



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

JONES ARAÚJO BEZERRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJES BUBBLEDECK
E LAJES LISAS MACIÇAS**

FORTALEZA

2018

JONES ARAÚJO BEZERRA

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJES BUBBLEDECK
E LAJES LISAS MACIÇAS

Monografia submetida à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Eduardo Mota

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B469a Bezerra, Jones Araújo.
Análise comparativa entre lajes Bubbledeck e lajes Lisas maciças / Jones Araújo Bezerra. – 2018.
56 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Joaquim Eduardo Mota.

1. Lajes. 2. Lajes Bubbledeck. 3. Lajes Lisas. I. Título.

CDD 620

JONES ARAÚJO BEZERRA

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJES BUBBLEDECK
E LAJES LISAS MACIÇAS

Monografia submetida à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Eduardo Mota

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Joaquim Eduardo Mota (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dr. Magnólia Maria Campelo Mota
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me apoiar e me dar forças para ultrapassar meus obstáculos e cumprir com nossas obrigações.

Agradeço aos meus queridos pais, meus exemplos maiores a seguir, por todo apoio e dedicação aos meus estudos e a quem devo tanto, e que tão pouco posso retribuir. Ao meu falecido pai, Jose Bezerra, que sempre se esforçou ao máximo para me dar o melhor e que sempre esperou por esse momento e que infelizmente não pode estar aqui para comemorar, mas tenho certeza que ele está feliz e comemorando lá de cima, essa vitória. A minha querida mãe, Josinete Araújo, por sempre querer o melhor para mim e me oferecer todo o apoio necessário para conseguir finalizar essa etapa da minha vida.

A meus irmãos que sempre me apoiaram e ajudaram.

Ao Professor Joaquim Eduardo Mota, pela ajuda, pelo conhecimento transmitido e colaboração neste trabalho.

Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para a conclusão do curso de Engenharia Civil e para a realização deste projeto final.

*Nas grandes batalhas da vida,
o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer.*
Mahatma Gandhi

RESUMO

Por haver sempre uma grande busca por economia em obras de construção civil, vários sistemas construtivos de lajes foram desenvolvidos de forma a atender a demanda atual dos projetos estruturais de edifícios que requerem pilares cada vez mais afastados. A necessidade de grandes vãos leva a espessura de lajes maiores, ocasionando desse modo um grande consumo de concreto, tornando antieconômica a solução tradicional em laje maciça. Neste cenário, o sistema construtivo de lajes Bubbledeck apresenta uma solução para esse problema, oferecendo a mesma eficiência que as lajes tradicionais, com um consumo menor de concreto e de aço, com economia em formas, alívio de fundações, aumento de produtividade por ser um processo industrializado, e além de tudo isso o sistema possui importantes certificados ambientais. Nesse trabalho é apresentado os sistemas construtivos desse tipo de laje, mostrando suas principais características e suas vantagens, é também feito um estudo de caso, dimensionando uma laje do tipo Bubbledeck e do tipo Lisa, comparando entre elas alguns parâmetros, como taxa de armadura, volume de concreto e momentos característicos.

Palavras-chaves: Lajes, Lajes Bubbledeck, Lajes Lisas.

ABSTRACT

Because there is always a great search for savings in construction works, several construction systems of slabs have been developed in order to meet the current demand of structural projects of buildings that require ever more distant columns. The need for large span length leads to large thickness of slabs, thus causing a large consumption of concrete, rendering the traditional solution in massive slab uneconomical. In this scenario, the Bubbledeck slab construction system presents a solution to this problem, offering the same efficiency as traditional slabs, with a lower consumption of concrete, steel, savings in formwork, relief of foundations, increased productivity because it is an industrialized process and in addition this technology has important environmental certificates. This work presents the constructive systems of this type of slab, showing its main characteristics and its advantages, it is also done a case study, dimensioning a slab of the Bubbledeck type and the Lisa type, comparing among them some parameters such as armature rate, volume of concrete and characteristic moments.

Keywords: Slab, Bubbledeck Slab, Lisa Slab

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Lajes Lisas	14
Figura 2 - Demonstração de Ábaco e Capitel.....	15
Figura 3 - Detalhe Lajes Bubbledeck	16
Figura 4 - Sistema de Modulo Bubbledeck	17
Figura 5 - Sistema de Pré-Lajes Bubbledeck.	18
Figura 6 - Armação Inferior e Treliças	19
Figura 7 - Distribuição de Esferas	19
Figura 8 - Modulo Bubbledeck.....	20
Figura 9 - Lançamento do Concreto	20
Figura 10 - Introdução do Modulo Bubbledeck	21
Figura 11 - Painel Bubbledeck	21
Figura 12 - Escoramentos, Mesa Voadoras.....	22
Figura 13 - Montagens do Painéis	22
Figura 14 - Armação Negativa/Punção/Colapso	23
Figura 15 - Fechamento Lateral.....	23
Figura 16 - Concretagem	23
Figura 17 - Resultados comparativos	26
Figura 18 - Millenum Tower, Rotterdam.....	27
Figura 19 - Novo Centro Administrativo do Distrito Federal (CADF) - Brasília/DF	27
Figura 20 - Definição dos pórticos múltiplos	29
Figura 21 - Divisão dos Painéis segundo NBR 6118:2014	30
Figura 22 - Pórticos engastados e apoiados.....	30
Figura 23 - Definições de superfícies críticas	32
Figura 24 - Valores de K.....	36
Figura 25 - Planta de fôrmas.....	38
Figura 26 - Lajes Bubbledeck com áreas maciças em volta dos pilares.....	39
Figura 27 - Áreas de influência na laje.....	42
Figura 28 - Faixas de pilares para o Método do Pórtico Equivalente na direção Y	43
Figura 29 - Pórtico Equivalente Pavimento Tipo	44
Figura 30 - Momentos Fletores de Referencia	44
Figura 31 - Distribuições final dos momentos nas faixas.....	45
Figura 32 - Carregamento Laje Lisa.....	49
Figura 33 - Momentos de Referencia Laje Lisa	49
Figura 34 - Distribuições final dos momentos nas faixas na laje Lisa	50

LISTA DE GRÁFICOS LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo de Laje Bubbledeck com Laje Maciça.....	16
Tabela 2 - Pré-dimensionamento de Lajes Bubbledeck.....	24
Tabela 3 - Especificações Técnicas Bubbledeck	25
Tabela 4 - Dados de uma Laje Bubbledeck	40
Tabela 5 - Quantidade de Esferas em Painéis.....	40
Tabela 6 - Peso Próprio da Laje Bubbledeck.....	41
Tabela 7 - Momentos de Referencia	44
Tabela 8 - Momentos Positivos Distribuídos nas Faixas.....	45
Tabela 9 - Momentos Negativos Distribuídos nas Faixas	45
Tabela 10 - Características dos Pilares	47
Tabela 11 - Verificações Puncionamento em Laje Bubbledeck.....	47
Tabela 12 - Peso Próprio de Laje Lisa	48
Tabela 13 - Momentos de Referência Laje Lisa	49
Tabela 14 - Momentos Positivo Laje Lisa distribuídos nas faixas	50
Tabela 15 - Momentos Negativos Laje Lisa distribuídos nas faixas	50
Tabela 16 - Características do Pilares da Laje Lisa	52
Tabela 17 - Verificações de puncionamento na Laje Lisa	52
Tabela 18 - Momentos Característicos Máximos atuantes em Lajes Bubbledeck e Lisa.....	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	A Pesquisa	12
1.2	Estrutura da Monografia	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Lajes Lisas	14
2.2	Lajes Bubbledeck	15
2.2.1	Método Executivo das Lajes Bubbledeck	18
2.2.2	Especificações para Dimensionamento, segundo o Fabricante:	24
2.2.3	Estudo Comparativo entre Lajes Bubbledeck e Lajes Maciças	25
2.2.4	Destaques Bubbledeck	26
2.2.5	Vantagens das Lajes Bubbledeck	28
3	METODOLOGIA	29
3.1	Método de Cálculo para Lajes Lisas e Bubbledeck	29
3.1.1	Método dos Pórticos Equivalentes ou Múltiplos	29
3.2	Calculo da Armadura de Flexão no Estado Limite Último	31
3.3	Verificação do Puncionamento	32
3.3.1	Tensões Resistentes	33
3.3.2	Tensões Solicitantes	35
4	PROJETO ANALISADO (ESTUDO DE CASO)	38
4.1	Dimensionamento de Laje Bubbledeck	39
4.1.1	Peso Próprio	40
4.1.2	Carregamentos Utilizados	41
4.1.3	Calculo dos Esforços Utilizando o Método dos Pórticos Equivalentes	42
4.1.4	Dimensionamento das Armaduras	46
4.2	Dimensionamento da Laje Lisa	48
4.2.1	Dimensionamento das Armaduras	51
5	DISCUSSÕES	54
5.1	Taxas de Armadura	54
5.2	Volume de Concreto	55
5.3	Momentos Fletores	55
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	56

1 INTRODUÇÃO

Atualmente os edifícios estão sendo construídos com lajes em concreto armado com vãos cada vez maiores, exigindo dos projetistas estruturais que o projeto tenha que vencer vãos, entre pilares, muito maiores que os vãos usuais de 4m a 5m do século XX. Como a espessura de uma laje depende do tamanho do vão a ser vencido, quanto maior for esse vão mais espessa essa laje terá que ser e assim pode-se, em certas situações, chegar a um método inviável e antieconômico, por requerer uma espessura elevada, fazendo com que a maior parte do carregamento da estrutura seja o seu peso próprio. Naturalmente isto gerou uma procura por alternativas construtivas mais eficazes para lajes com vãos na faixa de 6m a 10m.

