimensões em (mm).....	43
Figura 15 - Posicionamento dos LVDT's.....	43
Figura 16 - Detalhes das Lajes Bubbledeck.....	43
Figura 17 - Posição dos carregamentos na laje Bubbledeck.....	44
Figura 18 - Detalhes da armadura de flexão superior e inferior, laje RSF28.....	44
Figura 19 - Detalhes da armadura de flexão, laje RSF28.....	45
Figura 20 - Detalhes da laje de Flexão Armadura Superior e inferior BD28F1.....	45
Figura 21- Detalhes da laje de Flexão Armadura BD28F1.....	45
Figura 22- Posicionamento dos LVDT's.....	46
Figura 23 - Posicionamento dos Extensômetros no concreto.....	47
Figura 24 - Posicionamento dos Extensômetros na armadura de Flexão.....	47
Figura 25 - Gráfico Tensão-deformação do aço Ø6mm CA-60.....	48
Figura 26 - Gráfico Tensão-deformação do aço Ø8mm CA-60.....	49
Figura 27 - Gráfico Tensão-deformação do aço Ø8mm CA-50.....	49
Figura 28 - Elemento Shell Quadrilateral de 4 nós.....	51
Figura 29 - Modelo no programa computacional Laje RSF28.....	51
Figura 30 - Modelo no programa computacional Laje RSF28.....	52
Figura 31 – Gráfico deslocamento verticais (laje RSF28, SAP2000).....	53
Figura 32 - Gráfico Deformações na armadura de Flexão (laje RSF28, SAP2000) ..	54

Figura 33 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje RSF28, LVDT01 SAP2000).....	54
Figura 34 - Gráfica comparação dos deslocamentos verticais (laje RSF28, LVDT02 SAP2000).....	55
Figura 35 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje RSF28, LVDT03 SAP2000).....	55
Figura 36 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje RSF28, LVDT04 SAP2000).....	55
Figura 37 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje RSF28 LVDT05 SAP2000).....	56
Figura 38 - Gráfica comparação deformação nas armaduras longitudinal de flexão (laje RSF28, EF01).....	57
Figura 39 - Gráfico comparativo de deformação nas armaduras longitudinal de flexão (laje RSF28, EF02).....	57
Figura 40 - Gráfico de comparação deformação nas armaduras longitudinal de flexão (laje RSF28, EF03).....	58
Figura 41 - Gráfico de comparação deformação nas armaduras longitudinal de flexão (laje RSF28, EF04).....	58
Figura 42 - Gráfico de comparação deformação nas armaduras longitudinal de flexão (laje RSF28, EF05).....	59
Figura 43 - Gráfico de comparação deformação nas armaduras longitudinal de flexão (laje RSF28, EF06).....	59
Figura 44 - Gráfico, deslocamentos verticais (laje BD28F1, SAP2000)	60
Figura 45 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje BD28F1, LVDT01 SAP2000).....	61
Figura 46 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje BD28F1, LVDT02 SAP2000).....	61
Figura 47 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje BD28F1, LVDT03 SAP2000).....	62
Figura 48 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje BD28F1, LVDT04 SAP2000).....	62
Figura 49 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje BD28F1, LVDT05 SAP2000).....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tipos de lajes Bubbledeck comercializadas.....	30
Tabela 2- Características gerais para aplicação no sistema Bubbledeck	31
Tabela 3- Relatório de testes comparativos entre laje maciça e Bubbledeck ..	31
Tabela 4- Relatório da deformação obtida da Bubbledeck.....	33
Tabela 5- Descrição das lajes ensaiadas.....	36
Tabela 6- Deslocamentos verticais	40
Tabela 7- Descrição das instrumentações utilizadas	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO PRIMÁRIO	18
2.2	OBJETIVOS SEGUNDÁRIO	18
3	REVISÃO DE LITERATURA	19
3.1	O HISTÓRICO DA BUBBLEDECK NO MUNDO	19
3.2	O HISTÓRICO DA BUBBLEDECK NO BRASIL	22
3.3	VANGATENS E DESVANTAGENS DESSE MÉTODO	24
3.4	SISTEMAS CONSTRUTIVOS BUBBLEDECK	25
3.4.1	Sistemas de Módulos Reforçados	26
3.4.2	Método Com Pré-lajes	26
3.4.3	Método Com Painéis Acabados	27
3.5	MÉTODOS EXECUTIVO	28
3.6	DIMENSIONAMENTO	29
3.7	ESTUDOS E ENSAIOS REALIZADOS	32
3.8	CRITÉRIOS A SEREM SEGUIDOS NO DIMENSIONAMENTO DEAS LAJES	34
3.8.1	Deslocamentos-Limites	34
3.8.2	Estados-Limites	35
3.9	PESQUISA COMPARATIVA	36
4	METODOLOGIA PROPOSTA	41
4.1	MODELOS EXPERIMENTIAS	41
4.1.1	Dimensões das Lajes	42
4.1.2	Armaduras	44
4.1.3	Instrumentação	46
4.1.4	Características do Concreto	47
4.1.5	Características do Aço das Armaduras de Flexão	48
5	MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS	49
5.1	ANÁLISE NUMÉRICA MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS	50
5.2	GEOMETRIA DO MODELO COMPUTACIONAL	51
5.2.1	Definições de Malha	51
6	RESULTADOS	53
6.1	LAJE MACIÇA DE REFERÊNCIA	53

6.1.1	Modelo Computacional.....	53
6.1.1.1	Deslocamentos Verticais.....	53
6.1.2	Deformação na Armadura Longitudinal de Flexão.....	53
6.1.2.1	Deformação na Armadura Longitudinal de Flexão	53
6.1.3	Comparação dos Resultados dos Deslocamentos Verticais	54
6.1.4	Comparação dos Resultados dos Deslocamentos Verticais	57
6.2	LAJE BUDDLEDECK	60
6.2.1	Modelo Computacional.....	60
6.2.1.1	Deslocamentos Verticais.....	60
6.2.2	Comparação dos resultados dos deslocamentos verticais	61
7	CONCLUSÃO.....	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado e a crescente migração para os centros urbanos, trazem como consequências o alto índice de consumo de materiais para construção civil, com isso, gera maior demanda por energia, transporte, alimentação e infraestrutura. A construção civil é um importante setor responsável por esse crescimento. Os órgãos governamentais buscam diariamente direcionar planos de ações com estratégias focadas em diminuir os impactos causados por esse desenvolvimento.

Através dessa crescente demanda, cobranças feitas por organizações e ajuda de pesquisadores, desta área, tornou-se necessária a busca por tecnologias e materiais que reduzem o consumo de energia, os recursos naturais e reduzem o impacto no meio ambiente, com o aproveitamento de materiais. Tornou-se essencial avaliar o ciclo de vida dos materiais e seus reais efeitos considerando toda sua cadeia.

Essas pesquisas têm fundamentais, diante da busca por materiais inovadores que auxiliam os projetistas a optarem por estruturas sustentáveis, tanto de materiais quanto na diminuição de impactos no meio ambiente.

O mercado da construção vem em busca de novas formas econômicas de atuação no ramo da construção, sendo necessário o entendimento de novos tipos de lajes que vem mostrando eficiente e se destacando em países como Holanda, Dinamarca, Canadá, Estados Unidos. Sendo exposto suas características positivas como durabilidades, eficiência e economia, por meio da introdução de novos materiais, diferentes técnicas de construção ou execução, que resultam em uma maneira mais eficiente sem aumentar o risco ou comprometer a segurança dos edifícios.

As lajes maciça, necessitam que suas espessuras sejam muito elevadas, ou seja, o uso do concreto inserido em lugares que não ha necessidade, aumentando o peso da estrutura.

De acordo com Silva (2011) O concreto deve ser usado somente em regiões que estejam comprimidas, em função do mesmo não ter alta resistência a tração. O autor comenta que se torna desnecessário o uso do concreto em locais que não possuem função estrutural, pois além de ter o consumo de material desnecessário, ainda aumenta o peso da estrutura.

Na tecnologia Bubbledeck nestas áreas onde o concreto não tem função estrutural, nas regiões que são submetidos a tração são colocadas esferas, bolhas vazias, plásticos pré-espaçados, reduzindo significativamente o uso de concreto. São colocadas ainda duas malhas de aço, uma na parte inferior da laje e outra na parte superior, mantendo as com seções sólidas, ou seja, onde existem maiores tensões aplicadas. Essa inovação faz toda a diferença no processo construtivo, fazendo que toda as etapas sejam industrializadas, obtendo um aumento na produtividade de execução.

O sistema construtivo BubbleDeck é um método totalmente inovador, criado para eliminar o volume de placas de concreto de lajes, e ainda assim fornecer placas mais leves e mais fortes. Para estudos levantados em relação a lajes bubbledeck.

Segundo Freire (2009), o uso dessas esferas plásticas no interior das lajes chega a eliminar 35% do peso de uma laje normal, retirando assim as restrições de altas cargas permanentes e até mesmo pequenos vãos, tendo assim aproveitamento em grandes vãos.

No Brasil existe resistência quanto a utilização dessa tecnologia, falta de textos normativos que referem a laje específica, algumas das alegações dos engenheiros seriam quanto aos fatores de redução de rigidez que deverão ser utilizadas entre outros parâmetros. Os cálculos descritos para seu dimensionamento são especificados segundo a NBR 6118 (2014), trata do dimensionamento para lajes convencionais, ou seja, flecha imediata e flecha diferida não são previstas especificamente para as lajes Bubbledeck. Portanto com a simulação de um modelo real, utilizando um software para realização de uma análise numérica seria possível contribuir com informações que venham a ser utilizadas em projetos quanto ao seu desempenho estrutural.

Este trabalho analisou o comportamento estrutural, partindo do princípio de deslocamento vertical ocorrido em uma laje maciça e Bubbledeck, comparando seus resultados, com as mesmas lajes ensaiadas em um laboratório através do autor Silva (2016), sendo realizado através da análise numérica com o método dos elementos finitos sendo o software utilizado o SAP 2000.

Embora a laje BubbleDeck, tenha grandes benefícios ainda é muito difícil de encontrar bibliografias que contribuam, bem como a resistência e “ignorância” pôr falta de conhecimentos em relação à segurança. Essa monografia tem intuito de colaborar com a pesquisa, buscando meios alternativos, obtenção de fatores de

segurança que poderão ser aplicados na laje Bubbledeck, para apresentação de resultados satisfatórios como, aumento da resistência, comparados com a laje maciça que são lajes normatizadas no Brasil. Sendo realizado no presente trabalho a análise computacional de esforços atuantes e comportamento estrutural através de deslocamentos via análise numérica por elementos finitos para obter os deslocamentos verticais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO PRIMÁRIO

Realizar a análise do desempenho estrutural de lajes tipo Bubbledeck, através da utilização do software Sap 2000, a partir de modelos ensaiados em laboratórios.

2.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIO

Como objetivos específicos, pretende-se:

- Compreender as características da laje, onde serão produzidas a partir de uma laje obtida experimentalmente em laboratório podendo assim calibrar o modelo para determinação de parâmetros.
- Realizar análise numérica através da adaptação de modelos de elementos finitos para simulação da laje Bubbledeck.
- Observar o deslocamento da laje Bubbledeck de forma vertical.
- Compreender como realmente se comporta uma estrutura de laje Bubbledeck com sua geometria real.

3 REVISÃO DE LITERATURA

No referido capítulo serão apresentados os tipos e características das lajes Bubbledeck, detalhando a descrição das lajes ensaiadas pelo autor, observado também todas as recomendações propostas pelas normas vigentes para lajes maciças.

3.1 O HISTÓRICO DA BUBBLEDECK NO MUNDO

A busca constante pela economia, a sustentabilidade não é um assunto novo, há muito tempo a sociedade vem buscando formas inovadoras na construção civil, contudo essas soluções inovadoras devem ser aliadas a conforto, segurança e sua utilização também deve ocorrer em grande escala.

O BubbleDeck é uma inovação construtiva através da utilização de um sistema de placas que se tornou muito popular na Europa e no mundo na última década. O sistema foi inventado na Dinamarca depois que um concurso patrocinado pelo governo procurou novas maneiras de construir edifícios e, em particular, novas maneiras de aumentar a flexibilidade e a eficiência do projeto usando técnicas pré-fabricadas.

foi criada pelo dinamarquês Jorgen Breuning em 1980, a qual veio se tornar a Companhia BubbleDeck Internacional em 1990, sua projeção se comportam igualmente a lajes maciças homogêneas, por esse motivo, tem sido aceita em vários países como: Austrália; Nova Zelândia; Bélgica; Reino Unido; Dinamarca; Suíça; Itália; Áustria; Alemanha; Hungria; Irlanda; Ilhas Aland; Lituânia; Emirados Árabes; Arábia Saudita; Barein; Líbano; Catar; Holanda; Canadá; Estados Unidos; Romênia; Rússia; Cingapura; África do Sul; Inglaterra; Vietnã, e Brasil (BUBBLEDECK-UK, 2008).

Sua execução consiste basicamente na inserção de esferas plásticas em lajes de concreto, espaçadas entre si uniformemente, sendo as distâncias determinadas de acordo com o diâmetro das esferas a serem utilizadas, são inseridas entre duas telas soldadas e fixadas em treliças.

As esferas são introduzidas na interseção da malha soldada que ocupa a área de concreto que pode ser removida sem que venha a prejudicar o desempenho estrutural, obtendo assim menores gastos de materiais, aumento da produtividade devido em consequência do processo industrializado e com isso redução significativa do impacto ambiental. Entre as obras que construíram utilizando a

tecnologia Bubbledeck, algumas que se destacaram no Brasil e no mundo, serão descritas a seguir:

Segundo o Bubbledeck (2019), o primeiro edifício alto que fez uso desse sistema de lajes foi o edifício Millenium Tower, construída em Roterdã, na Holanda, entre 1998 e 2000. O edifício consiste em 34 andares e 131 metros de altura, mesmo sendo um sistema novo para aquela época o Bubbledeck foi escolhido justamente pelas contribuições com o meio ambiente, redução no tempo de construção e pela diversidade que o sistema possuía, ou seja sua flexibilidade de layout. Em sua construção houve uma redução de 10 para 4 dias de tempo de construção por andar, foram economizadas 500 viagens de caminhão, uma menor utilização de maquinário na obra, e o grande benefício foi o aumento de dois andares, quando ainda estava sendo realizando metade da construção em relação ao projeto inicial, em ocorrência das vantagens que o sistema Bubbledeck trouxe, somente com a não utilização de vigas foi possível a inserção desses andares. A figura 1 exibe o edifício Millenium Tower.

Figura 1 - Edifício Milenium Tower.