Estes novos sistemas devem ter o mesmo desempenho de lajes maciças, porém mais econômicos. Uma alternativa utilizada é o sistema de lajes nervuradas, que segundo (ARAÚJO, 2014), é reduzido o peso próprio da laje, retirando-se o concreto onde não tem função estrutural, ou seja, na zona mais tracionada. Existe outras maneiras de se fazer isso, como, substituindo o concreto tracionado por diversos tipos de materiais inertes com o peso específico menor que o peso específico do concreto, como tijolos cerâmicos furados, blocos de isopor, ou deixando vazios os espaços entre nervuras, por meio de formas industrializadas, que após a concretagem podem ser retiradas.

Tendo em vista o mesmo conceito de lajes nervuradas e com a procura por soluções cada vez melhores que busque redução de custos e eficiência, é o que sempre acontece, foram se desenvolvendo sistemas construtivos de lajes com vazios, que segundo (GUEDES; ANDRADE, 2015), utilizam a técnica da introdução de módulos dentro da laje, onde o concreto é tracionado, ou seja, onde não há função estrutural. Esses módulos não têm uma geometria específica, geralmente esses materiais são ocos, resistentes e recicláveis, tornando assim o seu custo baixo.

Um sistema construtivo que se enquadrou nesse cenário foi o de Lajes Bubbledeck, uma laje com vazios apoiadas sobre pilares sem a presença de vigas, podendo assim ser considerada como uma laje lisa, segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) item 14.7.8. Segundo (CARVALHO; PINHEIRO, 2009), as lajes lisas, dentre outras verificações necessárias, requerem particularmente a verificação do efeito da punção, que é uma ação ocorrida por conta da forte intensidade da força cortante, no encontro entre pilar e laje, causando assim o cisalhamento nesse ponto, fazendo com que a estrutura possa ir à ruína. Este modo de ruína por punção também deverá ser verificado no caso das lajes

Bubbledeck.

1.1 A Pesquisa

Como o sistema Bubbledeck é uma solução apresentada recentemente ao mercado brasileiro, há uma carência de informações práticas descritivas do sistema e de roteiro para o desenvolvimento de projetos de lajes utilizando esta tecnologia. Por conta disto, pode-se chegar as seguintes questões de pesquisas:

- i. O que vem a ser uma laje executada utilizando o sistema Bubbledeck? Quais materiais são utilizados e qual a metodologia construtiva?
- ii. O que se espera ganhar em termos de consumo de materiais utilizando o sistema de lajes Bubbledeck?
- iii. Que modelos de cálculo podem ser utilizados para a obtenção dos esforços na laje Bubbledeck?
- iv. Como são verificadas as ruínas por flexão e punção na laje Bubbledeck

Analisando-se essas questões, foi definido o seguinte Objetivo Geral de Pesquisa deste trabalho, que será apresentar o sistema construtivo, o método de cálculo e as principais verificações de ruína de uma laje Bubbledeck. Para detalhar a forma de atingir esse objetivo geral, foram então definidos os seguintes objetivos específicos:

- i. Apresentar o sistema construtivo de lajes Bubbledeck.
- ii. Apresentar os métodos de análise das lajes lisas.
- iii. Fazer um estudo de caso, fazendo o dimensionamento de um pavimento utilizando os sistemas Bubbledeck e sistema de laje lisa maciça, comparando consumo de concreto armaduras de flexão e de punção.

Portanto, como contribuições da pesquisa pode-se destacar a caracterização de um método construtivo que é uma novidade muito recente, e que tem um grande potencial de crescimento no mercado brasileiro e mostrar as vantagens da laje Bubbledeck através da comparação com outros métodos construtivos.

1.2 Estrutura da Monografia

A monografia apresenta um capítulo 2 de revisão bibliográfica que se concentra, principalmente, na apresentação de métodos construtivos de lajes, abordando o método de lajes lisas e o método de Lajes Bubbledeck, suas características e vantagens. O capítulo 3 trata da metodologia, mostrando uma descrição detalhada dos métodos utilizados para obtenção dos esforços em cada método construtivo, os procedimentos de cálculos de obtenção de áreas de aço para flexão e verificação ao puncionamento na laje. Na sequência, no capítulo 4, são apresentados a planta tipo para o estudo de caso e a aplicação da metodologia de cálculo das lajes Lisas e Bubbledeck, são também obtidos os esforços, as áreas de aço e o volume de concreto. No capítulo 5, faz-se a apresentação dos resultados e discussões, comparando as duas tipologias. Fechando a monografia, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões.

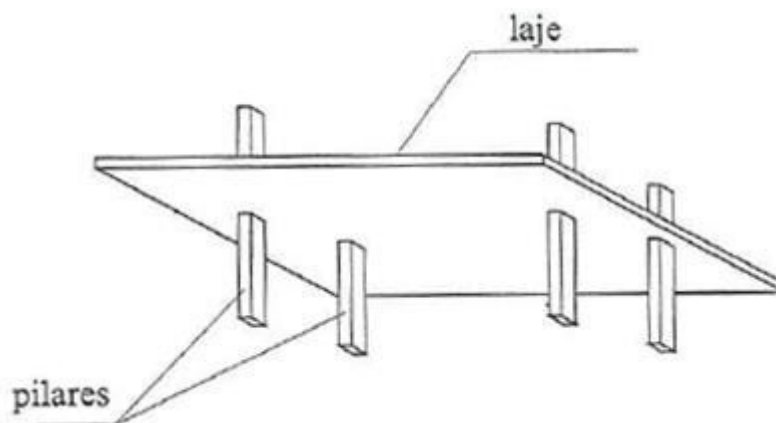
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Lajes Lisas

Segundo a Norma Brasileira 6118:2014, as lajes cogumelos são as lajes apoiadas diretamente em pilares com capiteis e as lajes lisas são lajes apoiadas diretamente em pilares, porém sem capiteis. Segundo (CARVALHO; PINHEIRO, 2009), o nome mais adequado para esses tipos de lajes seria lajes sem vigas, com capiteis ou sem capiteis.

Nesse sistema construtivo, ao invés de seguir o sistema tradicional onde as cargas aplicadas nas lajes, são transmitidas para as vigas e das vigas para os pilares e conseqüentemente para as fundações, as cargas aplicadas nas lajes lisas são transmitidas diretamente para os pilares. A eliminação das vigas faz com que a laje se apoie diretamente nos pilares como mostra a Figura 1, existindo assim uma ligação rígida laje-pilar. Esta ligação pode entrar em colapso por punção que é um modo de ruína causado essencialmente pelo esforço cortante transmitido ao pilar pela laje.

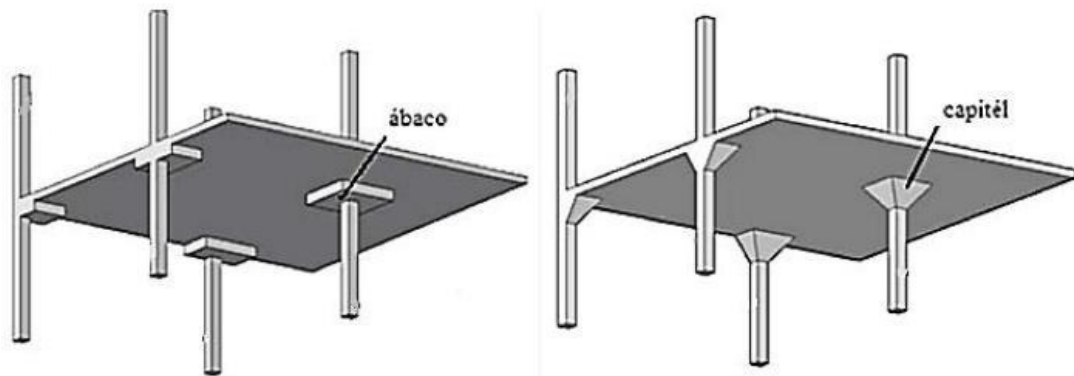
Figura 1 - Lajes Lisas



(Fonte: CARVALHO; PINHEIRO, 2009)

Segundo (CARVALHO; PINHEIRO, 2009), a ruína por punção ocorre quando há a perfuração da placa, provocada pela força cortante agindo concentrada na pequena área do pilar. Para se evitar esse fenômeno da punção os pilares podem ter capiteis que é o engrossamento da seção na região de ligação com a laje, ou ainda a laje pode ter sua espessura aumentada nessa região, o que se chama de ábaco, como mostra a Figura 2. O uso de capitéis ou ábacos pode ser evitado garantindo-se a resistência ao puncionamento pela disposição de armaduras transversais (estribos ou conectores) na região da laje próxima do pilar.

Figura 2 - Demonstração de Ábaco e Capitel



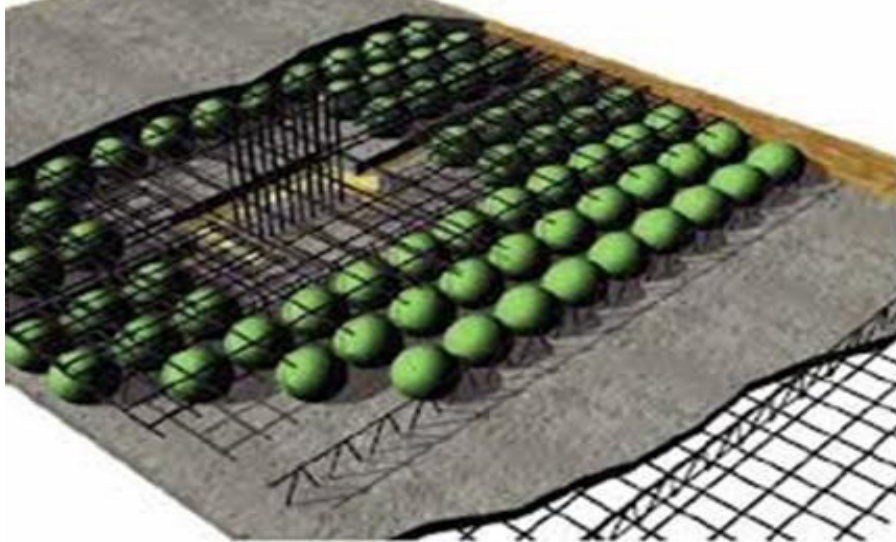
(Fonte: GUEDES; ANDRADE, 2015)

2.2 Lajes Bubbledeck

A Laje Bubbledeck, é um sistema construtivo inovador, que foi desenvolvido na Dinamarca, por volta dos anos 80, pelo engenheiro dinamarquês Jorgen Breuning, que desenvolveu a tecnologia em um concurso nacional, que tinha como objetivo o desenvolvimento de uma nova tecnologia ecológica e econômica para a construção civil e que deveria ser aplicada em escala industrial.

O sistema Bubbledeck é composto pela incorporação de esferas plásticas recicladas, no interior das lajes de concreto, sendo uniformemente espaçadas entre duas telas metálicas soldadas como mostra a Figura 3. Essas esferas são colocadas na zona de concreto que não tem nenhuma função estrutural, logo abaixo da linha neutra, podendo assim o concreto ser substituído por essas esferas, permitindo uma economia em concreto de cerca de 35% quando comparada com uma laje maciça de mesma espessura. A laje Bubbledeck apresenta o mesmo comportamento estrutural de uma laje maciça trabalhando à flexão nas duas direções.

Figura 3 - Detalhe Lajes Bubbledeck



(Fonte: BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

As lajes Bubbledeck, por ser um processo industrializado, apresentam uma maior produtividade no seu processo de construção, uma economia no consumo de matérias em relação a outras tipologias e um selo verde por usar materiais reciclados no seu processo construtivo, o que reduz consideravelmente seu impacto no meio ambiente.

A Bubbledeck, carrega consigo um conceito de sustentabilidade, pois além de atender as necessidades de mercado e ao mesmo tempo reduzir as quantidades de materiais empregados em uma mesma obra comparando-se com outro sistema construtivo, o sistema Bubbledeck, também tem outros méritos que lhe concedem um selo verde, que são a redução de emissão de gases de CO₂ na atmosfera, redução de cortes de arvores, dentre outras, como podemos ver na Tabela 1.

Segundo a (BUBBLEDECK BRASIL, 2017) para uma laje do tipo BD280, uma laje de 28 cm de espessura, de 10.000 m², comparando com uma laje maciça de mesma espessura, obtemos as seguintes reduções representativas, como mostra a Tabela 1

Tabela 1 - Comparativo de Laje Bubbledeck com Laje Maciça

Economia	Total	Por/m ²
Emissões de CO ₂	Ton. 423	Kg 42
Arvores Cortadas (formas)	Quant. 150	Quant. 0,015
Diesel para transporte	Lt 2999	Lt 0,2999
Concreto	m ³ 810	m ³ 0,081
Aço	Ton. 81	Kg 8,1
Plástico Recolhido	Ton. 23	Kg 2,3

(Fonte: Adaptado BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

Conceitualmente falando as Lajes Bubbledeck, são lajes na qual se diminui o peso próprio, reduzindo assim o consumo de concreto, que conseqüentemente reduz as cargas nos pilares, gerando um alívio nas fundações, sendo assim uma tipologia mais economicamente viável. São lajes que nas regiões onde não há o risco de sofrer punção, no meio dos vãos, pode-se eliminar o concreto abaixo da linha neutra, pois é onde o concreto sofre tração e sabemos que para esta solicitação ele não tem muita resistência.

Sistema desenvolvido pela empresa Bubbledeck, permite a retirada das vigas, fazendo com que as lajes sejam apoiadas sobre pilares, assim, formando um sistema construtivo por pilares, pré-lajes em concreto armado ou módulos, armaduras de ligação e armaduras complementares (se necessário) e posteriormente a concretagem.

As Lajes Bubbledeck têm duas opções construtivas, a de módulo ou pré-lajes. Os dois processos se diferenciam por poucos detalhes. No primeiro sistema, o de módulo como mostra a Figura 4, é formado por esferas plásticas, treliças e telas metálicas, formando uma espécie de gaiola metálica, que será apoiada em formas tradicionais de madeiras (assoalhos), havendo assim um maior uso de escoras e assoalhos, sendo mais indicado esse sistema para obras de médio a pequeno porte, onde não se tem muito espaço para as movimentações das peças.

Figura 4 - Sistema de Módulo Bubbledeck



(Fonte: BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

Já o sistema de pré-lajes Bubbledeck como mostra a Figura 5, é usado o mesmo módulo anterior, porém esse módulo é inserido em uma camada de concreto de 6cm, formando

assim uma pré-laje. Desta forma não haverá necessidade de formas de assoalhos, podendo-se apoiar as escoras com maior espaçamento, porém a execução é igual à dos módulos, inserindo-se lado a lado as pré-lajes. Esse sistema é ideal para obras que necessitam de uma velocidade maior de construção, ganhando assim uma agilidade na obra e reduzindo o número de mão de obra.

Figura 5 - Sistema de Pré-Lajes Bubbledeck.



(Fonte: BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

2.2.1 Método Executivo das Lajes Bubbledeck

A execução de uma laje com painéis pré-moldado Bubbledeck é muito simples, inicia-se pelo processo da fabricação da peça pré-moldada até a etapa do transporte e aplicação desse elemento no local definitivo. Podemos ver as etapas do método executivo a seguir:

- I. Fabricação dos painéis é feita em uma central, onde essa central pode ser a própria fábrica ou uma fábrica provisória montada na obra. Nela é onde acontece a montagem da armação e concretagem das pré-lajes Bubbledeck, segundo os seguintes passos:
 - a) É identificado o projeto a ser executado, verificando o tipo da laje Bubbledeck e suas dimensões e armações a serem usadas, considerando as bitolas, dimensões, posições, quantidades e os tipos de especificações de esferas.
 - b) É produzida a armadura em uma central de aço, produzindo as telas inferior e superior, em seguida é posicionada em uma bancada a tela inferior da armadura e posicionadas as treliças espaçadas de acordo com o projeto e soldadas na tela inferior, como mostra

a Figura 6.

Figura 6 - Armação Inferior e Treliças



(Fonte: BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

- c) Após serem fixadas as treliças, são colocadas as esferas plásticas entre elas, preenchendo os espaços vazios com as esferas plásticas (bubbles). Deve-se observar o espaçamento mínimo entre as esferas plásticas, Figura 7. Esse serviço é feito manualmente por conta da facilidade de manuseio de enchimento.

Figura 7 - Distribuição de Esferas



(Fonte: BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

- d) Após o preenchimento das esferas, pode-se posicionar a tela superior e executar solda

de ponteamto na parte superior da treliça, formando assim uma “gaiola” ou módulo Bubbledeck, Figura 8.

Figura 8 - Modulo Bubbledeck



(Fonte: BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

- e) Devem ser preparadas as formas para concretagem para que se tenha um acabamento final perfeito, usando formas totalmente lisas, limpas e com usos de desmoldantes.
- f) Após a limpeza das formas, estas são ajustadas para que possam garantir as dimensões de projeto, além de nível e esquadro das peças. Na sequência a peça é liberada para o lançamento do concreto, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Lançamento do Concreto



(Fonte: BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

- g) Ao lançar o concreto na forma, é necessário fazer a regularização e nivelamento do concreto e posicionar os espaçadores no concreto, para que possa garantir o cobrimento mínimo necessário da armadura inferior.
- h) Em seguida, é introduzida a armadura (modulo) sobre a forma inserindo-a no concreto, com auxílio de um caminhão munck ou pórtico, Figura 10, e para que armadura não fique flutuando sobre a forma, é colocada sobrepesos na armadura.

Figura 10 - Introdução do Modulo Bubbledeck



(Fonte: BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

- i) Por fim, está pronto o painel de laje pré-moldada Bubbledeck, Figura 11, para poder ser armazenado ou já levado para o lugar definitivo onde vai ser a laje.

Figura 11 - Painel Bubbledeck



(Fonte: BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

II. É executado o posicionamento dos escoramentos das lajes (mesa voadora), Figura 12.

Figura 12 - Escoramentos, Mesa Voadoras.



(Fonte: BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

III. Após todo escoramento pronto, inicia-se o processo de montagem dos painéis nos locais, Figura 13.

Figura 13 - Montagens do Painéis



(Fonte: BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

IV. Concluindo o posicionamento dos painéis, inicia-se a etapa complementar, etapa onde são colocadas as armações de ligação entre os painéis, e armaduras de momento negativo, de punção e de colapso progressivo, Figura 14.

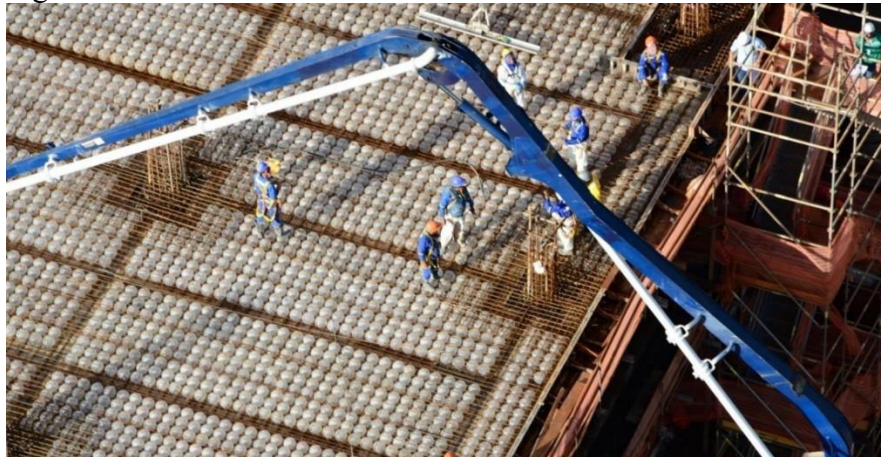
Figura 14 - Armação Negativa/Punção/Colapso



(Fonte: BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

- V. Fechamento das Formas Lateral, Figura 15, para dar início o lançamento do concreto.