Fonte: Bubbledeck Brasil (2019)

De acordo com Bubbledeck (2019), no Reino Unido o edifício Le Coie Hotel, Jersey UK foi inicialmente, projetado para a utilização de lajes alveolares, mas, no entanto, não chegou a ser executado sendo substituído pelo sistema Bubbledeck em razão da sua economia de tempo, obtendo assim o término da construção em 6

semanas antes do prazo, uma economia de 400 mil Libras Esterlinas em 7.8000m² o equivalente a 3% do total de investimento da obra. Na figura 2 é mostrado o edifício localizado no Reino Unido.

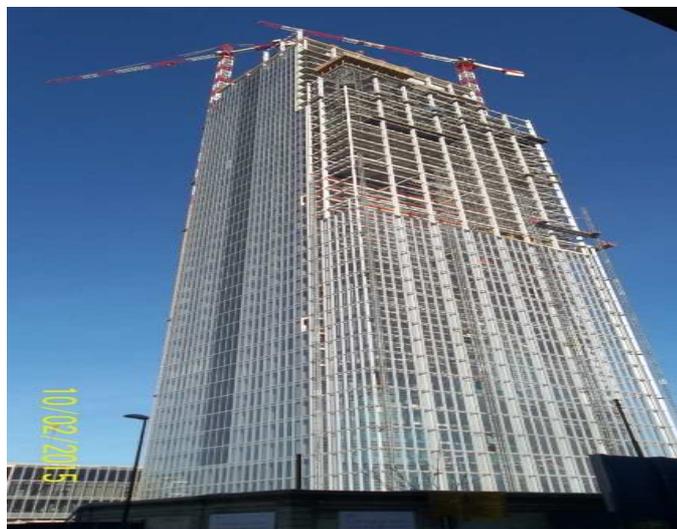
Figura 2 - Le Coie Hotel, Jersey UK- Reino Unido



Fonte: Bubbledeck Brasil (2019)

Na Itália a Torre Piemonte, Torino foi construído com 209 metros de altura, utilizando vãos de 14 metros e com a aplicação de pretensão em uma laje BD400, na figura 3 pode ser visto a torre na Itália.

Figura 3 - Figura 3 - Reino Unido- Torre Piemonte, Torino- Itália.



Fonte: Bubbledeck Brasil (2019)

3.2 O HISTÓRICO DA BUBBLEDECK NO BRASIL

No Brasil, a primeira obra a fazer a implantação das lajes Bubbledeck, foi a nova sede Odebrecht em Salvador, BA. A ideia da utilização em laje Bubbledeck foi obtida quando a empresa conheceu a tecnologia e inseriu em seu projeto ainda no início, e implantou com o intuito de testar a tecnologia na construção de sua propriedade. Segundo Freire (2009), o uso das lajes Bubbledeck de 23 cm com esferas de 18 cm fez com que eliminasse as vigas internas e o engrossamento dos capitéis de lajes maciça embutidos nas áreas mais aproximadas aos pilares. O detalhamento da armadura foi executado com a consultoria realizada pelo representante da Bubbledeck Internacional, atendendo também a NBR 6118 (NBR 6118, 2014). A figura 4 e 5 mostram umas das novas etapas da sede da Odebrecht em Salvador.

Figura 4 - Execução da Sede da Odebrecht



Fonte: Bubbledeck Brasil (2019).

Figura 5 - Sede da Empresa Odebrecht Brasil



Fonte: Bubbledeck Brasil (2019)

Outra obra que utilizou a tecnologia Bubbledeck foi o Novo Centro Administrativo do Distrito Federal (CADF) – Brasília/DF, no projeto inicial pretendia-se implantar as lajes Nervuradas (que consiste no processo de montagem de formas diretamente sobre o escoramento) porém apresentou-se barreiras na execução haja vista o tamanho do empreendimento, sendo 160 mil m² em lajes, e o curto período de 24 meses para a execução, a partir dessas barreiras foi escolhido o sistema Bubbledeck onde teve 170 mil m² de área construída, sendo 16 prédios (4 torres de 15 andares e 10 torres de 4 e 6 andares). Foi implantada a fábrica no canteiro com capacidade de 1.000 m²/dia de painéis BubbleDeck, tendo em seu cronograma a produção 5.000m² por semana de laje. Com isso houve uma redução de 35% de concreto utilizado (caminhões, bomba e mão de obra), 2500 viagens de caminhão economizadas, redução de 60% da quantidade de escoramento em relação ao projeto original tendo assim evitado o corte de aproximadamente 2.800 árvores com o uso de pré-lajes (BUBBLEDECK 2019). A figura 6 e 7 mostram as etapas construtivas do novo centro administrativo.

Figura 6 - Etapas construtiva do Novo centro administrativo.



Fonte: Bubbledeck Brasil (2019)

Figura 7 - Etapas construtiva do Novo centro administrativo.



Fonte: Bubbledeck Brasil (2019)

Em razão da falta de conhecimento em relação ao comportamento estrutural das lajes, variados estudos estão sendo realizados para um melhor entendimento desta técnica inovadora, e comparações com outras lajes já conhecidas.

3.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DESSE MÉTODO

Segundo a Bubbledeck (2019), inúmeros podem ser os benefícios de aplicar este método construtivo, dentre eles, estão principalmente:

- Liberdade nos projetos – layouts flexíveis que facilmente se adaptam a layouts curvos e irregulares;
- Redução do peso próprio – 35% menor, permitindo redução nas fundações;
- Eliminação de vigas – maior rapidez e economia pela eliminação das vigas e, conseqüentemente, pela ausência do serviço de alvenaria e instalação;
- Eliminação de paredes de apoio – facilidade de metodologia construtiva;
- Redução do volume de concreto – 1 kg substitui em média 60 kg de concreto;
- Ambientalmente adequado – redução de energia e emissão de CO₂.

Como desvantagens da utilização desse método, podem ser citados os seguintes:

- A sua não normatização em alguns países, entre esses pode se destacar o Brasil;
- Necessidade de mão de obra específica;
- Necessidade de cuidados diferenciados durante sua locomoção;
- Dificuldades durante a execução, em razão de a mesma vir especificados de fábrica, largura mínima e espaçamento;

3.4 SISTEMAS CONSTRUTIVOS BUBBLEDECK

O sistema de construção é composto por pilares, pré-lajes de concreto armado colocadas sobre escoramento metálico e após essa etapa faz-se a complementação com o concreto, ou melhor o tampo, deixando a laje solidificada. O modelo construtivo tipo BubbleDeck é realizado através de três maneiras construtivas: o método com a utilização de módulo reforçado, método com painéis acabados e método com pré-lajes. A seguir o detalhamento de cada uma das etapas descritas.

3.4.1 Sistemas de Módulos Reforçados

O Sistema construtivo de módulo é composto pelas esferas plásticas, treliça e telas metálicas, consiste basicamente em posicionar as esferas plásticas fazendo com que elas fiquem presas dentro de gaiolas metálicas, e assim constituírem módulos sendo colocados sobre formas de madeiras convencionais (assoalhos), sendo realizado a concretagem em dois momentos específicos. Em primeiro momento, é feito a concretagem com 60mm de espessura, evitando assim que essas esferas flutuem, no segundo momento faz-se a concretagem total da laje. Esses tipos de lajes podem ser melhor aplicados em obras de pequeno e médio porte ou em eventuais lugares de difícil acesso e movimentação, já que podem ser transportados e colocados manualmente (BUBBLEDECK BRASIL, 2019). A Figura 8 mostra um exemplo de módulo de laje BubbleDeck.

Figura 8 - Módulo de laje Bubbledeck



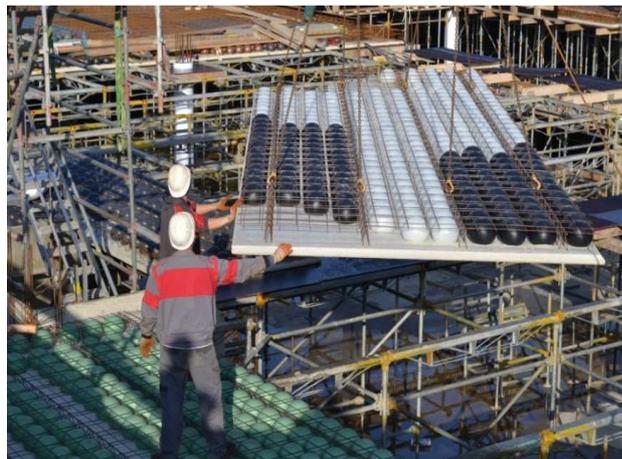
Fonte: Bubbledeck Brasil (2019)

3.4.2 Método Com Pré-lajes

Segundo o método Bubbledeck (2019), a sua principal característica é que o mesmo dispensa o uso de formas inferiores, ou seja, já possui o sistema de lajes pré-fabricadas já tendo uma espessura definida de 60mm, esse sistema pré-lajes são inseridas diretamente sobre as vigas metálicas e escoras. Depois de colocadas os painéis, são inseridas as armaduras de reforço e barras de ligação entre as

placas, dessa maneira conclui-se a concretagem. Esse método construtivo é o mais utilizado, por propiciar uma melhor adequação para qualquer tipo de piso, colocação de tubos e das instalações, porém para a sua utilização precisa do uso de guindastes para poder elevar as peças, já que possuem pesos elevados precisando assim espaço suficientes, o que acaba sendo utilizado em obras de grande porte. Como as peças são industrializadas também haverá uma considerável redução no tempo de montagem das mesmas. Esse tipo de método é ainda exclusivo da tecnologia Bubbledeck. A Figura 9 mostra uma laje *BubbleDeck* com pré-laje.

Figura 9 - Exemplo de laje BubbleDeck com pré-laje



Fonte: Bubbledeck Brasil (2019)

3.4.3 Método Com Painéis Acabados

O sistema com painéis acabados é considerado o sistema que desperta menos interesse a sua utilização, já que os mesmos possuem características parecidas com lajes maciças. Devido as lajes bubbledeck terem seus esforços mais concentrados em uma direção, fazendo assim com que precise do uso de vigas ou de paredes para suportes, já que o sistema integra os painéis acabados por completos, sendo entregues na obra com as armaduras de flexão e as barras de ligação posicionadas em seus devidos locais finais, com isso a laje já é entregue devidamente completa no local da construção, restando apenas fazer o içamento e posicionar no local. Na figura 10 é mostrado um exemplo de método dos painéis acabados.

Figura 10 - Método dos painéis acabados



Fonte: Bubbledeck Brasil (2019)

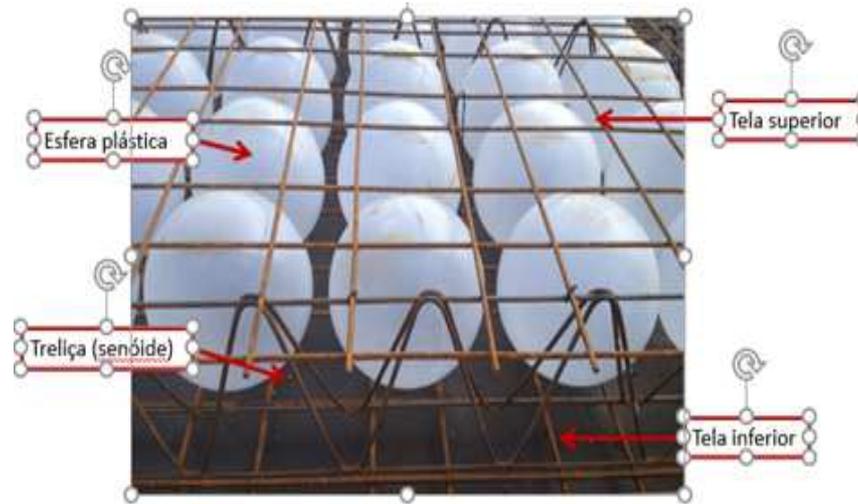
3.5 MÉTODOS EXECUTIVO

O método executivo de uma laje com painéis BubbleDeck é basicamente muito simples, que seguem os procedimentos, considerando que para cada tipo de obra utiliza-se um modelo do sistema Bubbledeck. Em geral a ordem de execução do sistema, consiste em:

- Realização do escoramento;
- Inserção dos módulos bubbledeck, que são elementos pré-fabricados;
- Armadura de ligação entre as malhas superiores e entre peças pré-fabricadas;
- Capitéis - Uma armadura extra de maior diâmetro na área dos pilares
- O Lançamento do concreto em primeiro e segundo estágio e remoção do concreto;

Para um melhor entendimento de cada peça formadora do sistema Bubbledeck, as figuras 11 e 12 ilustram cada uma.

Figura 11 - Componentes do Sistema Bubbledeck



Fonte: Bubbledeck Brasil (2019)

Figura 12 - Placa pré-moldada concretada



Fonte: Bubbledeck Brasil (2019)

3.6 DIMENSIONAMENTO

O sistema construtivo de lajes bubbledeck de acordo com Bubbledeck (2019) são dimensionadas da mesma forma que métodos convencionais de lajes lisas maciças, porém, com uma redução do peso próprio da estrutura. Já se pode encontrar pela norma alemã DIN 1045 (2001) e a norma britânica EN 13747 (2005) requisitos avaliados necessários para o dimensionamento do painel BB.

As áreas sólidas da laje serão projetadas a partir da capacidade de suporte. As partes maciças da laje são definidas a partir da capacidade de suporte de carga

cortante sem a utilização de armadura para resistir aos esforços de cisalhamento. Alguns parâmetros são definidos para serem adotados no sistema em relação as lajes maciças. Segundo a Bubbledeck Brasil (2019) os pontos a seguir são necessários em seu dimensionamento:

- Para o peso próprio deve-se utilizar uma carga reduzida, obtendo assim uma redução em seu peso próprio de um terço quando comparadas com a laje maciça de mesma altura, ou seja, o peso é aproximadamente de 65 % da laje maciça de mesma altura;
- No cálculo de flechas utilizar a rigidez a flexão de 0,9 em relação a uma laje maciça de mesma altura;
- A resistência ao corte do sistema Bubbledeck é proporcional a quantidade de concreto, portanto deve-se reduzir a resistência utilizando um fator de 0,6 comparado a uma laje maciça de mesma altura;
- Quando submetidas ao esforço cortante muito alto, deve ser mantido essas regiões totalmente sólidas, retirando assim o uso de esferas plásticas nessa região, ou aumentar a quantidade do aço de reforço ao esforço cortante, exemplo dessas regiões seriam próximos a paredes e pilares.

Bubbledeck (2019) informa que as dimensões das esferas e o espaçamento entre elas variam de acordo com a utilização no projeto, e são apresentados os tipos de lajes com variação na espessura, vãos alcançados, carga, e volume de concreto. A Tabela 1 apresenta dados dos diferentes tipos de laje.