Figura 15 - Fechamento Lateral



(Fonte: BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

- VI. Concretagem (capeamento da laje), Figura 16.

Figura 16 - Concretagem



(Fonte: BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

2.2.2 Especificações para Dimensionamento, segundo o Fabricante:

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. São adotados os seguintes valores limites de esbeltez (L/d) para diferentes tipos de vãos:

$$L/d \leq 30 - \text{vãos simples}$$

$$L/d \leq 39 - \text{vãos contínuos}$$

$$L/d \leq 10,5 - \text{balanços}$$

A partir dos valores limites de esbeltez, a Bubbledeck produziu uma tabela de pré-dimensionamento padronizando as espessuras das lajes, para uma determinada faixa de vãos de projeto. Definida a espessura da laje, pode-se também fixar o diâmetro das esferas que compõem a laje, o peso próprio e o consumo de concreto por m², como mostra a Tabela 2

Tabela 2 - Pré-dimensionamento de Lajes Bubbledeck

Tipo	Espessura da Laje (mm)	Diâmetro das Esferas (mm)	Vão (m)	Carga (kgf/m ²)	Concreto (m ³ /m ²)
BD 230	230	180	7 a 10	370	0,15
BD 280	280	225	8 a 12	460	0,19
BD 340	340	270	9 a 14	550	0,23
BD 390	390	315	10 a 16	640	0,25
BD 450	450	360	11 a 18	730	0,31

(Fonte: (BUBBLEDECK, 2014))

Segundo o próprio fabricante (BUBBLEDECK, 2008), as lajes podem ser consideradas como uma laje monolítica, por conta dos vazios na laje serem de forma circular, o que permite que as forças sejam transferidas livremente dentro da laje nas duas direções. Isto significa que se pode calcular a laje Bubbledeck do mesmo modo que uma laje lisa maciça. Assim qualquer método analítico ou qualquer software que calcule uma laje lisa maciça pode ser utilizado no cálculo de laje Bubbledeck.

Porém na hora de dimensionar uma laje do tipo Bubbledeck deve-se atentar para algumas considerações que precisam ser feitas. O próprio fabricante Bubbledeck também disponibiliza uma tabela com os parâmetros necessários para o seu dimensionamento, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Especificações Técnicas Bubbledeck

Espessura Mínima da Laje (cm)	23	28	34	40	45	52	58
Diâmetro das Esferas (cm)	18	22,5	27	31,5	36	40,5	45
Mínimo Intereixo das Esferas (cm)	20	25	30	35	40	45	50
Máximo Número de Esferas (1/m ²)	25	16	11	8,16	6,25	4,94	4
Redução Máx. de Carga/m ² (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 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: SILVA, 2011)

Os principais parâmetros que precisam ser ajustados na hora de calcular uma laje do tipo Bubbledeck são o peso próprio, resistência ao cortante (cisalhamento) e a rigidez à flexão. A Tabela 3 fornece os valores redutores destes três parâmetros e que devem ser usados no momento do cálculo da laje Bubbledeck considerada como maciça.

Por exemplo, o fator redutor do peso é da ordem de 0,67, pois segundo o próprio fabricante das lajes Bubbledeck, o peso é reduzido de um terço do peso próprio de uma laje maciça de mesma espessura, ou seja, tem uma redução de cerca de 33%. Este valor varia de acordo com a espessura adotada, isso por conta da colocação dos módulos de vazios nas lajes.

O fator para cortante é um redutor usado para minorar a resistência das lajes Bubbledeck ao cisalhamento, comparando-se com a resistência de uma laje de mesma espessura sendo maciça. Segundo (BUBBLEDECK INTERNACIONAL, 2008), testes realizados em laboratório pela empresa Bubbledeck, comprovam que as lajes com vazios não têm uma elevada resistência ao cisalhamento, por conta disso, na prática, nas regiões com elevada concentração de força cisalhante, com elevados momentos fletores, ou seja, nos apoios, não se colocam os módulos de vazios na laje, deixando-se a laje maciça e se necessário, incorporando mais aço para o combate ao cisalhamento.

E por último o fator para rigidez que é o redutor usado para o cálculo de deflexão (flechas) e que reduz a rigidez de uma laje lisa ou cogumelo de mesma altura. Este redutor varia entre 0,87 e 0,88 sendo aplicado ao produto EI (Modulo de Elasticidade x Momento de Inercia)

2.2.3 *Estudo Comparativo entre Lajes Bubbledeck e Lajes Maciças*

Em um estudo realizado pela empresa Bubbledeck com a Technical University of Darmstadt/Alemanha, onde foi comparada lajes do tipo Bubbledeck com lajes Maciças de espessuras do tipo 230 mm e 455 mm, obteve-se os seguintes resultados expostos na Figura 17.

Figura 17 - Resultados comparativos

<i>Em % de laje maciça</i>	BubbleDeck x Laje maciça		
	Mesma resistência	Mesma rigidez a flexão	Mesmo volume de concreto
Resistência	100	105	150 *
Rigidez a Flexão	87	100	300
Volume de Concreto	66	69	100

(fonte: BUBBLEDECK INTERNACIONAL, 2008)

Como podemos observar na primeira coluna da Figura, uma laje Bubbledeck que tenha a mesma resistência que uma laje maciça, ela tem uma redução de 13% em relação à rigidez à flexão da laje maciça, porém tem uma redução de concreto de 34%. Já uma laje Bubbledeck que tenha a mesma rigidez à flexão que uma laje maciça, coluna 2, essa laje Bubbledeck é 5% mais resistente que a laje maciça e ainda terá uma redução do volume de concreto de 31%. Uma laje Bubbledeck com o mesmo volume de concreto de uma laje maciça, coluna 3, tem uma resistência 50% maior que a laje maciça e ainda tem uma rigidez a flexão 200% maior. Estes resultados comprovam a eficiência das lajes Bubbledeck.

2.2.4 Destaques Bubbledeck

A tecnologia Bubbledeck é um sistema consolidado em vários países do mundo, com uma construção de mais de 400 edifícios, contabilizando cerca de 2000000 m² de lajes executados no mundo inteiro. Podemos assim destacar algumas obras, tais como:

O primeiro edifício usando a tecnologia Bubbledeck foi executado no ano de 1999, o *MILLENIUM TOWER*, (Figura 18) em Rotterdam, na Holanda, onde o projeto inicial foi desenvolvido para lajes alveolares, mas, após um estudo de viabilidade econômica houve a substituição por lajes Bubbledeck, gerando uma redução do ciclo de produção de 10 para 4 dias por pavimento, diminuindo cerca de 50% do número de pilares, e por conta da redução da altura total do edifício possibilitou a construção de dois andares a mais do projeto inicial isso por conta do uso de lajes Bubbledeck. (BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

Figura 18 - Millenum Tower, Rotterdam



(Fonte: BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

No Brasil, com a participação da Bubbledeck, foram realizadas várias construções, inicialmente a primeira construção foi na Sede da construtora Norberto Odebrecht, em Salvador, Bahia, outra obra foi o Edifício Garagem do Galeão (EDG), no Rio de Janeiro, e com mais destaque registra-se a obra do Novo Centro Administrativo do Distrito Federal (CADF), em Brasília.

Na obra do (CADF), Figura 19, a Tecnologia Bubbledeck foi adotada por conta de ter apresentado uma maior viabilidade econômica, produtividade e um impacto ambiental reduzido. Trata-se de uma obra de grande porte, cerca de 170 mil m² de área construída, necessitando a implantação de uma fábrica no próprio canteiro de obras, com produção de 1000m²/dia de painéis de laje Bubbledeck, onde foi usado 35% de concreto a menos e teve uma redução de escoramentos em 60% em relação ao projeto original evitando assim um corte de aproximadamente 2800 árvores por conta do uso de pré-lajes ao invés de assoalhos como escoramentos.

Figura 19 - Novo Centro Administrativo do Distrito Federal (CADF) - Brasília/DF



(Fonte: BUBBLEDECK BRASIL, 2017)

2.2.5 Vantagens das Lajes Bubbledeck

Por conta do processo construtivo das lajes Bubbledeck ser industrializado, é possível ter um bom planejamento e uma boa logística na obra, um maior controle de qualidade, uma produção em série com ganhos de escala. Reduzindo-se os serviços “in-loco”, nessa etapa construtiva, diminui-se a mão de obra uma vez que até 80% da armadura já vem montada no modulo, necessitando somente das ferragens de ligação e complementares que são colocadas no local. Caso sejam usados os painéis pré-fabricados tem-se ainda uma redução de até 60% dos escoramentos e a eliminação das formas do assoalho. A vantagem principal é a redução no peso próprio em cerca de 35%, o que permite um alívio nas estruturas de fundações.

Podemos citar outros benefícios como:

- Liberdade de projetos, possibilitando layouts mais flexíveis que adaptem as arquiteturas.
- Eliminação de vigas, estrutura apoiadas sobre pilares, possibilitando assim uma menor altura no pé-direito e uma maior produtividade.
- Passagens de instalações, que possibilita a introdução de tubos embutidos ou a permissão de furos na laje em qualquer local mesmo após a concretagem.
- Aparência agradável, devido aos painéis serem industrializados, permite que as superfícies inferiores das lajes tenham uma alta qualidade, possibilitando assim menor retrabalho e até dispensando revestimentos.

3 METODOLOGIA

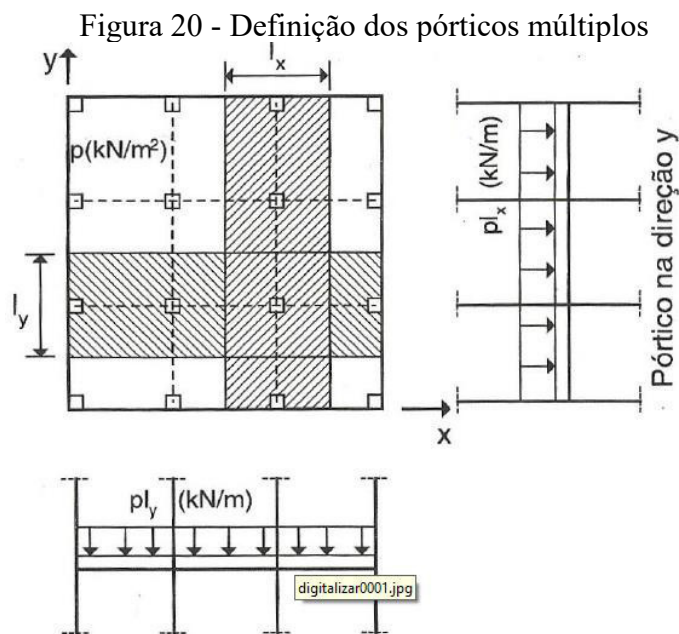
3.1 Método de Cálculo para Lajes Lisas e Bubbledeck

Existem dois modos de se calcular os esforços a flexão em lajes lisas: O elástico e o Plástico. Por conta de não ser um processo rápido ou programável os métodos baseados na teoria da plasticidade, são pouco usados. Já o método elástico ou clássico, segundo (CARVALHO; PINHEIRO, 2009) é um método baseado em equações de equilíbrio de um elemento infinitesimal de placa e nas relações de compatibilidade das deformações do elemento. Assim, para se encontrar as soluções dessas equações usam-se geralmente processos numéricos, no caso, elementos finitos.

Além do método dos elementos finitos, podem ser usados métodos mais simplificados como o método direto e o método dos pórticos equivalentes. Neste trabalho é utilizado o método dos Pórticos Equivalentes ou Múltiplos.

3.1.1 Método dos Pórticos Equivalentes ou Múltiplos

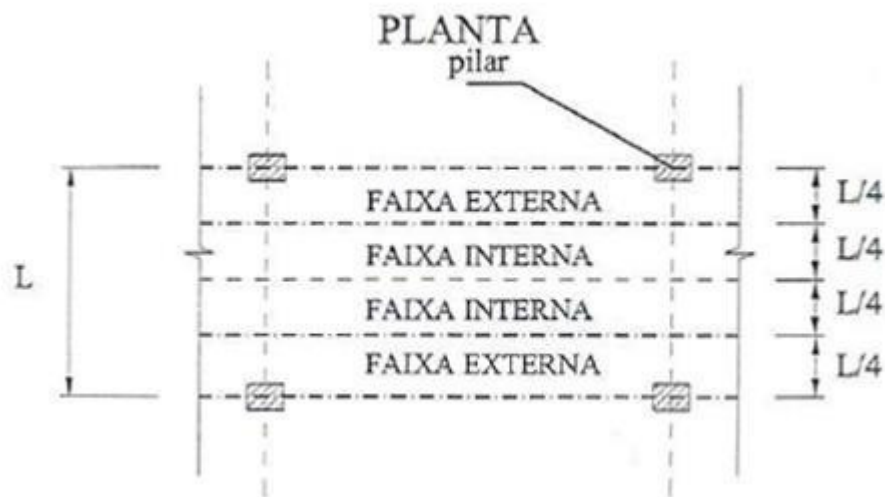
Segundo (CARVALHO; PINHEIRO, 2009) o método dos pórticos equivalentes ou múltiplos, é uma representação da estrutura, por meio de uma série de pórticos nas duas direções dos planos ortogonais, compostos de lajes e pilares, como mostra a Figura 20.



(Fonte: ARAÚJO, 2010)

Os pórticos múltiplos serão calculados em cada direção, uma independente da outra, para cargas verticais em suas áreas de influência no seu plano, para consequentemente encontrar os momentos positivos e negativos nas respectivas faixas da laje. Estas faixas são definidas conforme apresentado na Figura 21, e serão utilizadas para a distribuição das armaduras de flexão.

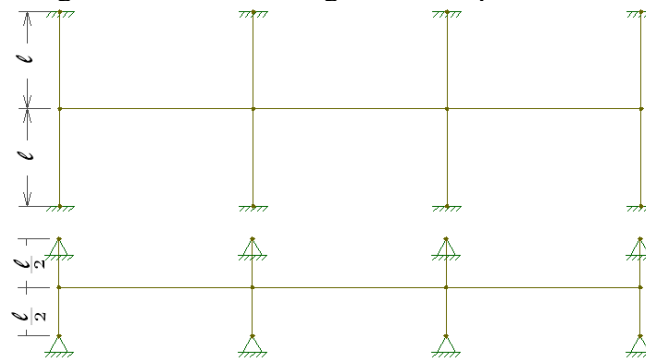
Figura 21 - Divisão dos Painéis segundo NBR 6118:2014



(Fonte: CARVALHO; PINHEIRO, 2009)

Na análise de ações gravitacionais, deve-se considerar cada pórtico com apenas um piso, sendo as extremidades de pilares engastados no pavimento superior e inferior ou os pilares podem ser considerados apenas apoiados na metade de altura entre os pavimentos adjacentes, como mostra a Figura 22.

Figura 22 - Pórticos engastados e apoiados



(Fonte: Autor)

Segundo a NBR 6118:2014, no item 14.7.8, o método dos pórticos equivalentes pode ser utilizado, se os pilares forem dispostos em filas ortogonais e que a laje tenha uma espessura mínima de 16 cm se for lisa e 14 cm caso seja uma laje cogumelo.

A distribuição de momentos críticos positivos e negativos, segundo a NBR 6118:2018 item 14.7.8, deve ser feita nas faixas externas (junto aos pilares) e internas (no centro da laje) com os seguintes coeficientes de redução de acordo com sua faixa.

Para os momentos positivos:

- 45% dos momentos positivos para as duas faixas internas (faixas centrais)
- 27,5% dos momentos positivos para cada uma das faixas externas (faixa dos pilares)

Para os momentos negativos:

- 25% dos momentos negativos para duas faixas internas (faixas centrais)
- 37,5% dos momentos negativos para cada uma das faixas externas (faixas dos pilares)

3.2 Cálculo da Armadura de Flexão no Estado Limite Último

Segundo (MORAES, 2013), pode-se usar a equação adimensional 1 e a equação 2, para o cálculo da armadura de flexão simples de uma seção retangular de concreto.

$$Kmd = \frac{Msd}{b_w d^2 f_{cd}} \quad (1)$$

$$As = \frac{Msd}{K_z d f_{yd}} \quad (2)$$

Onde:

d = altura útil da laje;

Msd = momento Solicitante de Cálculo;

fcd = resistência de cálculo à compressão do concreto;

b_w = largura da faixa;

A_s = área de armadura de flexão necessária;

f_{yd} = resistência de cálculo da armadura flexão;

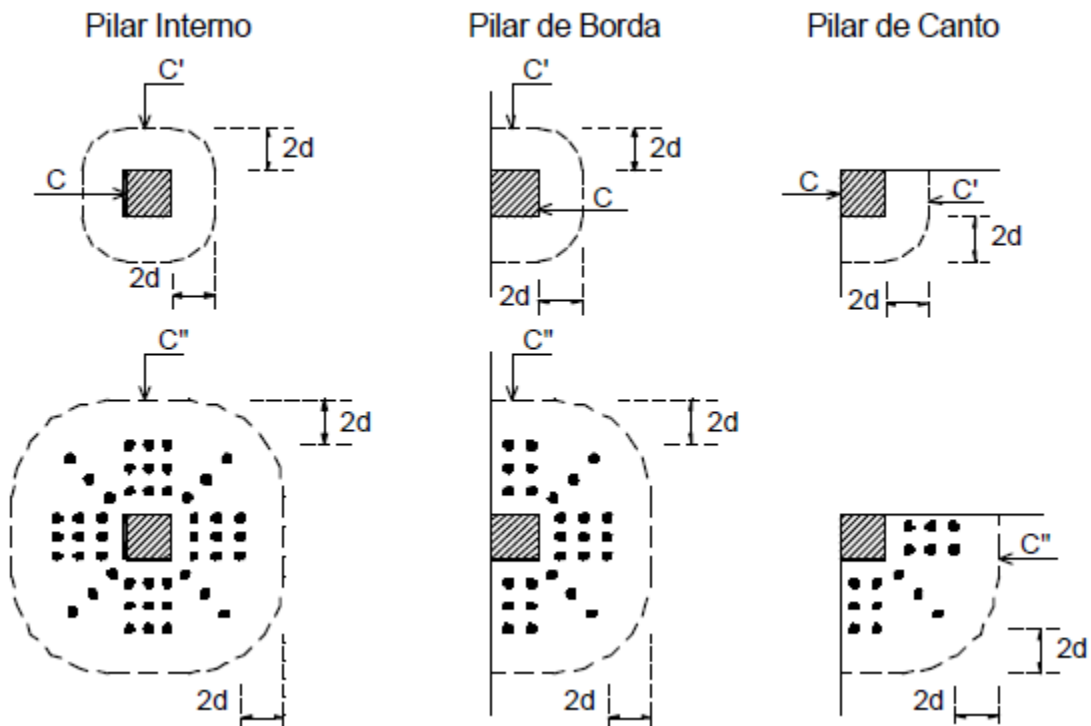
K_{md} = coeficiente adimensional calculado para obtenção do K_z ;

K_z = coeficiente adimensional tabelado dependente do K_{md} ;

3.3 Verificação do Puncionamento

Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) apresenta um modelo de cálculo para a verificação da ruína por punção no estado limite último, onde é feita a verificação em duas ou mais superfícies críticas, definidas no entorno do pilar. Essas superfícies críticas, são definidas como mostra a Figura 23. Definindo a primeira superfície crítica no contorno C, correspondente ao contorno do pilar ou da carga centrada. A segunda superfície crítica é definida no contorno C', que está afastado de uma distância $2d$ do pilar ou da carga centrada, sendo d a espessura da laje. E no caso em que seja necessário o uso de armadura de punção, deve-se verificar uma terceira superfície crítica C'', situada a uma distância $2d$ da última linha de conectores, como mostra a Figura 23

Figura 23 - Definições de superfícies críticas



(Fonte: GUARDA; LIMA; PINHEIRO, [s.d.])