Tabela 1- Tipos de lajes Bubbledeck comercializadas

Tipo	Espessura (cm)	Espessura média de concreto (cm)	(Φ) Esferas (mm)	Vãos indicados (m)	Peso da Laje BD (kg/m ²)
BD230	23	15,4	180	5 - 8	370
BD280	28	18,5	225	7 - 10	460
BD340	34	22,5	270	9 - 12	550
BD390	39	25,6	315	10 - 15	640
BD450	45	29,7	360	11 - 17	730

Fonte: Bubbledeck Brasil (2019)

Ou seja, para cada tipo de projeto deve ser analisado todos os aspectos, sendo que para um vão necessário deve-se através da tabela observar qual a espessura mínima da laje, os diâmetros a serem adotados pelas esferas, para enfim a execução do sistema construtivo.

Na Tabela 2, é possível identificar de acordo com os diâmetros dados todos os respectivos fatores de redução de peso, rigidez, e cortante que caracterizam as propriedades estruturais que são permitidas, adotando-as por metro quadrado, propostas pela Bubbledeck (2019).

Tabela 2- Características gerais para aplicação no sistema Bubbledeck

Diâmetro da esfera (m)	0,18	0,225	0,27	0,315	0,36	0,405	0,45
Mínimo Intereixo das Esferas (m)	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Número de Esferas (m ²)	25	16	11	8,16	6,25	4,94	4
Espessura Mínima da Laje (m)	0,23	0,28	0,34	0,4	0,45	0,52	0,58
Redução de Carga por Esfera (KN)	0,08	0,15	0,26	0,41	0,61	0,87	1,19
Redução Máx. de Carga (KN/m ²)	1,91	2,39	2,86	3,34	3,82	4,29	4,77
Fator para Rigidez	0,88	0,87	0,87	0,88	0,87	0,88	0,88
Fator para o Cortante	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Fator para o Peso	0,67	0,66	0,66	0,67	0,66	0,67	0,67

Fonte: BubbleDeck International (2019)

Os parâmetros comportamentais são apresentados em relação à resistência à flexão por exemplo, como mostrado na tabela 3, comparando a laje maciça e a laje Bubbledeck.

Tabela 3- Relatório de testes comparativos entre laje maciça e Bubbledeck

Em % de uma laje maciça	Laje BubbleDeck vs. Laje Maciça		
	Mesma capacidade de carga	Mesma rigidez a flexão	Mesmo volume de concreto
Capacidade de carga	100	105	150 *
Rigidez a flexão	90	100	300
Volume de concreto	66	69	100

* Na condição da mesma quantidade de aço.

Fonte: BubbleDeck International (2019)

Considerando que em razão da inserção de esferas plásticas a Bubbledeck (2019), diz que ela não apresenta aspectos tão rígidos quando comparadas com a laje maciça. Contudo quando se diz respeito às deflexões elas ainda apresentam menores deflexões se for comparada com a laje maciça, isso ocorre em virtude da compensação que se dá pela diminuição de quase um terço do peso próprio da laje, resultando assim, em deflexões menores.

Portanto para a escolha do tipo de laje Bubbledeck o primeiro questionamento e preocupação é o da limitação das flechas. Portanto, o vão máximo utilizado para cada tipo de laje é determinado pela razão entre o menor comprimento (L) do vão e a espessura (d) da laje (L/d). O fabricante sugere as seguintes razões de L/d para os diferentes tipos de vãos:

$L/h \leq 30$ – vãos simples

$L/h \leq 39$ – vãos contínuos

$L/h \leq 15$ – balanços

3.7 ESTUDOS E ENSAIOS REALIZADOS

Variados estudos e ensaios foram feitos na Europa com a finalidade de verificar a eficiência do sistema Bubbledeck. Um dos aspectos que mais foram levados em consideração é a ruptura que ocorre por punção, que pode levar a estrutura a ruptura, ou seja, a separação total entre o pilar e laje. Como Lima (2015) destacou, a rigidez da estrutura é diminuída em comparação a outros sistemas, sendo a área entre pilar e viga ter a necessidade de um estudo específico.

Ensaio realizado pela Eindhoven *University of Technology* mostram que as lajes Bubbledeck resistem a 81% dos esforços de cisalhamento e 91% da resistência à punção que uma laje maciça de mesma espessura, resistências maiores que o esperado para esse tipo de laje (GUEDES et al. 2015).

De acordo com a Bubbledeck (2019) foi realizado um ensaio de *Prova de Carga Estática em Laje* na obra do Centro Administrativo do Distrito Federal com a finalidade de avaliar a capacidade de carga e o comportamento estrutural da laje de concreto tipo Bubbledeck do segundo pavimento do edifício do Centro Administrativo do Distrito, Brasília – DF.

Com a utilização de deflectômetros para medição de deslocamentos nas lajes, para monitoramento dos deslocamentos e aberturas de fissuras foi realizado um ensaio de prova de carga estática em uma laje do tipo BD 280mm, onde a prova de carga foi realizada de acordo com a norma específica NBR 9607 (2019). Os ensaios investigam e analisam a avaliação e comprova o real comportamento estrutural das lajes quando submetidos a esforços solicitantes.

O ensaio foi realizado utilizando o carregamento previsto em projeto, com sobrecarga de utilização de 300 kgf/m². Para compensar os vazios deixados pelas piscinas, foi feito um acréscimo de 10% na carga. Sendo assim, foi realizado o ensaio com 330 kgf/m². Ainda de acordo com a Bubbledeck (2019), o carregamento e o descarregamento foram feitos em quatro estágios, entre foram feitos a estabilização durante doze horas. Para obter os deslocamentos foram utilizados doze deflectômetros. Após o emprego das cargas não ocorreu aumento ou surgimento de fissuras sobre as lajes. Os engenheiros calculistas previram alguns resultados, onde pode ser comparado com os resultados obtidos a partir da realização do ensaio, que pode ser observado na tabela 4.

Tabela 4- Relatório da deformação obtida da Bubbledeck

	Deformação medida	Deformação esperada	Diferença percentual
Laje 1 (A)	0,55 mm	1,73 mm	-68,2%
Laje 2 (C)	0,86 mm	2,65 mm	-67,5%

Fonte: BubbleDeck International (2019)

Após a conclusão do descarregamento não foram observados deslocamentos residuais em nenhum dos pontos monitorados, podendo concluir que a laje apresentou comportamento elástico. Não houve abertura das fissuras existentes e nem surgiram novas fissuras com a aplicação do carregamento. Diante dos

resultados foi observado que a laje monitorada cumpriu com o previsto em normas vigentes.

3.8 CRITÉRIOS A SEREM SEGUIDOS NO DIMENSIONAMENTO DAS LAJES.

Existem algumas especificações que devem ser obedecidas considerando as normas vigentes (NBR 6118, 2014). Conforme descrito a seguir:

3.8.1 Deslocamentos-Limites

Segundo a NBR de nº 6118 (2014), o “deslocamentos-limites são valores práticos utilizados para a verificação em serviço do estado-limite de deformações excessivas da estrutura. Para os efeitos desta Norma, são classificados nos quatro grupos básicos a seguir relacionados: ”.

- a) aceitabilidade sensorial: o limite é caracterizado por vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável.
- b) efeitos específicos: os deslocamentos podem impedir a utilização adequada da construção;
- c) efeitos em elementos não estruturais: deslocamentos estruturais podem ocasionar o mau funcionamento de elementos que, apesar de não fazerem parte da estrutura, estão a ela ligados;
- d) efeitos em elementos estruturais: os deslocamentos podem afetar o comportamento do elemento estrutural, provocando afastamento em relação as hipóteses de cálculo adotadas. Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-as ao modelo estrutural adotado (ABNT, 2014).

São apresentados os deslocamentos limites que são determinados pela norma de 2014, conforme pode ser observado na tabela 5 a seguir.

Tabela 5- Deslocamentos-limites

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$l/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$l/350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$l/250^a$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$l/350+$ contraflecha b
			Ocorrido após a construção do piso	$l/600$
Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento	
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$l/500^c$ e 10 mm e $\theta = 0,0017 \text{ rad}^d$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$l/250^c$ e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente ($\psi_1 = 0,30$)	$H/1700$ e $H/850^e$ entre pavimentos f
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$l/400^g$ e 15 mm

Fonte: ABNT (2014, p. 77)

3.8.2 Estados-Limites

A NBR 6118/2014, recomenda que a segurança das estruturas de concreto seja verificada para:

- Estado-limite ultimo da perda do equilíbrio da estrutura, admitida como corpo rígido;
- Estado-limite ultimo de escoamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, devido as solicitações normais e tangenciais, admitindo-se a redistribuição de esforços internos, desde que seja respeitada a capacidade de adaptação plástica na seção 14, e admitindo-se em geral, as verificações separadas das solicitações normais e tangenciais; todavia, quando a interação entre elas for importante, ela estará explicitamente indicada nesta Norma (NBR 6118/2014)

Estados-limites de serviço são aqueles relacionados ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, seja em relação aos usuários, seja em relação as máquinas e aos equipamentos suportados pelas estruturas ((ABNT, 2014, p. 55).

3.9 PESQUISA COMPARATIVA

Silva (2016) avaliou experimentalmente o comportamento estrutural de modelos em escala real das lajes do tipo *Bubbledeck*, tendo feito a simulação das lajes sujeitas a esforço de flexão, onde foram ensaiadas 4 tipos de lajes, sendo uma laje maciça e três lajes *Bubbledeck* todas de mesmas dimensões a qual foram ensaiadas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília– UnB, sendo os carregamentos aplicados estático e iguais, a laje maciça foi utilizada como referência para os esforços a flexão obtidas nas lajes *Bubbledeck*, onde posteriormente os resultados encontrados foram comparados com a laje de referência para análise dos esforços internos. Silva (2016) avaliou as quatro lajes que são descritas na tabela 6, apenas alterando as distâncias nos encontros das pré-lajes.

Tabela 6- Descrição das lajes ensaiadas

Laje	Descrição
RSF28	Laje maciça
BD28-F1	<i>Bubbledeck</i> sem junta, com pré-laje pré-moldada
BD28-F2	<i>Bubbledeck</i> sem junta, com pré-laje pré-moldada
BD28-F3	<i>Bubbledeck</i> com junta, com pré-laje pré-moldada e maior região maciça na junta de ligação

Fonte: Silva (2016)

O autor Silva (2016) utilizou nas distribuições das armaduras de flexão na parte inferior telas de 8,0mm de diâmetro e na parte superior 6,0mm de diâmetro, em ambas as direções, sendo o aço adotado o CA60. E para uma perfeita ancoragem utilizou-se barras em forma de U em aço CA50 cujo diâmetro foi de 8mm nas extremidades.

Como instrumentação Silva (2016), preparou sete LVDT's (transdutores de variação de deslocamento linear) para medir os deslocamentos verticais. Para acompanhar as deformações nas armaduras de flexão durante a realização da experimentação foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EER), variando assim as posições dos mesmos, cujos resultados das deformações foram realizados através de uma média aritmética dos valores obtidos nos extensômetros.

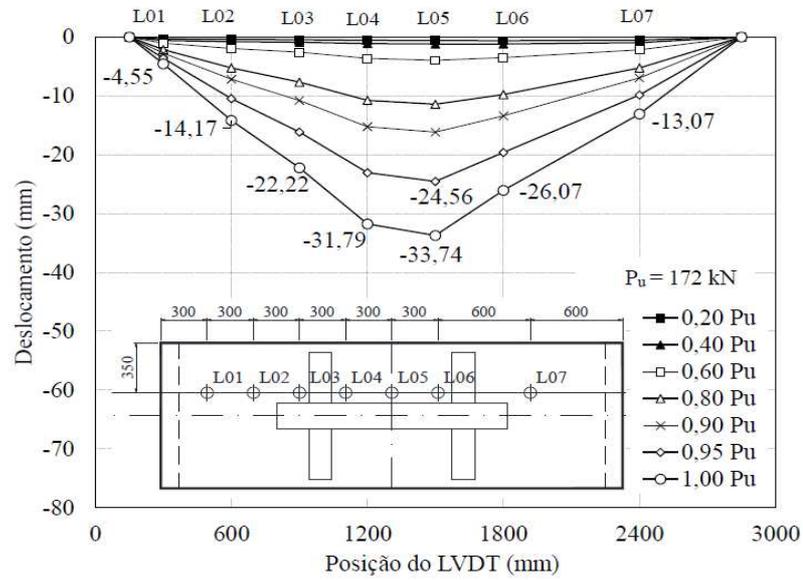
Quanto as deformações específicas do concreto foram obtidas pelas inserções de extensômetros colocados no centro e em cima da laje.

Para que pudesse obter os deslocamentos nas lajes o autor posicionou os 7 LVDT's ao longo da parte superior, e os monitoramentos foram sempre iguais em cada etapa de carregamento. Durante a aplicação das cargas como as lajes RSF28 e BD28-F1 se romperam de forma brusca, o autor não conseguiu monitorar de maneira descendente os deslocamentos. Nas lajes RSF28 e BD28-F1, foram observados que até a etapa de carga de 17 KN, as lajes tiveram deslocamentos muito parecidos, isso se deu pelo fato de as mesmas apresentarem iguais taxas de armaduras e tendo em vista que nesse carregamento a estrutura ainda está no regime linear, e a medida que o carregamento tende a aumentar o concreto passa a se apresentar na fase de plastificação.

Foi observado pelo autor Silva (2016) que o carregamento necessário no qual se obteve a fissuração foi em média de 17,5KN, tendo a partir desse momento variações nos deslocamentos, sendo que a instrumentação colocada no centro da laje ocorria um maior deslocamento, isso se deu pelo fato da falta de rigidez entre os painéis.

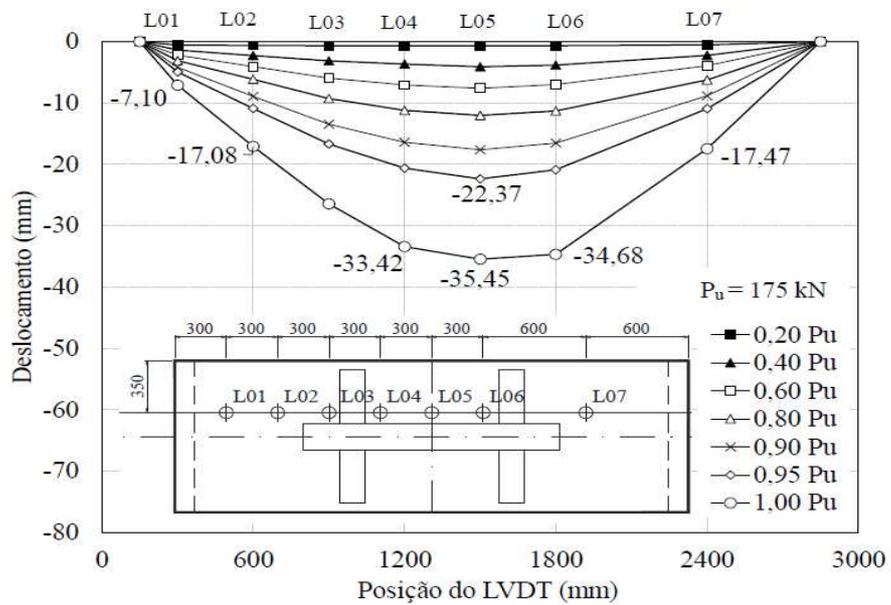
De acordo com o autor a laje RSF-28 mostrou um deslocamento na faixa de 33,74mm conforme pode ser visto no gráfico 1, sendo esse deslocamento menor do que ocorreu na laje BD28 -F1, onde a mesma apresentou um deslocamento de 35,45mm, fato esse que pode ser observado pelo gráfico 2, atribuindo esse fato em virtude da grande quantidade de vazios que contém nas lajes Bubbledeck. As duas lajes atingiram deslocamentos máximos no LVDT-L05.