Caso não seja previsto o uso de armadura de punção, devem ser atendidas as duas

verificações a seguir:

1. Verificação da compressão do concreto, no perímetro crítico C, através da seguinte expressão: $\tau_{Rd2} \geq \tau_{sd}$
2. Verificação da punção, no segundo perímetro crítico C', através da seguinte expressão $\tau_{Rd1} \geq \tau_{sd}'$

Caso seja prevista armadura de puncionamento, deverá se fazer outra verificação, que é a verificação da punção no terceiro perímetro crítico C'', através da seguinte expressão $\tau_{Rd3} \geq \tau_{sd}''$

3.3.1 Tensões Resistentes

Para o cálculo das tensões resistentes, são usadas as 3 equações a seguir, de acordo a sua superfície crítica.

3.3.1.1 Tensão Resistente em C

Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), deve ser verificada a tensão resistente em C, em lajes que são submetidas a punção, sejam elas com ou sem armadura de cisalhamento, assim a tensão resistente na superfície C, pode ser calculada pela equação 3.

$$\tau_{sd} \leq \tau_{Rd2} = 0,27\alpha_v fcd \quad (3)$$

Onde:

τ_{sd} = tensão de cisalhamento solicitante de cálculo em C;

τ_{Rd2} = tensão de cisalhamento resistente de cálculo limite para verificação a compressão diagonal do concreto na ligação laje-pilar;

$$\alpha_v = \left(1 - \frac{fck}{250}\right), fck \text{ (MPa)}$$

fcd = resistência de cálculo a compressão do concreto;

3.3.1.2 Tensão Resistente em C' sem armadura de punção

Calcula-se a tensão resistente na região crítica em C', sem armadura de punção pela equação 4 e compara-se com a tensão solicitante em C', para verificar se existe ou não a necessidade de utilização de armadura contra o puncionamento.

$$\tau_{Sd'} \leq \tau_{Rd1} = 0,13 \left(1 + \sqrt{\left(\frac{20}{d}\right)(100 \rho fck)^{1/3}} \right) \quad (4)$$

Onde:

τ_{Sd}' = tensão de cisalhamento solicitante de cálculo em C';

τ_{Rd1} = tensão de cisalhamento resistente de cálculo limite, para que uma laje possa prescindir de armadura transversal para resistir a força cortante;

d = altura útil da laje;

$$\alpha_v = \left(1 - \frac{fck}{250} \right), fck \text{ (MPa)}$$

ρ = taxa geométrica da armadura de flexão aderente;

fck = resistência de característica a compressão do concreto em MPa;

3.3.1.3 Tensão Resistente em C' com armadura de punção

Em casos que tenha armadura de punção, a tensão resistente, na superfície crítica C'', deve ser calculada segunda a equação 5.

$$\tau_{Sd}' \leq \tau_{Rd3} = 0,10 \left(1 + \sqrt{\left(\frac{20}{d}\right)} \right) (100 \rho fck)^{1/3} + 1,5 \frac{d A_{sw} f_{ywd} \text{sen } \alpha}{S_r u d} \quad (5)$$

Onde:

τ_{Sd}' = tensão de cisalhamento solicitante de cálculo em C';

τ_{Rd3} = resistência de cálculo, dada por unidade de comprimento critico, para lajes com armadura de punção;

d = altura útil da laje;

ρ = taxa geométrica da armadura de flexão aderente;

fck = resistência de característica a compressão do concreto em MPa;

$S_r \leq 0,75 d$ = espaçamento radial entre as camadas da armadura de cisalhamento;

A_{SW} = área da armadura de punção num contorno completo paralelo ao contorno C’;

f_{ywd} = resistência de cálculo da armadura de punção.

α = ângulo de inclinação entre o eixo da armadura de punção e o plano da laje;

u' = perímetro crítico C’ ou perímetro crítico reduzido no caso de pilares de borda ou de canto;

Caso seja adotada uma armadura de cisalhamento, preferencialmente, deve ser disposta radialmente a partir do perímetro do pilar e constituída por três ou mais linhas de conectores tipo pino.

3.3.2 Tensões Solicitantes

As tensões solicitantes variam de acordo com as posições dos pilares, assim possuímos pilar de canto, pilar de borda e pilar interno, ver Figura 23.

3.3.2.1 Cálculo da Tensão Solicitante Pilar interno com carregamento simétrico

Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), o cálculo para tensão solicitante, pode abordar os casos dos pilares internos de carregamentos simétricos, será calculado uma tensão de solicitante de acordo as equações 6 para superfície C e a equação 7 para superfície C’.

$$\tau_{sd} = \frac{Fsd}{u d} \quad (6)$$

$$\tau_{sd'} = \frac{Fsd}{u' d} \quad (7)$$

Onde,

τ_{sd} = tensão de cisalhamento solicitante de cálculo em C;

Fsd = força ou reação concentrada, de cálculo;

u = perímetro do contorno crítico C;

d = (dx + dy)/ 2;

d = altura útil da laje;

dx e dy = alturas uteis nas duas direções ortogonais;

$\tau_{sd'}$ = tensão de cisalhamento solicitante de cálculo em C’;

u' = perímetro do contorno crítico C';

3.3.2.2 Cálculo da Tensão Solicitante Pilar interno com efeito do momento

Em situações de casos de o pilar interno além da força vertical, exista uma transferência de momento da laje para o pilar, deve-se considerar assimetria, causado pelo efeito do momento, calculado pela equação 8.

$$\tau_{sd} = \frac{Fsd}{u d} + \frac{KMsd}{W_p d} \quad (8)$$

Onde,

τ_{sd} = tensão de cisalhamento solicitante de cálculo em C;

Fsd = força ou reação concentrada, de cálculo;

u = perímetro do contorno crítico C;

d = altura útil da laje;

K = coeficiente que fornece a parcela de Msd transmitida ao pilar por cisalhamento;

Msd = momento solicitante de cálculo;

Wp = módulo de resistência plástica do perímetro crítico;

O valor do coeficiente K é obtido na Figura 24, e os valores de Wp para pilares retangulares serão calculados pela equação 9.

Figura 24 - Valores de K

C_1/C_2	0,5	1,0	2,0	3,0
K	0,45	0,60	0,70	0,80

(Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p 161)

$$W_p = \frac{C_1^2}{2} + C_1 C_2 + 4C_2 d + 16d^2 + 2d\pi C_1 \quad (9)$$

Onde,

Wp = módulo de resistência plástica do perímetro crítico;

C_1 = dimensão do pilar paralela à excentricidade da força;

C_2 = dimensão do pilar perpendicular à excentricidade da força;
 d = altura útil da laje;

3.3.2.3 Pilares de Borda

• Quando não agir momento no plano paralelo à borda livre, calcula-se pela equação 10.

$$\tau_{sd} = \frac{Fsd}{u^* d} + \frac{K_1 M_{sd}}{W_{p1} d} \quad (10)$$

Onde,

Fsd = é a reação de apoio

u^* = é o perímetro crítico reduzido;

M_{sd} = é o momento de cálculo no plano perpendicular à borda livre, $M_{sd} = (M_{sd1} - M_{sd*}) \geq 0$

M_{sd*} = é o momento de cálculo resultante da excentricidade do perímetro crítico reduzido u^* em relação ao pilar;

W_{p1} = é o modulo de resistência plástica perpendicular à borda livre;

• Quando agir momento no plano paralelo a borda livre, calcula-se pela equação 11.

$$\tau_{sd} = \frac{Fsd}{u^* d} + \frac{K_1 M_{sd}}{W_{p1} d} + \frac{K_2 M_{sd2}}{W_{p2} d} \quad (11)$$

Onde:

M_{sd2} = é o momento de cálculo no plano paralelo à borda livre;

W_{p2} = é o modulo de resistência plástica na direção paralela a borda livre;

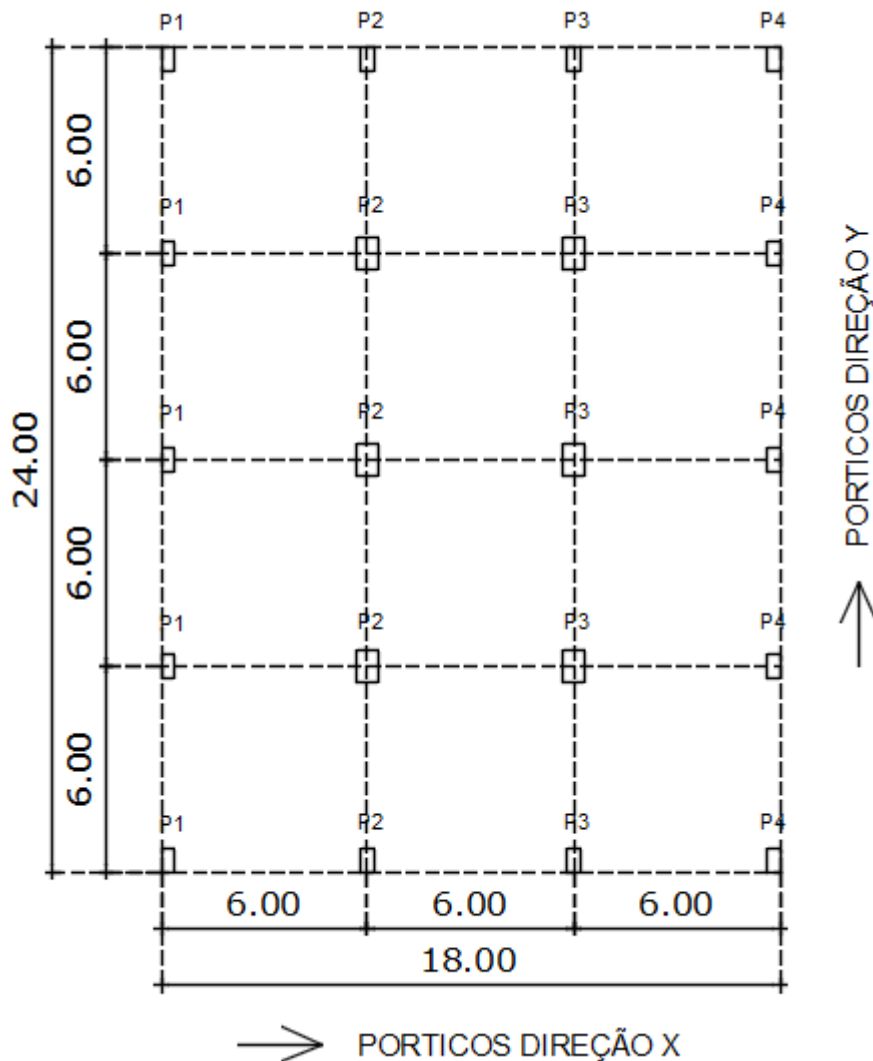
3.3.2.4 Pilares de Canto

Para os pilares de canto, é o mesmo cálculo dos pilares de borda quando não age o momento no plano paralelo à borda. Porém como no pilar de canto tem as duas bordas livres, deve ser feita a verificação para duas bordas, considerando o momento fletor, perpendicular à borda livre adotada.

4 PROJETO ANALISADO (ESTUDO DE CASO)

Será analisado um pavimento tipo de um edifício como estudo de caso de dimensionamento de uma laje Bubbledeck. O projeto é dimensionado para os sistemas de Lajes Bubbledeck e Lajes Lisas. Na planta arquitetônica foram desconsideradas as partes de caixa de elevador e escada. As alvenarias foram consideradas distribuídas como uma carga uniforme na laje para permitir um layout flexível de acordo com a demanda. Como mostra a Figura 25, a planta de forma, totaliza uma área de 24 x 18 m², com pilares de intereixo de 6 m, com alturas de pilares de 3m, dimensões de 40 x 60 cm para pilares de extremidades e 60 x 80 para pilares centrais.

Figura 25 - Planta de fôrmas



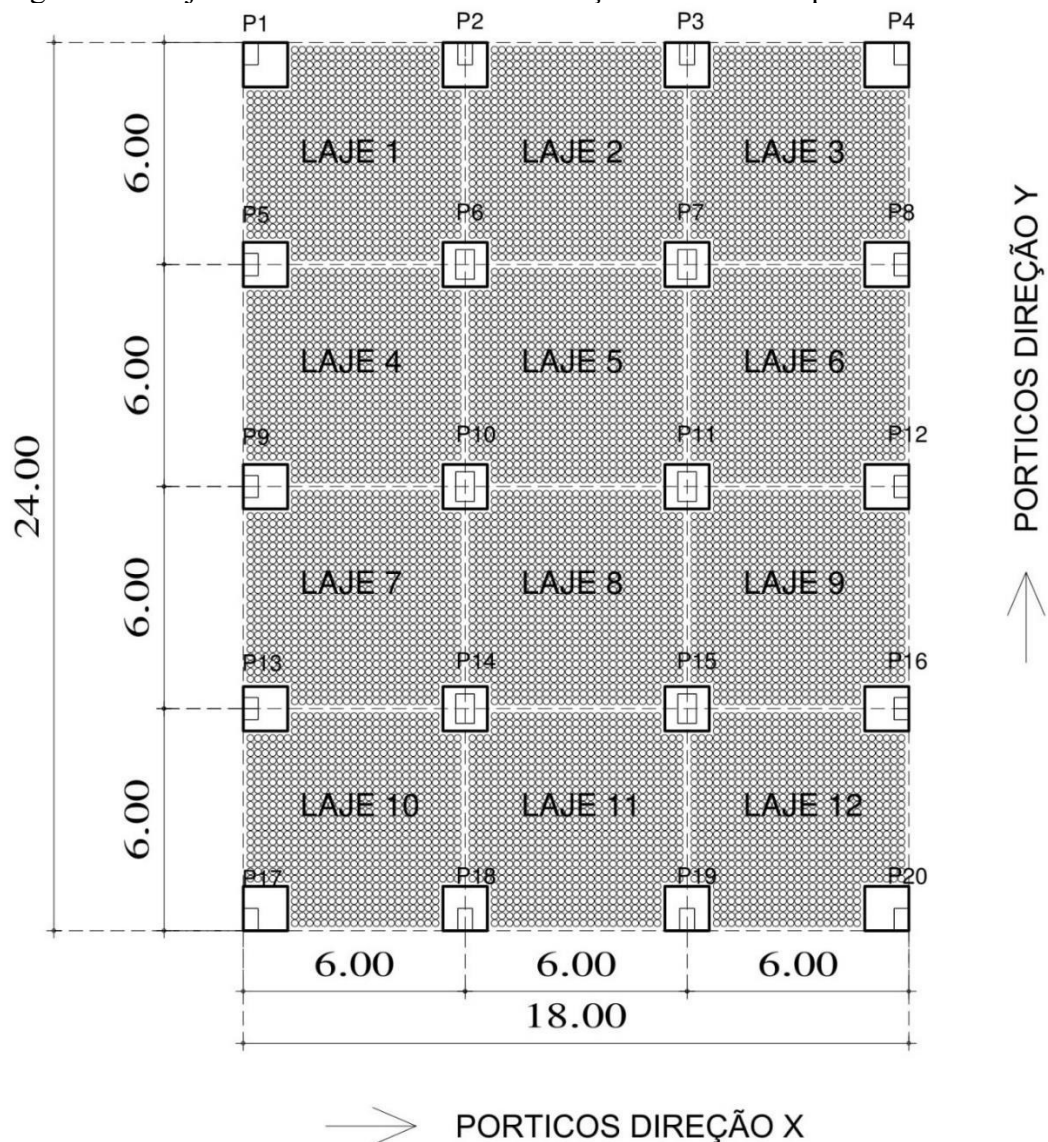
(Fonte: Autor)

4.1 Dimensionamento de Laje Bubbledeck

Foi escolhida a laje Bubbledeck do tipo BD230 de espessura de 23 cm e com esferas de diâmetros de 18 cm, pois segundo o fabricante na Tabela 2, é a mais indicada para o intereixo entre pilares de 6 m. Assim, será dimensionada também uma laje Lisa de mesma espessura para efeito de comparação.

No projeto foram utilizados painéis de 6,00m x 6,00 m, com a consideração de uma área maciça em volta dos pilares para aumentar a resistência à punção. Recomenda-se que essa região extenda-se até uma distância mínima em volta do pilar de duas vezes a sua altura ou seja, 46 cm, porém será adotado um perímetro de 1,2 m, totalizando uma área de 1,2 x 1,2 m² em volta dos pilares, como mostra a Figura 26.

Figura 26 - Lajes Bubbledeck com áreas maciças em volta dos pilares



(Fonte: Autor)

4.1.1 *Peso Próprio*

Para se calcular o peso próprio da laje Bubbledeck, foi considerado o peso de uma laje maciça de mesma espessura, retirando-se o volume que as esferas da Bubbledeck ocupam que são os vazios.

Na tabela 4, estão expostos alguns dados necessários para se calcular o peso próprio da laje Bubbledeck: o volume correspondente a uma laje maciça de mesma espessura, peso específico do concreto, diâmetro das bolas (bubbles), espaçamento entre as bolas e a quantidade de bolas por m².

Tabela 4 - Dados de uma Laje Bubbledeck

Espessura	23	cm
Área total	432	m ²
Vol. Laje Maciça de mesma espessura	99,36	m ³
Diâmetro Bubbles	18	cm
Vol. Bubbles	0,00305	m ³
PE Concreto	25	kN/m ³
Esp. entre Bubbles	0,20	m
Quantidade Bubbles	25	/m ²

(Fonte: Autor)

Primeiramente foi calculado o número total de bolas dentro da laje. Para se obter esse número, primeiro se obteve área maciça dos entornos dos pilares e subtraiu da área total da laje, com isso podemos obter área de ocupação das bolas e obter o total delas, como mostra a Tabela 5, obtém-se um total de 10080 bolas na laje.

Tabela 5 - Quantidade de Esferas em Painéis

Painéis	6,0 x 6,0	m ²
Quantidade de Painéis	12	Nº
Área por Painel	36	m ²
Área Total dos Painéis	432	m ²
Perímetro Maciço envolta do Pilar	1,2 x 1,2	m ²
Área Maciça envolta do Pilares	1,44	m ²
Pilares	20	nº
Área Total Maciça envolta dos Pilares	28,8	m ²
Total de Área das Bubbles	403,2	m ²
Total de BD	10080	Bubbles

(Fonte: Autor)

Com a quantidade de esferas plásticas no pavimento, podemos calcular o peso próprio da Laje Bubbledeck, como mostra a Tabela 6. Obtem-se um peso próprio de 3,97 kN/m², que foi obtido a partir do volume de concreto da laje Bubbledeck multiplicado pelo peso específico do concreto e dividido pela área da laje. Também podemos obter a espessura equivalente da laje Bubbledeck em relação à laje lisa, ou seja, a espessura que a laje Bubbledeck teria se fosse uma laje maciça.