Gráfico 1- Deslocamentos da laje RSF28



Fonte: Silva (2016)

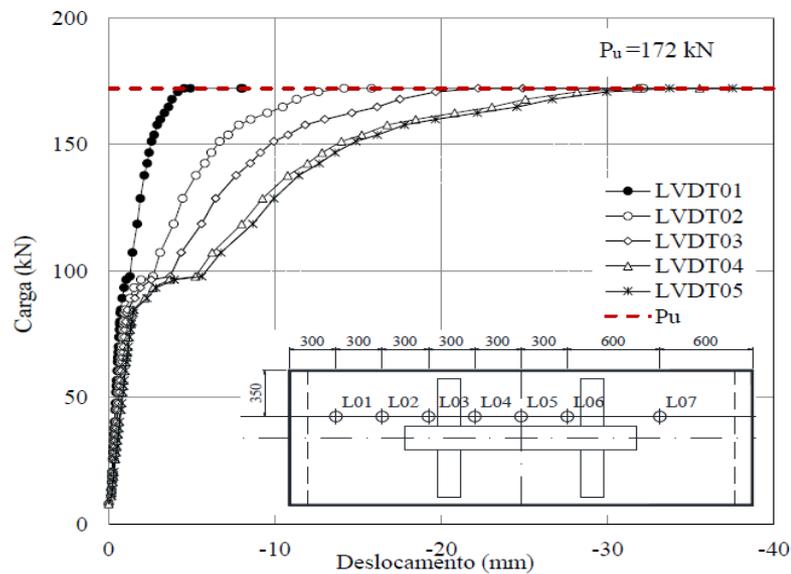
Gráfico 2- Deslocamentos da laje BD28-F1



Fonte: Silva (2016)

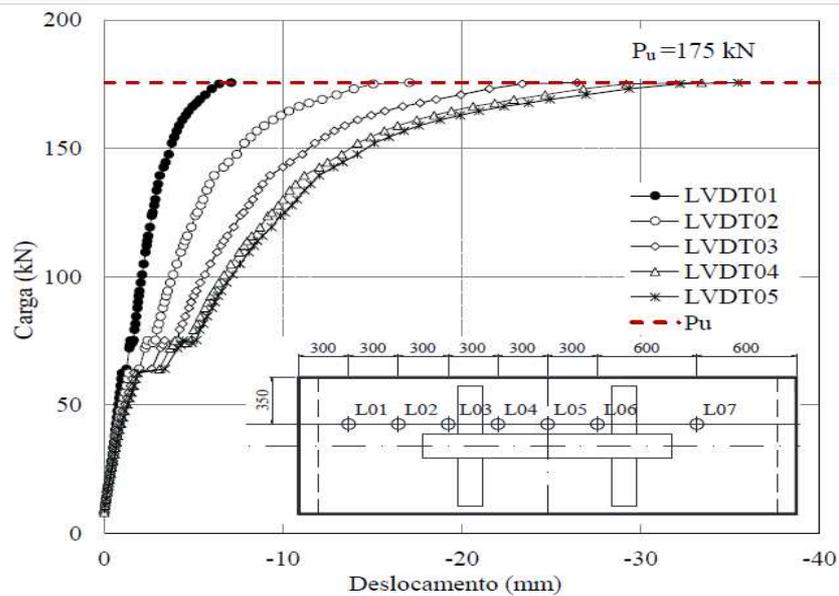
Foram apresentados os deslocamentos sobre as lajes em relação a carga aplicada nos gráficos acima 3 e 4 das lajes Bubbledeck e laje maciça.

Gráfico 3- Carga deslocamento modelo RSF28



Fonte: Silva (2016)

Gráfico 4- Carga deslocamento modelo BD28-F1



Fonte: Silva (2016)

Nos gráficos apresentados é possível notar que para o LVDT-05 o qual foi posicionado no centro da laje apresentaram comportamento estrutural em relação a deslocamentos muito parecidos para um mesmo carregamento.

São apresentados na tabela 7 os valores de deslocamentos verticais das lajes na carga média de fissuração, δr , na carga de escoamento da armadura de flexão, δy , e no estado limite último, δu .

Tabela 7- Deslocamentos verticais

Laje	$\delta_r (mm)$	$P_r (kN)$	$\delta_y (mm)$	$P_y (kN)$	$\delta_u (mm)$	$P_u (kN)$
RSF-28	4,11	20,6	5,61	98	33,75	172
BD28-F1	4,20	18,3	5,6	62	35,45	175
BD28-F2	2,70	16,2	5,1	108	18,68	148
BD28-F3	2,05	19,1	3,36	75	33,14	183

Fonte: Silva (2016)

Então, de acordo com a instrumentação utilizada, se deu com o uso de LVDT's distribuídos na parte superior do concreto, observando assim após as análises dos resultados obtidos, foi visto que a laje BD28-F2 apresentou maiores deslocamentos pelo fato de que, entre as regiões das pré-lajes não teve a inserção de uma região maciça, tendo assim que as tensões de flexão foram transmitidas para as armaduras longitudinais tendo entrado logo no estado plástico, passando a ter uma grande diminuição de sua capacidade resistente.

4 METODOLOGIA

Este trabalho, utilizou-se de um modelo de trabalho de análise estrutural realizado experimentalmente como referência, proposto por Silva (2016), para fins de calibração com o modelo, e desenvolvido com a utilização do Software Sap 2000 sendo que após os resultados foram comparados aos deslocamentos verticais.

Na execução do projeto foram utilizadas duas lajes específicas de referências, sendo uma laje maciça e uma laje Bubbledeck, onde foram feitas adaptações específicas que foram consideradas para lajes Bubbledeck. Calibrar o modelo para a determinação de flechas em lajes Bubbledeck.

Após a conclusão dos estudos, os resultados foram comparados, resultados obtidos e resultados existentes conforme dados do autor Silva (2016), e de forma conclusiva foram estabelecidas as relações de informações de deslocamentos obtidos pelo autor Silva (2016) com os deslocamentos de resultados obtidas através do Software Sap 2000.

Para tanto, foi necessário avaliar o comportamento de uma estrutura de laje maciça, e uma estrutura considerando a real geometria da laje Bubbledeck, ou seja, considerando um volume de vazios, onde será substituído por esferas plásticas, conseqüentemente reduzindo todo o peso estrutural. Utilizou-se da ferramenta disponível, o programa SAP 2000, onde foram analisados dois modelos de lajes, sendo uma maciça e outra Bubbledeck.

Para auxiliar no que se refere ao entendimento do comportamento estrutural, utilizou-se da realização de análises numéricas simplificadas dos modelos, sendo realizados com a utilização do método dos elementos finitos, tendo como ferramenta de apoio o software SAP 2000.

Após a realização dos ensaios no software, foram analisados os valores de deslocamentos verticais, calibrando os valores obtidos experimentalmente em laboratórios.

4.1 MODELOS EXPERIMENTAIS

Neste tópico serão descritas todas as características das lajes, geometria, detalhamento de armadura e posicionamento das LVDT's.

4.1.1 Dimensões das Lajes

Para que pudesse ser modelada a geometria da laje no software Sap 2000, foi realizada a confecção do modelo da laje através do programa Auto Cad.

Silva (2016) conduziu seus ensaios experimentais no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília– UnB, tendo como as dimensões de ambas as lajes, de 3 m x 1,025m, onde as figuras 13, 14, 15, 16 e 17, mostram os detalhes das lajes ensaiadas, sendo estes locais de cada LVDT, posicionamento das esferas e disposições das armaduras. Também foram apresentadas as descrições de cada laje ensaiada, fato esse mostrado pela tabela 8.

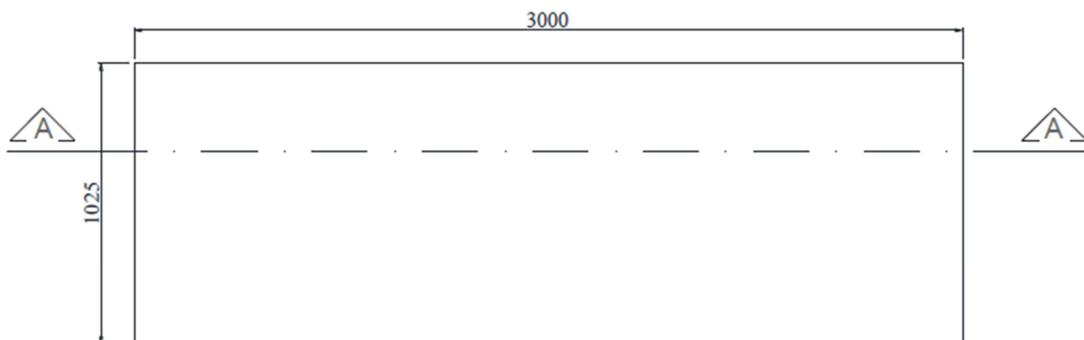
Na tabela 8 são apresentadas as nomenclaturas estabelecidas para as lajes.

Tabela 8- Definições das lajes

Laje	Descrição
RSF28	Laje Maciça
BD28F1	Bubbledeck sem junta, com laje pré-moldada

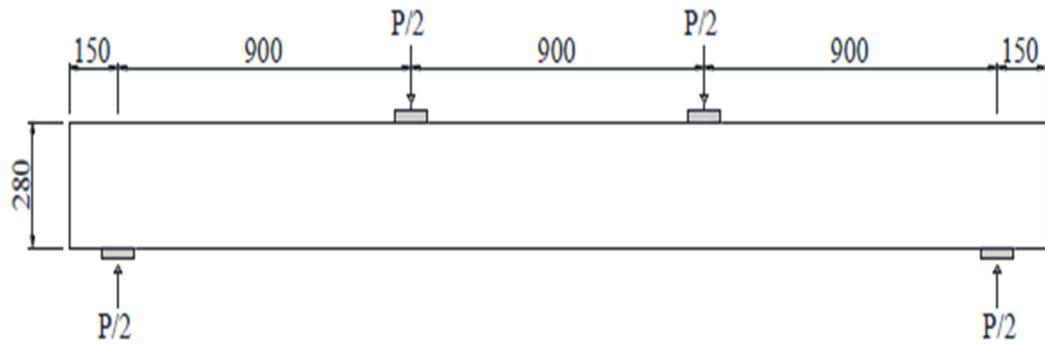
Fonte: Silva (2016)

Figura 13 - Dimensões das Lajes ensaiadas



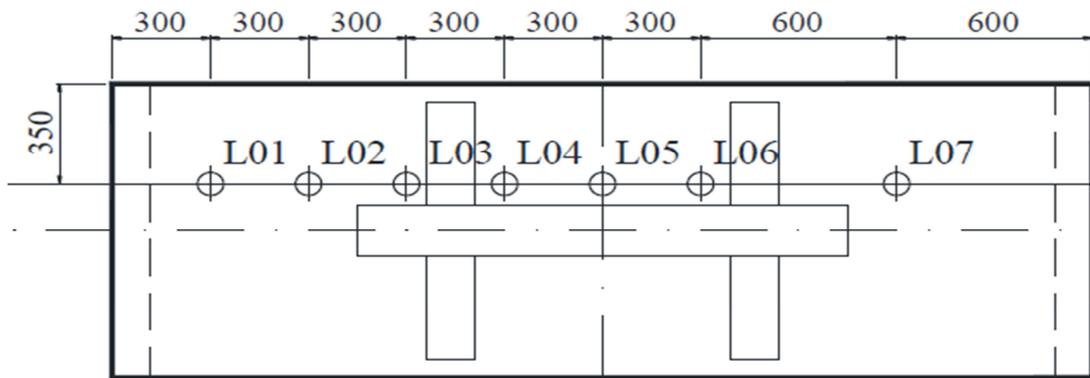
Fonte: Silva (2016)

Figura 14 - Laje Maciça de Referência RSF28. Dimensões em (mm)



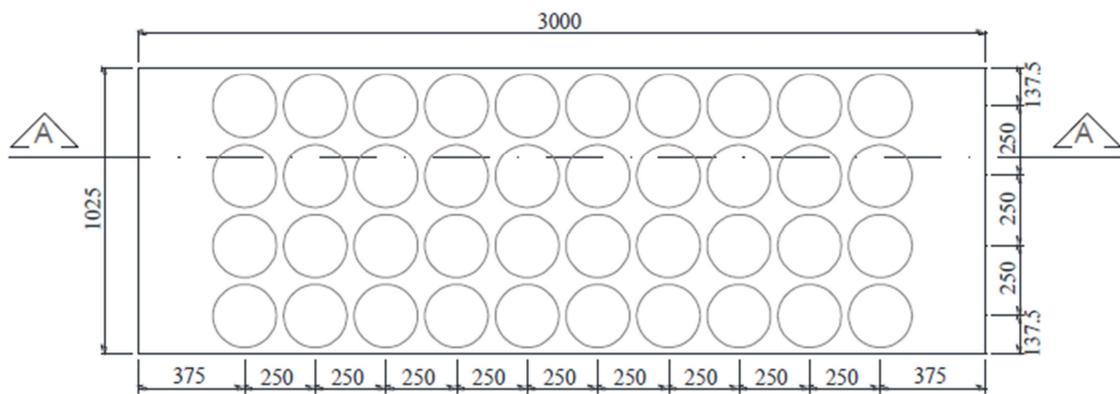
Fonte: Silva (2016)

Figura 15 - Posicionamento dos LVDT's



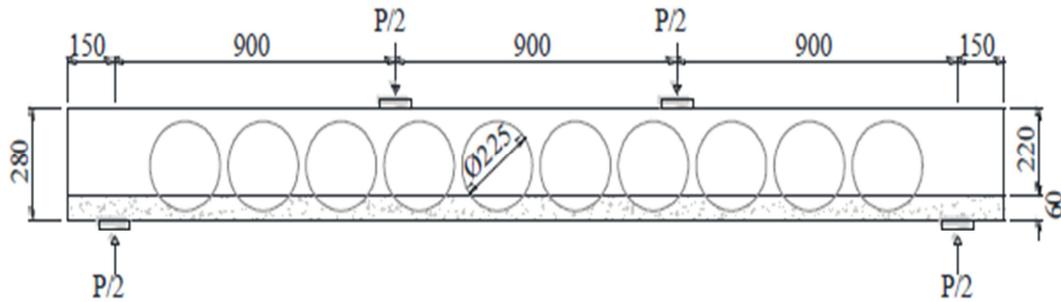
Fonte: Silva (2016)

Figura 16 - Detalhes das Lajes Bubbledeck



Fonte: Silva (2016)

Figura 17 - Posição dos carregamentos na laje Bubbledeck

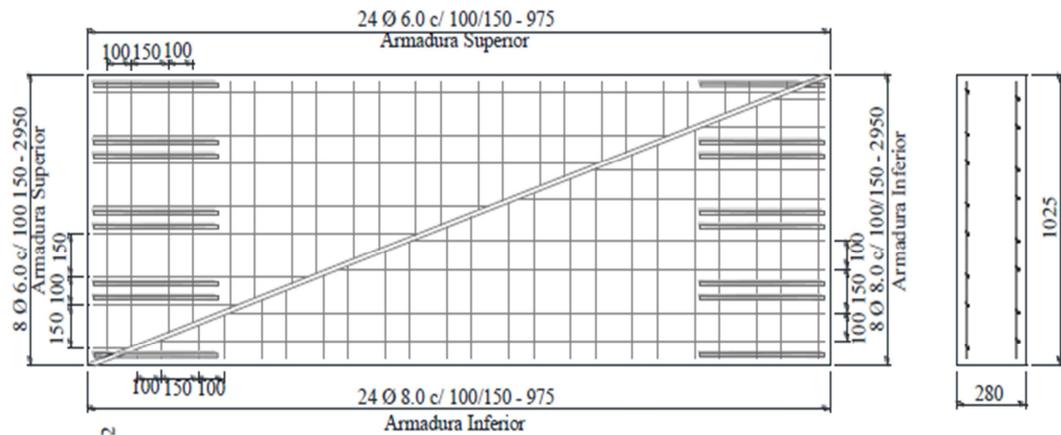


Fonte: Silva (2016)

4.1.2 Armaduras

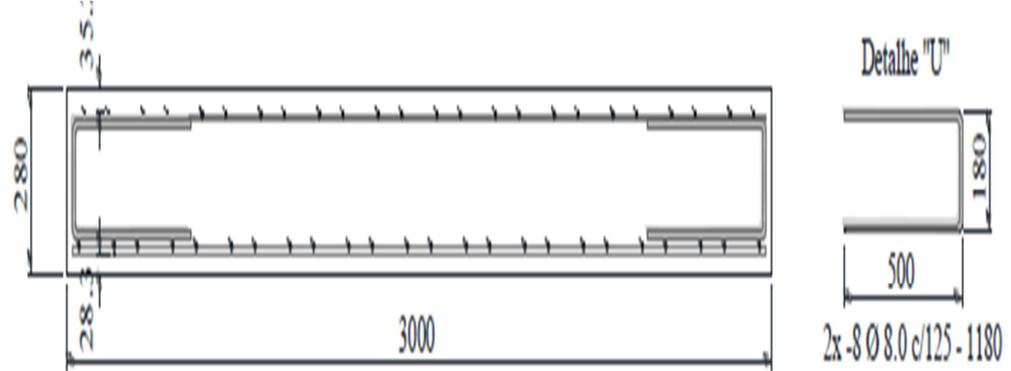
De acordo com o autor a definição da distribuição das armaduras de flexão das lajes ensaiadas, foram compostas por telas soldadas, de acordo com o que pode ser visto nas figuras 18, 19, 20, e 21.

Figura 18 - Detalhes da armadura de flexão superior e inferior, laje RSF28



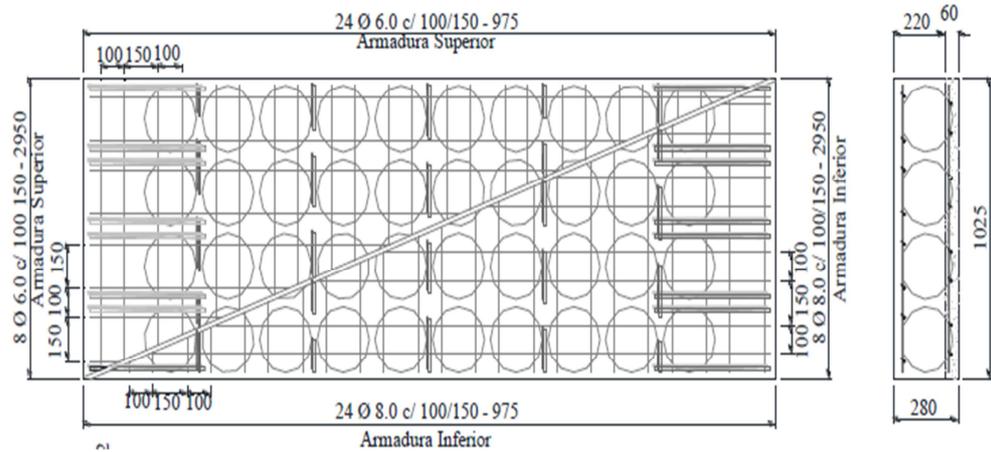
Fonte: Silva (2016)

Figura 19 - Detalhes da armadura de flexão, laje RSF28



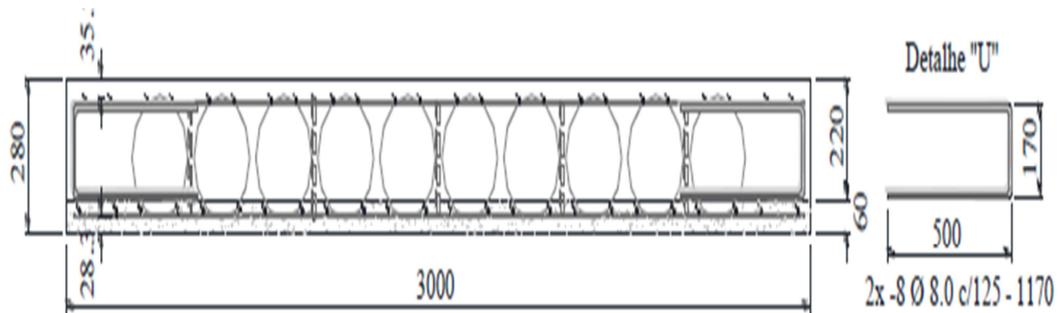
Fonte: Silva (2016)

Figura 20 - Detalhes da laje de Flexão Armadura Superior e inferior BD28F1



Fonte: Silva (2016)

Figura 21- Detalhes da laje de Flexão Armadura BD28F1



Fonte: Silva (2016)

4.1.3 Instrumentação

Para medição da flexão e deformação nas lajes ensaiadas, foram usadas algumas instrumentações que estão descritas na tabela 9. Sendo que todos os pontos de medição, foram devidamente distribuídos com o programa Auto Cad, sendo posteriormente lançado para o Software Sap 2000.

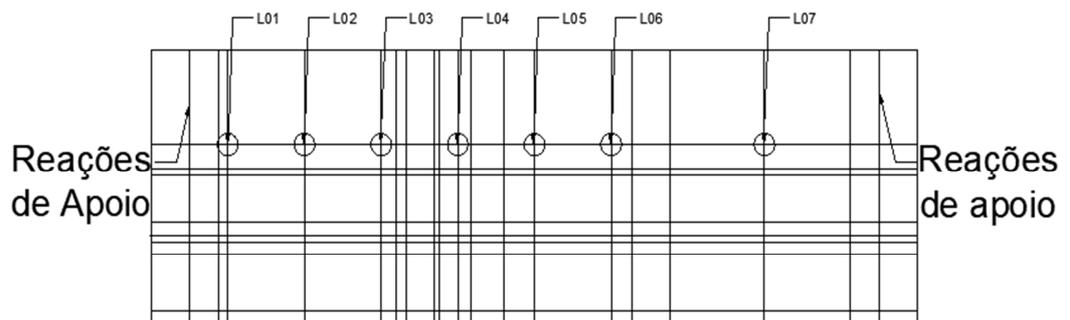
Tabela 9 - Descrição das instrumentações utilizadas

INSTRUMENTAÇÃO	DESCRIÇÃO
L01, L02, L03, L04, L05, L06 e L07	Transdutores de variação de deslocamento linear)
EC, EC2, EC3, EC4 e EC5	Extensômetros no concreto
EF1, EF2, EF3, EF4, EF5 e EF6	Extensômetros elétricos de resistência

Fonte: Próprio autor, (2020).

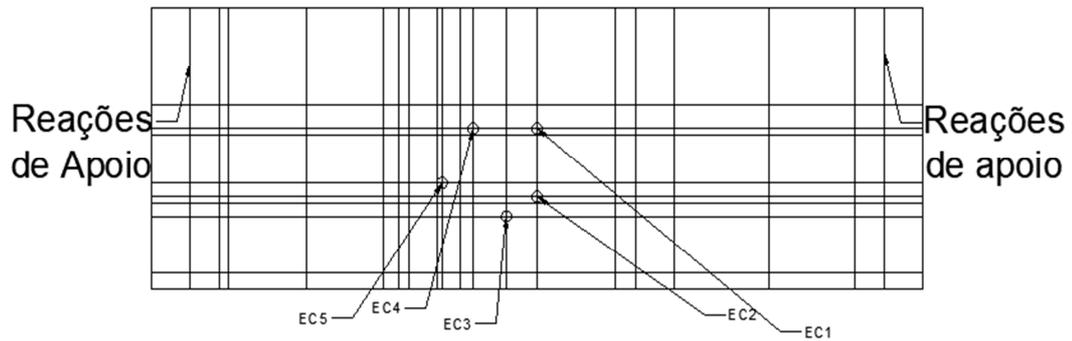
Todos os pontos de medição foram devidamente posicionados, obedecendo sua geometria e posições de acordo com as lajes ensaiadas experimentalmente, como pode ser visto pela figura 22, 23 e 24.

Figura 22- Posicionamento dos LVDT's



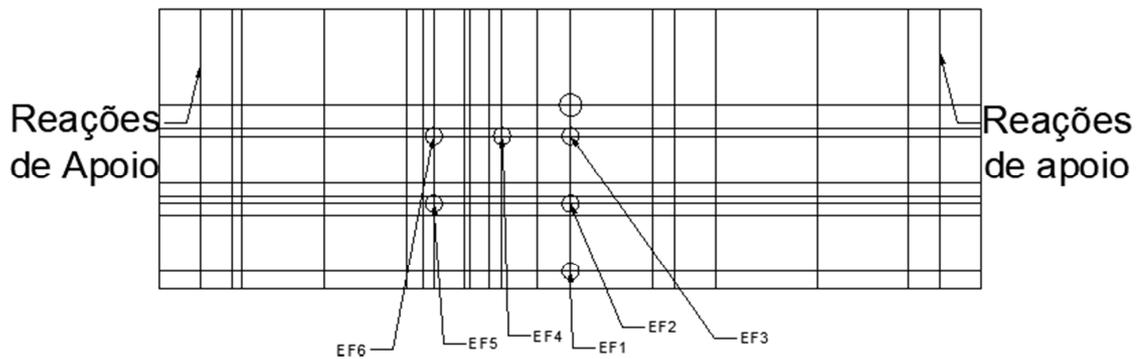
Fonte: Próprio autor, (2020).

Figura 23 - Posicionamento dos Extensômetros no concreto



Fonte: Próprio autor, (2020).

Figura 24 - Posicionamento dos Extensômetros na armadura de Flexão



Fonte: Próprio autor, (2020)

4.1.4 Características do Concreto

Para definição do modelo e obtenção das deformações no concreto, a resistência utilizada foi obtida pelo autor através da realização das moldagens de 9 corpos de provas de ensaios de tração por compressão diametral e tendo um valor médio de resistência do concreto, Módulo de Elasticidade, apresentado pela tabela 10.

Tabela 10 - Descrição das características do concreto

Origem	Tipo de Ensaio	Idade (dias)	Fc (Mpa)	Eci (GPa)
Concretagem Final	Compressão	44	47,6	25,8

Fonte: Silva, (2016).

Para determinação dos valores de deslocamentos verticais, das deformações no concreto e na armadura de flexão foi aplicada uma carga de $0,06148 \text{ kN/cm}^2$, cuja carga adotada se deu pela média da carga de escoamento obtidos nos resultados experimentais dos LVDT's, onde o software apresentou resultados aos passos de 10 etapas de carregamento, sendo o limite a carga de escoamento de 95 KN.

4.1.5 Características do Aço das Armaduras de Flexão

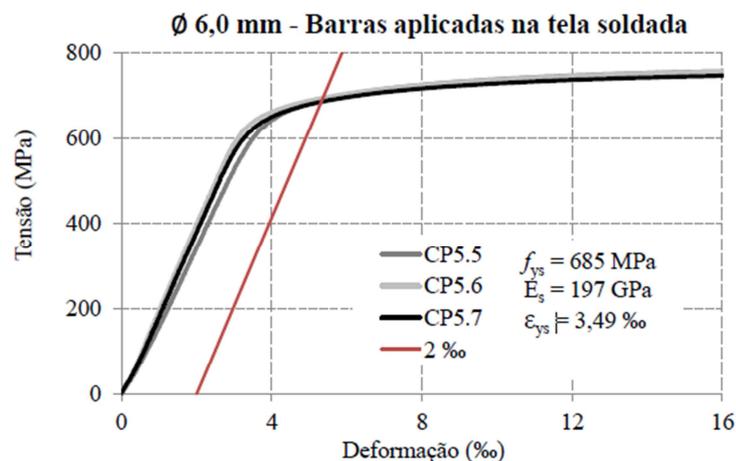
Foram utilizados, na análise experimental, os valores das características definidos no dimensionamento das lajes do autor de acordo com a tabela 11, onde os mesmos foram posicionados em 6 pontos distribuídos ao longo da laje RSF28 e 7 pontos na laje BD28F1. Para definição do modelo da laje de referência e consequentemente a deformação na armadura, o autor realizou ensaios de tração e suas deformações medidas com extensômetros mecânicos. Nas figuras 25, 26 e 27 é apresentado o gráfico tensão-deformação para as barras de $\varnothing 6 \text{ mm}$ e $\varnothing 8 \text{ mm}$.

Tabela 11 - Descrição das características do concreto

Diâmetro Nominal			f_{ys} (MPa)	ε_{ys} ‰	E_s (GPa)	f_u (MPa)
CA-60	6,0		Média Adotada	697	3,58	195
	8,0	644		3,31	195	727
CA-50	8,0	558		2,86	195	676
	10,0	553		2,86	193	669

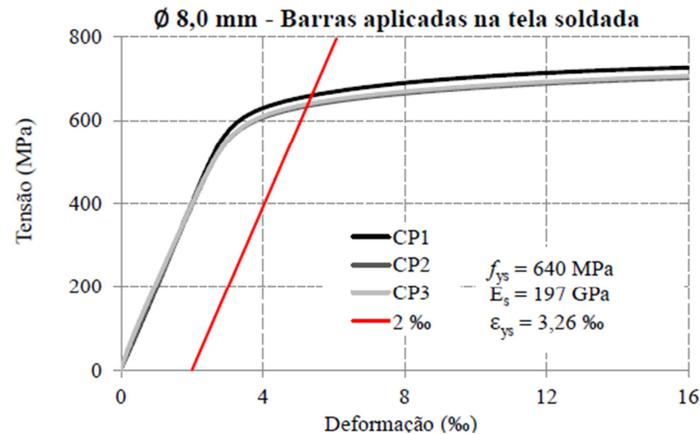
Fonte: Silva, (2016).

Figura 25 - Gráfico Tensão-deformação do aço $\varnothing 6 \text{ mm}$ CA-60



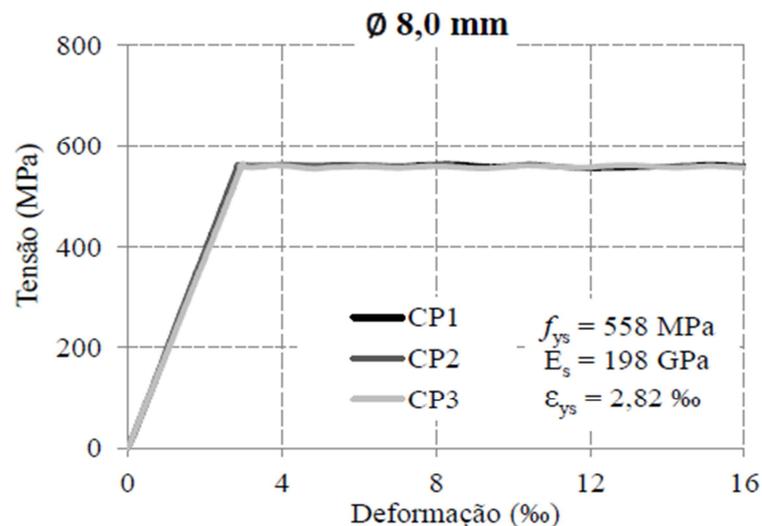
Fonte: Silva (2016)

Figura 26 - Gráfico Tensão-deformação do aço Ø8mm CA-60



Fonte: Silva (2016)

Figura 27 - Gráfico Tensão-deformação do aço Ø8mm CA-50



Fonte: Silva (2016)

5 MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS

Santos (2010) afirma, em relação a comparação de Modelos de Grelha e de Elementos Finitos de Laje na Modelação de Estruturas de Edifícios de Betão Armado, que o conceito do MEF se baseia na divisão do domínio em análise num número finito de subdomínios de forma simples e dimensões variadas. Denominados elementos finitos, assumindo-se no seu interior leis simples de comportamento, dependentes das variáveis em estudo. Nos elementos finitos clássicos as variáveis do problema são o valor das funções a aproximar num determinado número de nós,

dependendo do tipo de elemento utilizado. Cada nó e cada componente da solução diferencial têm associado uma função de forma ou interpolação, com valor unitário no referido nó, sendo nulo nos restantes. A combinação linear

5.1 ANÁLISE NUMÉRICA

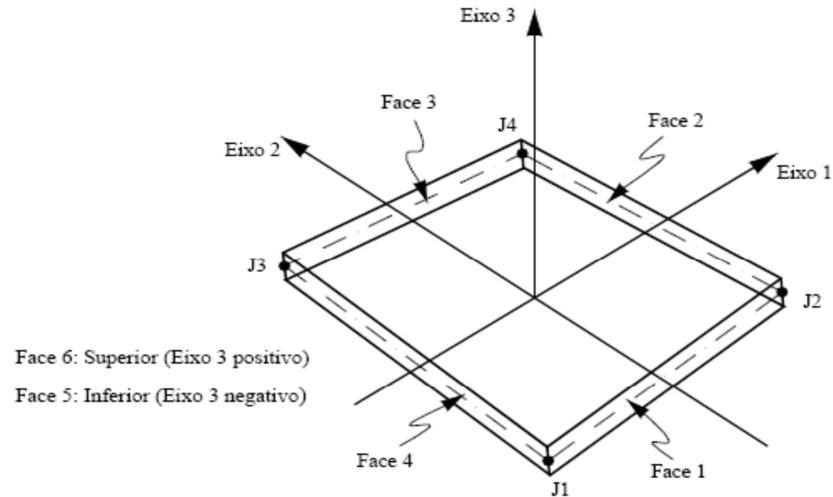
Segundo Rovere (2001), o método dos elementos finitos se baseia por meio da divisão de um corpo sólido em um grande número de elementos, ligados em suas extremidades por nós e o campo de deslocamento no interior de cada elemento é realizado por funções, geralmente polinomiais que interpolam os valores de deslocamentos nodais. Para o autor, em função desses deslocamentos nodais e das equações de interpolações internas de cada elemento é obtido os deslocamentos em todos os pontos da estrutura, e a partir dos mesmo as deformações específicas.

De acordo com a realização dos objetivos deste trabalho, foram realizados o desenvolvimento de um modelo via Método dos Elementos finitos, para a laje maciça e Bubbledeck, tendo como uso o programa SAP 2000, a calibração do modelo numérico com os resultados analíticos e a comparação dos resultados com a análise da experimentação realizada por Silva.

O SAP2000 constitui-se de um programa comercial de análise estrutural, utilizando elementos finitos com uma interface gráfica direcionada a objetos 3D, o que torna possível a execução de cada fase de construção e análise não lineares. Por se tratar de lajes, o elemento escolhido foi do tipo Shell, sendo esse o mais adequado para este tipo de estrutura.

O elemento SHELL é usado para modelar cascas, membranas ou placas em estruturas planas ou espaciais. Estes elementos são compostos por três ou quatro nós que recebem o nome de quadrangular ou triângulo, sendo o quadrangular o mais preciso recebendo a nomenclatura de j1, j2, j3 e j4, sendo que sua fórmula é isoparamétrica, desta forma cada elemento tem nas coordenadas locais seu sistema específico, sendo representada pelos eixos 1, 2 e 3. Sabendo que os eixos 1 e 2 se encontram localizados no plano do elemento e o terceiro eixo é a norma a esse plano conforme pode ser visualizado pela figura 28.

Figura 28 - Elemento Shell Quadrilateral de 4 nós



Fonte: Dainatex, SAP 2000, (2006).

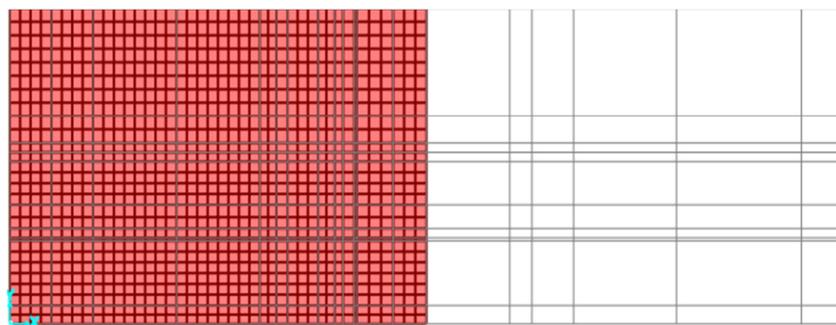
5.2 GEOMETRIA DO MODELO COMPUTACIONAL

Neste tópico será definido tipo de malha e definições no software SAP2000.

5.2.1 Definições de Malha

Dessa forma a laje foi modelada tendo como uso o elemento Shell e 4 nós, inicialmente não foi considerada a especificidade do material, mas sim um carregamento qualquer, para facilitar a calibração com a modelagem experimental, tendo sido construído conforme a geometria da laje já citada anteriormente, conforme pode ser visto na figura 29.

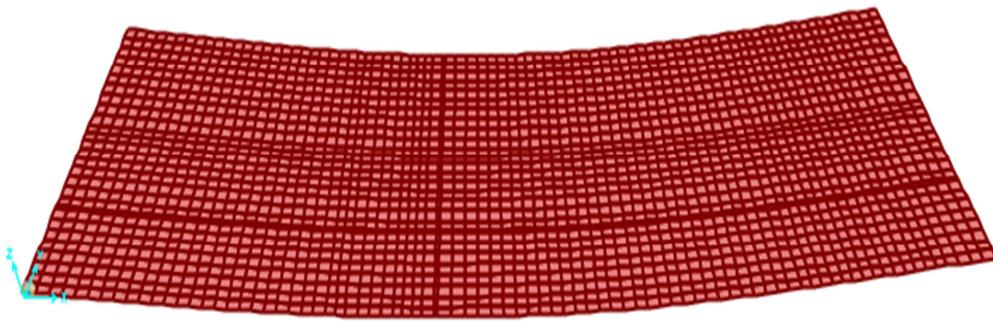
Figura 29 - Modelo no programa computacional Laje RSF28



Fonte: Próprio autor, (2020).

Após a definição das posições de cada LVDT, do local de aplicação da carga e do apoio, atribuiu-se um valor de carga qualquer apenas para que o programa pudesse gerar resultados e obter o deslocamento qualquer para definição das principais características da laje, para assim facilitar a calibração com o modelo experimental, após a definição dos materiais específicos da laje, que pode ser visualizado na figura 30 da laje maciça de referência.

Figura 30 - Modelo no programa computacional Laje RSF28



Fonte: Próprio autor, (2020).

6 RESULTADOS

6.1 LAJE MACIÇA DE REFERÊNCIA

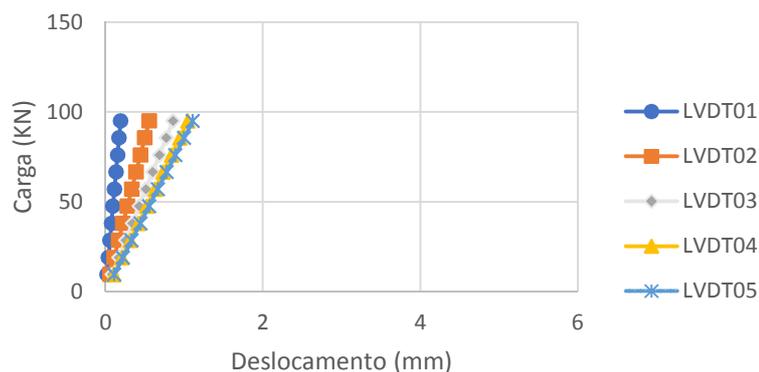
Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios das lajes maciças de referência, onde são mostrados os deslocamentos verticais e as deformações nas armaduras de flexão além das comparações com os resultados experimentais.

6.1.1 Modelo Computacional

6.1.1.1 Deslocamentos Verticais.

São apresentados na figura 31 os deslocamentos verticais que foram obtidos através do Sap 2000 de acordo com cada LVDT distribuído sobre a laje.

Figura 31 – Gráfico deslocamento verticais (laje RSF28, SAP2000)



Fonte: Próprio autor, (2020).

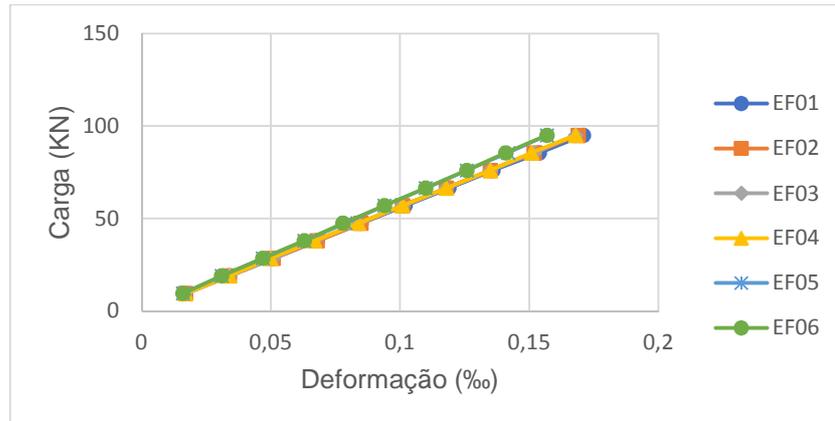
Nota-se que na laje RSF28 os LVDT's 04 e 05, não apresentaram grandes diferenças de deslocamentos para um mesmo carregamento.

6.1.2 Deformação na Armadura Longitudinal de Flexão

6.1.2.1 Deformação na Armadura Longitudinal de Flexão

Foram obtidas também as deformações para as armaduras de flexão em 6 pontos da laje RSF28, na figura 32 é apresentado o gráfico das deformações nas armaduras de flexão para os diferentes tipos de estágio de carregamentos, com a análise desses gráficos pode-se avaliar a distribuição dos esforços de flexão ao longo da seção transversal das lajes.

Figura 32 - Gráfico Deformações na armadura de Flexão (laje RSF28, SAP2000)



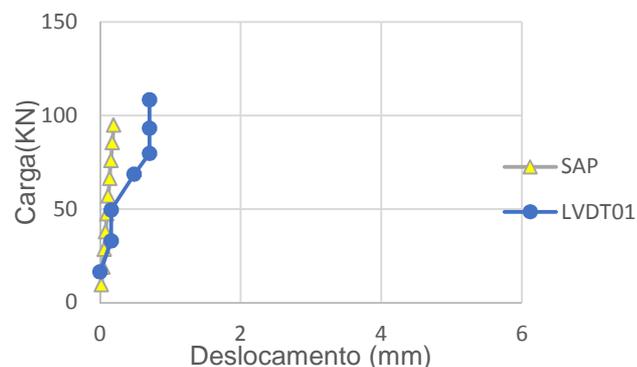
Fonte: Próprio autor, (2020).

Pode-se observar que para os carregamentos aplicados, considerando que a carga máxima que a partir daí ocorreria o escoamento da armadura se deu em 95KN, os extensômetros EF01 a EF 04 mostraram que para o mesmo carregamento o deslocamento ocorrido foi o mesmo, sendo de 0,170mm de deslocamento, enquanto que no extensômetros EF05 e EF06 mostrou-se um deslocamento de 0,157mm.

6.1.3 Comparação dos Resultados dos Deslocamentos Verticais

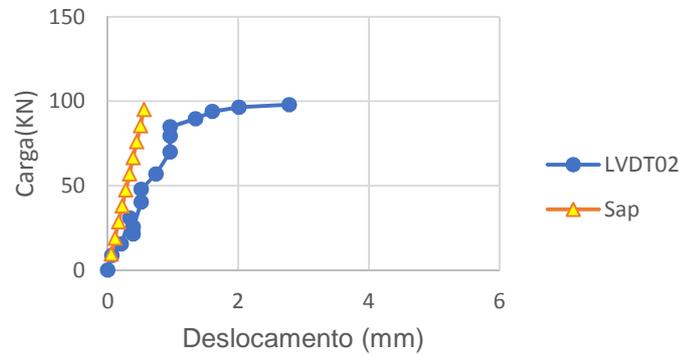
Nas figuras 33 a figura 37, pode-se observar que para todos os LVDT's, os deslocamentos previstos pelo SAP foram similares aos que ocorreram nas lajes experimentais até a carga de escoamento.

Figura 33 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje RSF28, LVDT01 SAP2000)



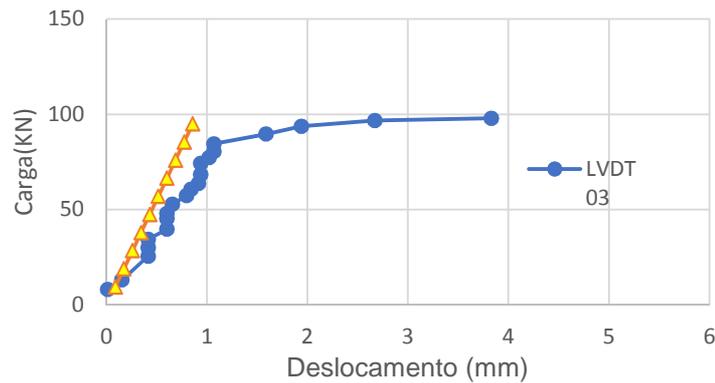
Fonte: Próprio autor, (2020).

Figura 34 - Gráfica comparação dos deslocamentos verticais (laje RSF28, LVDT02
SAP2000)



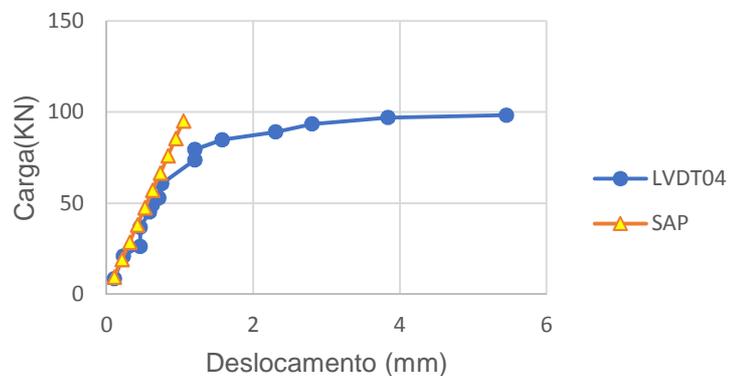
Fonte: Próprio autor, (2020).

Figura 35 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje RSF28, LVDT03
SAP2000)



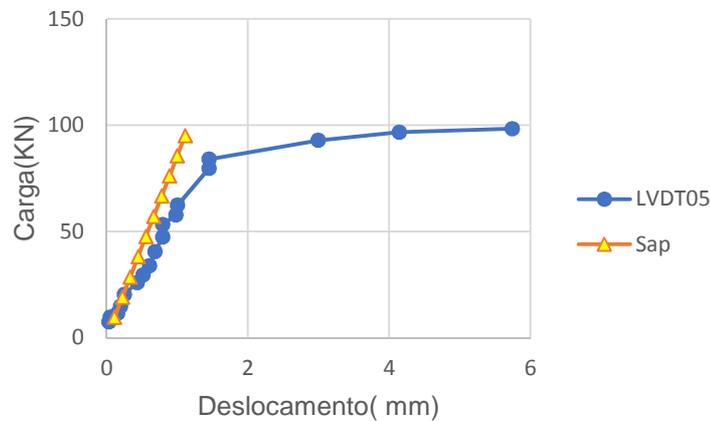
Fonte: Próprio autor, (2020).

Figura 36 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje RSF28, LVDT04
SAP2000)



Fonte: Próprio autor, (2020).

Figura 37 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje RSF28 LVDT05 SAP2000)



Fonte: Próprio autor, (2020).

Nota-se, que no regime carga-deslocamento não foi apresentado todo o carregamento, mas sim imediatamente após o início do estado da plastificação da laje de referência, sendo essa carga de 95kN. Como a análise se deu apenas antes da plastificação, o deslocamento considerado foi de apenas até 6 mm.

Na figura 33 é observado no LVDT 01 que até o carregamento de 50kN, o deslocamento foi similar ao apresentado na laje de referência, após isso, houve uma diferença no deslocamento, sendo que para o carregamento de 95kN, a laje experimental mostrou-se deslocar em aproximadamente 0,7 mm, enquanto a análise no SAP mostrou-se deslocar 0,19mm. No LVDT02 a laje experimental apresentou o início do estado de plasticidade com carga de 84,81kN, e um deslocamento de 0,96mm, enquanto no SAP, mostrou-se similar até aproximadamente 50kN, e para o carregamento de 95,6kN, deslocou-se na ordem de 0,55mm. Nos LVDTs 03, e 05, foram os que mais obtiveram valores similares a laje de referência que apresentou para no início do estado de plastificação um carregamento médio de 81,24kN, e deslocamento 1,24mm enquanto na análise do Sap, os deslocamentos foram de aproximadamente 1mm. Enquanto que no LVDT 04 os deslocamentos foram os mesmos até o carregamento de 66,5kN.

É notado essas diferenças ao fato de o software não considerar todos os efeitos físicos, como fissuração do concreto e aderência da armadura.

6.1.4 Comparação dos Resultados dos Deslocamentos Verticais

Para a instrumentação utilizada a carga-deslocamento não foi considerada até o momento de ruptura da laje, haja vista a avaliação do deslocamento que é considerado até o ponto de início de escoamento da armadura de flexão.

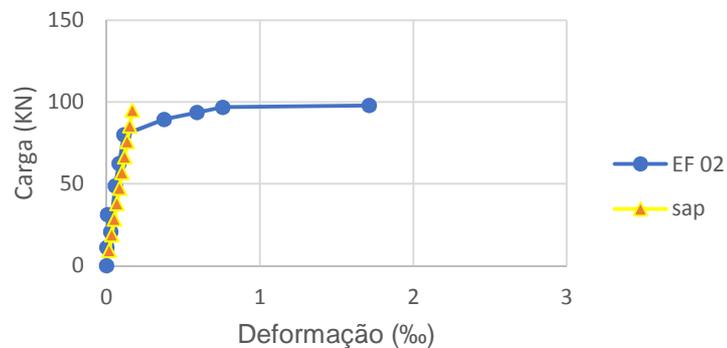
Nas figuras 38 a figura 43, representam as deformações das armaduras longitudinais de flexão, mostrando-se assim que as deformações obtidas no Sap foram similares as que ocorreram nas armaduras experimentais.

Figura 38 – Gráfico comparação deformação nas armaduras longitudinal de flexão (laje RSF28, EF01)



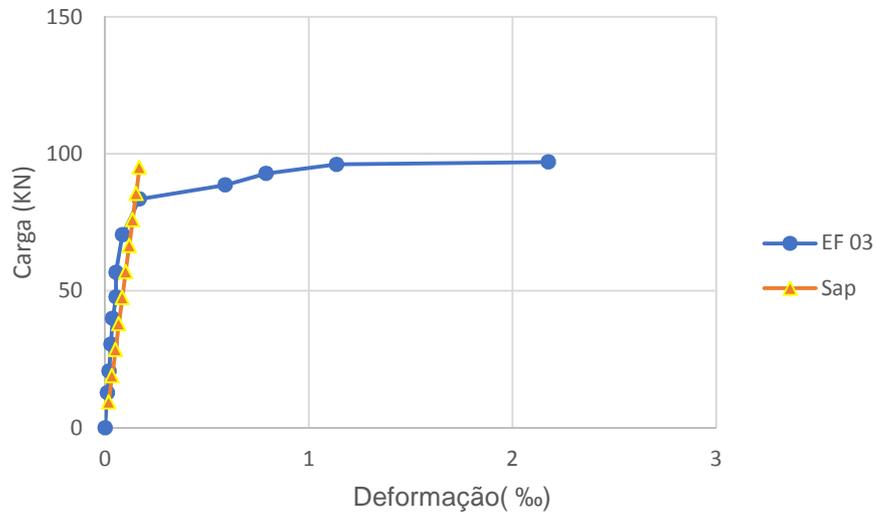
Fonte: Próprio autor, (2020).

Figura 39 - Gráfico comparativo de deformação nas armaduras longitudinal de flexão (laje RSF28, EF02)



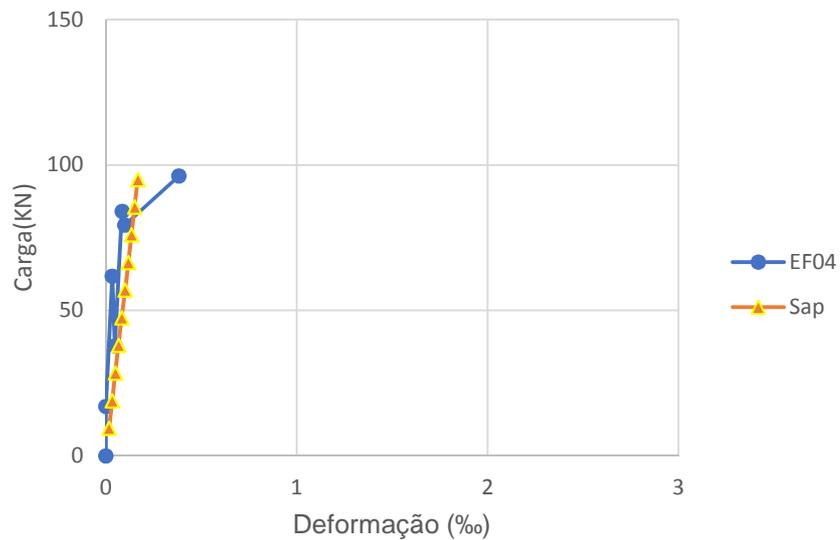
Fonte: Próprio autor, (2020).

Figura 40 - Gráfico de comparação deformação nas armaduras longitudinal de flexão
(laje RSF28, EF03)



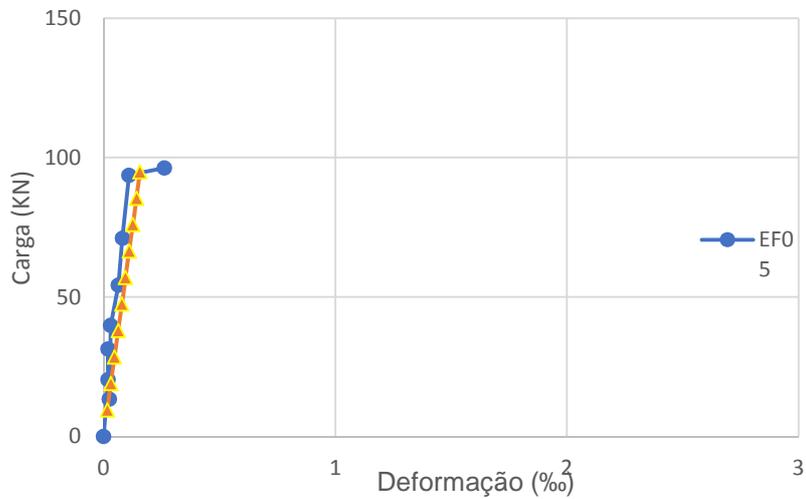
Fonte: Próprio autor, (2020).

Figura 41 - Gráfico de comparação deformação nas armaduras longitudinal de flexão
(laje RSF28, EF04)



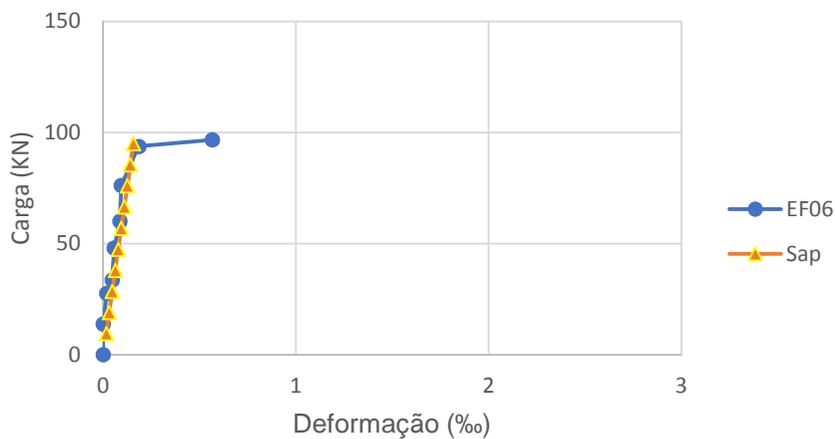
Fonte: Próprio autor, (2020).

Figura 42 - Gráfico de comparação deformação nas armaduras longitudinal de flexão (laje RSF28, EF05)



Fonte: Próprio autor, (2020).

Figura 43 - Gráfico de comparação deformação nas armaduras longitudinal de flexão (laje RSF28, EF06)



Fonte: Próprio autor, (2020).

Nota-se que nos extensômetros EF01, EF02 e EF04 a carga de início de plastificação na laje experimental ocorreu em 76kN, com um deslocamento de 0,136mm, e que até esse carregamento, o Sap apresentou deslocamento similar ao da laje experimental. Enquanto no extensômetro EF03, a plastificação ocorreu-se no

carregamento de 85,5kN, com um deslocamento de 0,152mm, tendo o Sap até o carregamento mencionado o mesmo valor, tendo uma diferença a partir do mesmo.

Nos extensômetros EF05 e EF06, a plastificação na laje experimental ocorreu na carga de 95kN, e um deslocamento de 0,111mm, enquanto que no Sap o deslocamento no mesmo carregamento foi de 0,157mm.

6.2 LAJE BUDDLEDECK

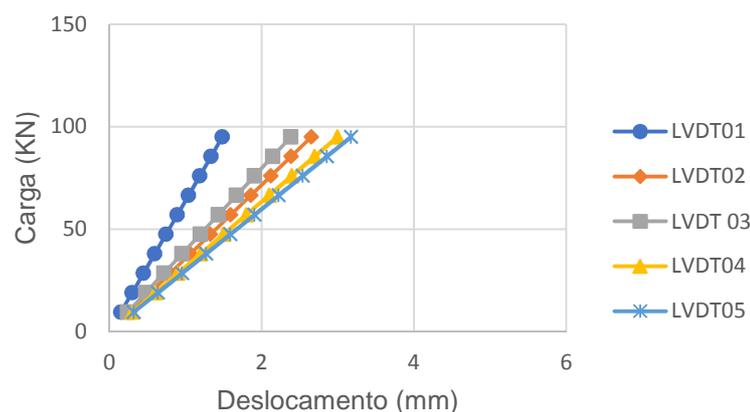
Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios das lajes Bubbledeck, onde são mostrados os deslocamentos verticais, e as deformações nas armaduras de flexão, além das comparações com os resultados experimentais.

6.2.1 Modelo Computacional

6.2.1.1 Deslocamentos Verticais

São apresentados na figura 44 os deslocamentos verticais que foram obtidos através do Sap2000, de acordo com o posicionamento de cada LVDT.

Figura 44 - Gráfico, deslocamentos verticais (laje BD28F1, SAP2000)



Fonte: Próprio autor, (2020).

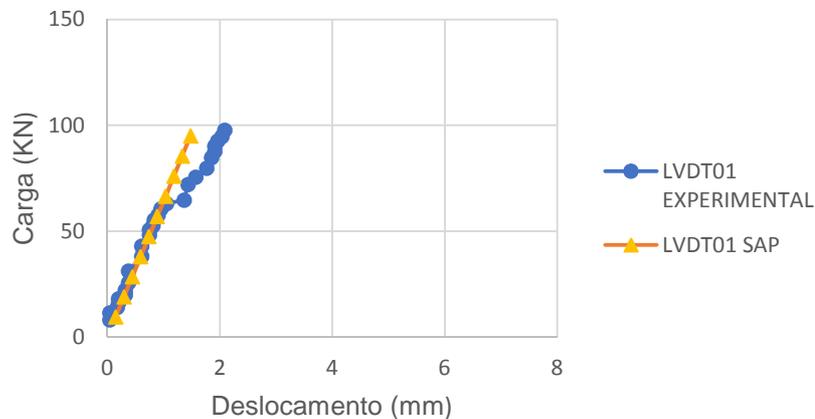
Em virtude da análise, foi considerado o carregamento até 95kN, a partir desse ponto inicia-se o escoamento, nota-se que o LVDT01 apresentou o menor

deslocamento sendo para a carga de 95kN, o deslocamento foi de 1,48mm, enquanto os LVDT's, 04 e 05, apresentaram as maiores, sendo de 2,99mm.

6.2.2 Comparação dos resultados dos deslocamentos verticais

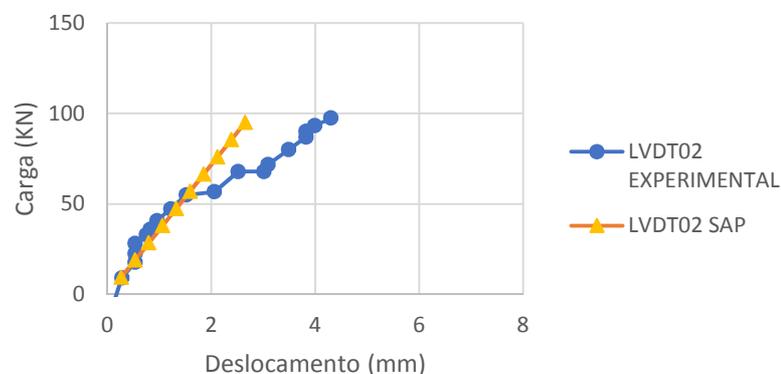
Nas figuras 45 à figura 49 são apresentadas as comparações entre os deslocamentos obtidos no SAP e os deslocamentos obtidos na laje experimental de referência.

Figura 45 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje BD28F1, LVDT01 SAP2000)



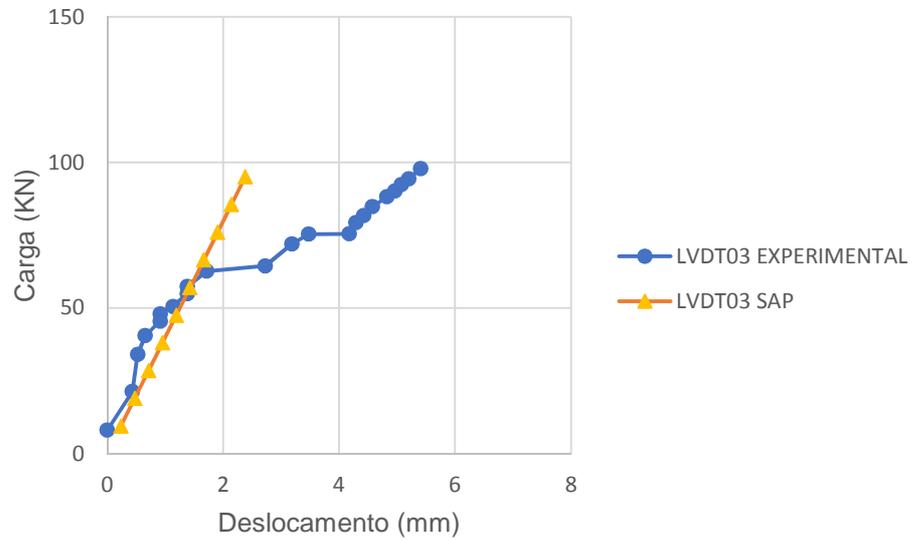
Fonte: Próprio autor, (2020)

Figura 46 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje BD28F1, LVDT02 SAP2000)



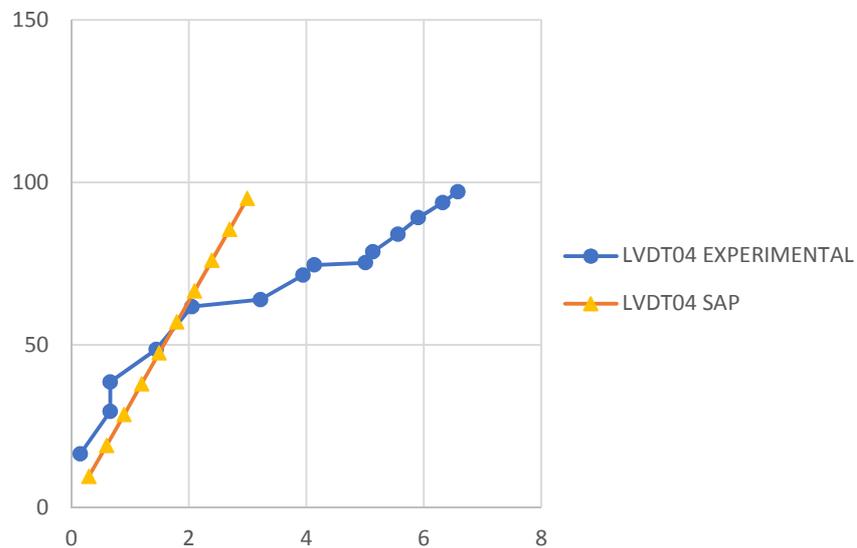
Fonte: Próprio autor, (2020).

Figura 47 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje BD28F1, LVDT03 SAP2000)



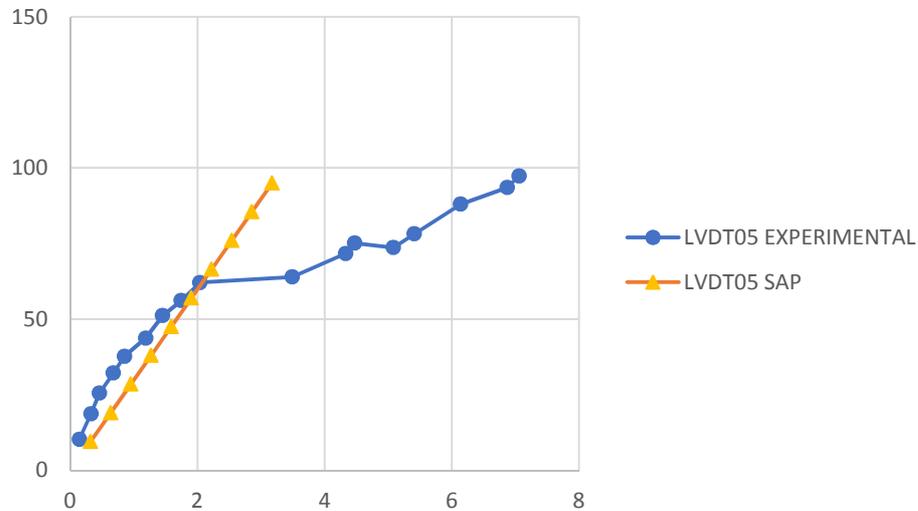
Fonte: Próprio autor, (2020).

Figura 48 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje BD28F1, LVDT04 SAP2000)



Fonte: Próprio autor, (2020).

Figura 49 - Gráfico comparação dos deslocamentos verticais (laje BD28F1, LVDT05 SAP2000)



Fonte: Próprio autor, (2020)

Quanto à laje BD28F1, foi reduzido cerca de 35% de rigidez no modelo computacional em relação à laje maciça devido à ocupação das esferas no centro da laje, para que pudesse chegar ao valor da carga-deslocamento. ”

Nota-se que no regime carga-deslocamento não foi apresentado todo o carregamento, mas imediatamente após o início do estado da plastificação da laje de referência, sendo essa carga de 95kN. Como a análise se deu apenas antes da plastificação, o deslocamento considerado foi de apenas até 6 mm.

Na figura 45 a figura 49 é observado que no LVDT 01 durante a aplicação da carga até o carregamento de 57kN, o deslocamento na análise no Sap foi similar ao apresentado na laje de referência. Após isso, houve uma diferença no deslocamento, sendo que para o carregamento de 95kN, houve uma diferença de 0,56mm de deslocamento. No LVDT02 a laje experimental também apresentou o início do estado de plasticidade com carga de 57kN, porém a diferença de deslocamento para o início de plasticidade ocorreu na ordem de 1,65mm. No LVDT 03, LVDT04 e LVDT05, com o aumento do carregamento até na média de 66kN, ponto que ocorreram o início da plastificação na laje de referência, os deslocamentos no Sap, foram menores que nas lajes experimentais, sendo no carregamento de 95kN, a diferença para o LVDT 03 foi de 2,5mm no LVDT 04 aproximadamente 3mm e no LVDT05 o maior de todos, 3,7mm.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou o comportamento estrutural, avaliando assim os deslocamentos obtidos nas lajes de diferentes materiais, onde a principal diferença entre elas consistiu na inserção de esferas plásticas, reduzindo consideravelmente sua rigidez. Através da adaptação de modelos de elementos finitos para simulação da laje Bubbledeck as análises foram feitas baseadas em resultados experimentais e normativas adaptadas.

A maioria dos programas computacionais não existe modelos específicos para lajes que tenham geometrias específicas como a Bubbledeck, tendo assim que fazer o uso das normativas brasileiras que são específicas para as lajes convencionais e com isso fazer o uso de adaptações. Nesse contexto o trabalho indicou uma maneira de compensar essa necessidade, para se obter os deslocamentos através da análise das deformações de elementos finitos, devem ser feitos uma considerável redução da rigidez no modelo de elemento finito, obtendo assim a redução da rigidez a flexão no SAP2000.

Para análise de deslocamento em lajes, o modelo analisado foi mais eficiente apenas para níveis de carregamento anteriores ao início da plastificação, para as lajes Bubbledeck notou-se uma significativa redução da rigidez que no elemento finito teve que compensar diminuindo essa rigidez, tendo utilizado um fator de correção de 0,35, para que se pudesse chegar no objetivo.

Os resultados mostraram que os dados obtidos pelas lajes Bubbledeck, apresentaram diferenças, em relação a lajes maciças, fato esse que pode ser explicado pela menor rigidez da laje Bubbledeck, em função da mesma possuir grande área ocupada por esferas plásticas, fazendo assim com que ocorra uma considerável redução da rigidez da mesma. Dessa maneira os resultados quando comparados, as lajes Bubbledeck apresentaram deslocamentos maiores.

Dessa forma é necessária a adaptação na geometria da laje, buscando aumentar a rigidez da mesma em pontos, onde a atuação de tensão tem maior intensidade, isso implica a inserção de armaduras em pontos devidamente necessários.

Para dar continuidade a pesquisa, bem como uma melhor compreensão de detalhes não esclarecidos, a autora deixa como sugestão, para possíveis trabalhos futuros.

- Utilização de elementos tridimensionais para elementos finitos;
- Utilização da simulação da laje como grelha através de elementos finitos unidirecionais;
- Análise que simule o comportamento de lajes com outras geometrias e condições de apoio;
- Simulações que considere o efeito não-linear da fissuração do concreto, da aderência da armadura, e do escoamento do aço.

Esse trabalho contribuiu no quesito inovação tecnológica e sustentabilidade, já que a laje cumpre de maneira eficiente esse papel, reduzindo assim a quantidade de materiais utilizados, diminuindo sua espessura, suprimindo com a zona tracionada do concreto onde a capacidade resistente a tração é desprezada, aliada também a eficiência ao desempenho estrutural, através de parâmetros de redução da rigidez. Os resultados obtidos no trabalho, mostram que é viável a utilização de modelos de elementos finitos adaptados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2019). NBR 9607 - **Concreto endurecido – prova de carga em estruturas de concreto armado e protendido**. Rio de Janeiro, 2019.

BUBBLEDECK BRASIL, **Brasil**, 2019. Disponível em: <<<http://www.bubbledeckbrasil.com.br>>>. Acesso em: 17 de outubro de 2020.

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

BUBBLEDECK-UK. **BubbleDeck structure solutions** – Product Introduction. Part 1, BubbleDeck UK Ltd, 2008.

BUBBLEDECK INTERNACIONAL, **Bubbledeck Design Guide**. Disponível em: <<<http://www.bubbledeck-uk.com>>>. Acesso em: 18 outubro de 2019.

DIN 1045, 2001, **Concreto - código alemão para o projeto de estruturas de concreto**.

EN 13747,2005, **Concreto - Produtos de concreto pré-moldado - Placas de piso para sistemas de piso**.

FREIRE, Tamara Carvalho. **Estudo comparativo para lajes cogumelo utilizando as tecnologias “bubbledeck” e atex**. Rio de Janeiro: UFRJ,2009. 52 f. Projeto de graduação, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GUEDES, N. D.; ANDRADE, R. L. **Avaliação de desempenho de Estruturas utilizando Lajes do tipo Bubbledenck**. 2015, 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, 2015.

LA ROVERE, H. L. **Utilização do Método dos Elementos Finitos em Projetos de Estruturas: Apostila do Curso de Especialização em Projeto de Estruturas. Florianópolis**: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2001.

LIMA, H. J. N. **Análise Experimental da Punção de Lajes Lisas do tipo Bubbledeck**.2015, 113 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil)- Faculdade Tecnológica, Universidade de Brasília. Brasília, 2015.
GUEDES, N. D.; ANDRADE, R. L. **Avaliação de desempenho de**

O sistema construtivo bubbledeck. Civilização engenharia, 2013. Disponível em:<https://civilizacaoengenharia.wordpress.com/2013/09/11/o-sistema-construtivo-bubbledeck/> >. Acesso em: 11 de outubro de 2020.

SANTOS, L F C. **Comparação de modelos de grelha e de elementos finitos de laje na modelação de estruturas de edifícios de betão armado.** Dissertação de mestrado. Outubro (2010).

SILVA, Wellington Vital. **Análise experimental do comportamento a flexão e ligação entre painéis de lajes tipo Bubbledeck.** Dissertação de Mestrado em estruturas e construção Civil da faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

SILVA, Yuri Mariano de Oliveira. **Estudo comparativo entre lajes “bubbledeck” e lajes lisas.** Rio de Janeiro: UFRJ,2011. 62f. Projeto de Graduação, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.