Tabela 6 - Peso Próprio da Laje Bubbledeck

Vol. Total de BD	30,78 m ³
Vol. Laje Maciça	99,36 m ³
Vol. Concreto em laje BD	68,58 m ³
Carga distribuída	3,97 kN/m ²
Porcentagem reduzida de Volume Concreto	31,0 %
Espessura equivalente	15,87 cm

(Fonte: Autor)

4.1.2 Carregamentos Utilizados

De acordo com os cálculos feitos na Tabela 6, pode-se obter uma carga distribuída do peso próprio da Laje Bubbledeck de 3,97 kN/m².

No projeto analisado é utilizado como alvenaria, blocos cerâmicos de 9 cm com um revestimento nas duas faces com espessura de 2,5 cm cada, totalizando uma parede acabada de 14 cm. Como o peso específico de uma parede acabada segundo NBR 6120 é de 15 kN/m³, totaliza assim um carregamento distribuído de alvenaria na laje de 2,1 kN/m²

Como o acabamento final de uma laje Bubbledeck é quase perfeito, será usado como revestimento no teto, só uma argamassa simples de areia, cal e cimento de espessura de 1 cm com um peso específico de 19 kN/m³, totalizando assim um carregamento distribuído de 0,19 kN/m².

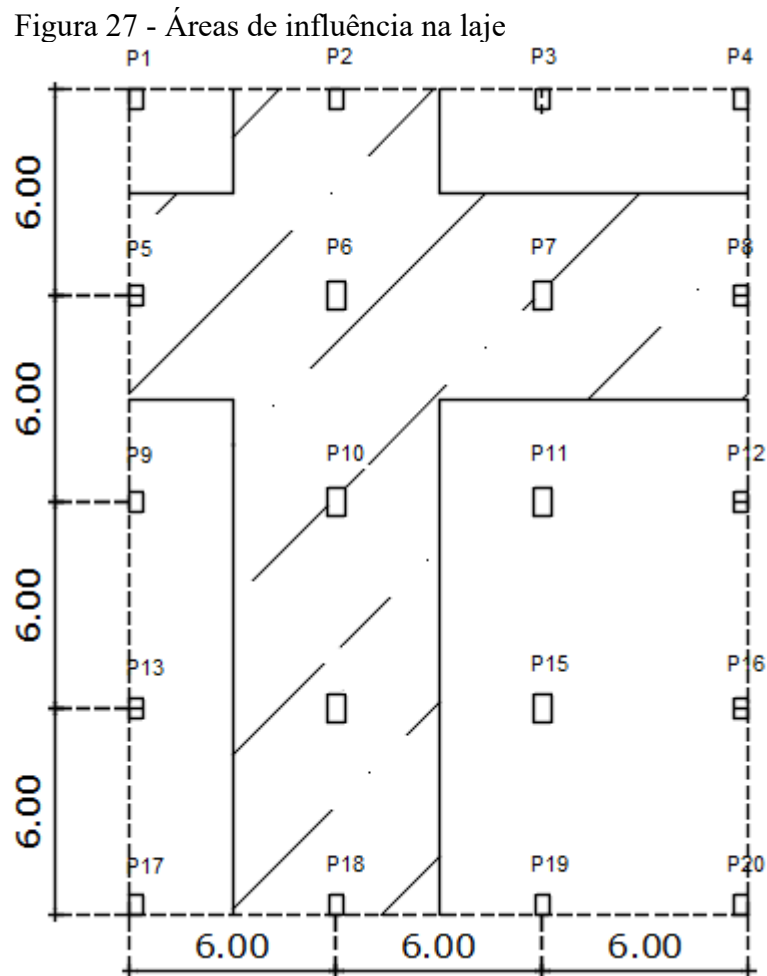
Como para o piso da laje é utilizado um contrapiso de 5 cm de espessura, com um peso específico de argamassa (Areia e Cimento) de 21 kN/m³, tem-se um carregamento de 1,05 kN/m²

O piso, a ser adotado será placa cerâmica com espessuras de 1 cm e peso específico de 21 kN/m³, totalizando um carregamento de 0,21 kN/m². E como o edifício será um Torre Residencial, será adotado uma carga de uso residencial segundo NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO

BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980), de 2 kN/m², totalizando assim um carregamento na laje Bubbledeck de 9,52 kN/m².

4.1.3 Cálculo dos Esforços Utilizando o Método dos Pórticos Equivalentes

Os esforços foram calculados pelo método dos pórticos equivalentes da norma NBR:6118:2014 apresentado no item 3.1.1. Na modelação do pórtico os pilares são considerados engastados no topo e na base, pois o pavimento é tratado como uma laje intermediária. A viga de cada pórtico tem sua dimensão em planta definida pela largura da área de influência de cada alinhamento de pilar e sua altura corresponde à espessura da laje, como mostra a Figura 27

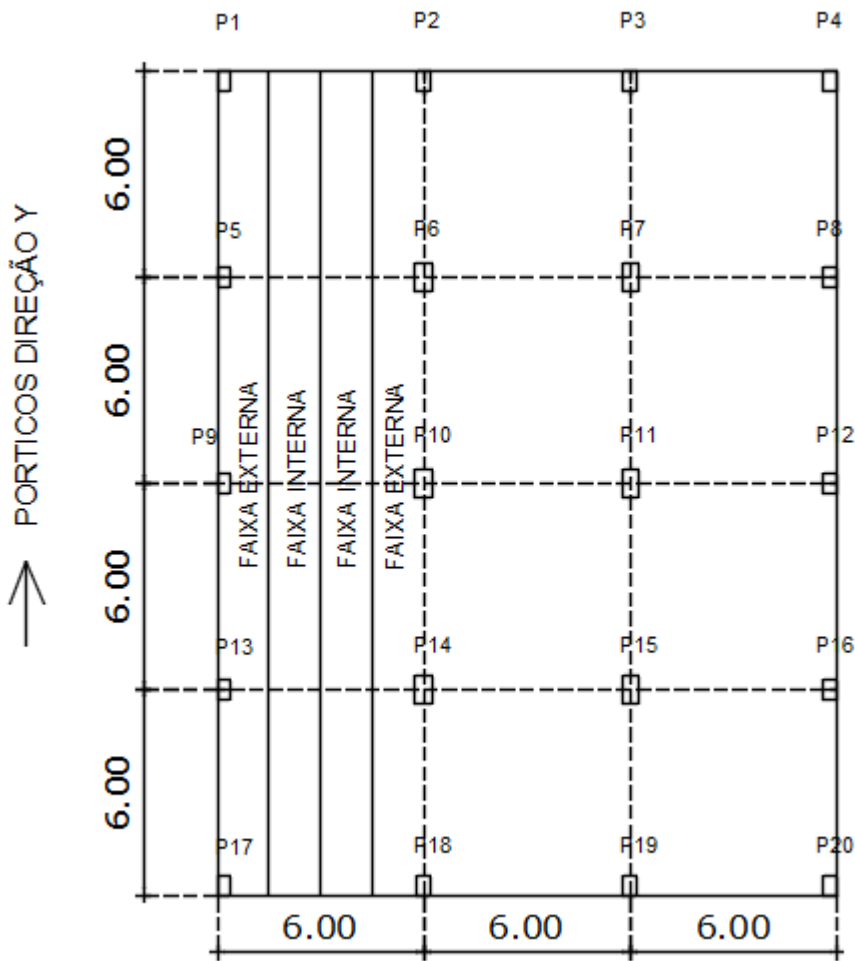


(Fonte: Autor)

Para consideração da viga no pórtico da laje Bubbledeck, foi feito a redução de inércia da faixa, por meio de um fator de redução (FRR) indicado pela Bubbledeck, onde a rigidez cheia seria $E \times J = (6 \times 0,23^3/12)$ para lajes lisas, logo nas lajes bubbledeck a rigidez

corresponde a $(E \times J \times FRR)$, considerando assim um FRR de 0,88 para lajes de 23 cm de espessura, a rigidez reduzida ficou de $0,88 \times 6,00 \times 0,23^3/12$, e a modelagem do pórtico foi considerado com os pilares engastados nas extremidades. Uma vez calculados os esforços, a laje será dividida em quatro faixas de iguais dimensões, como mostra a Figura 28 para o caso dos pórticos na direção Y. Como existe uma simetria na laje nas direções x e y, é calculado um pórtico apenas em uma das duas direções.

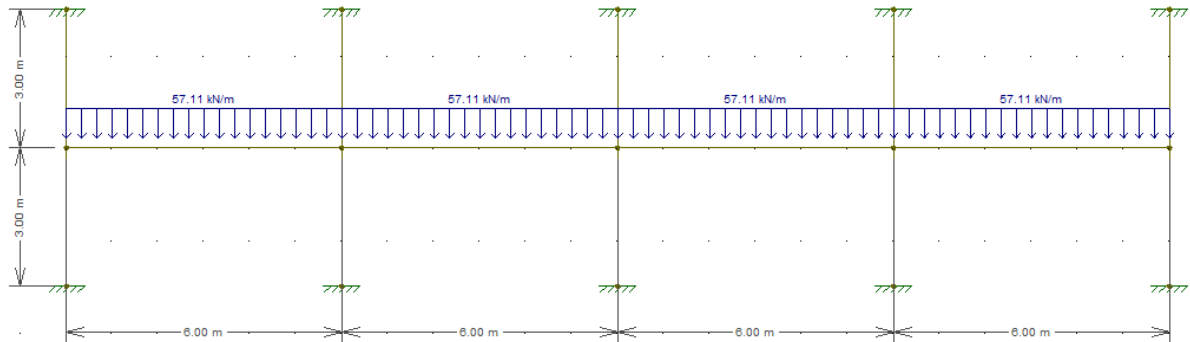
Figura 28 - Faixas de pilares para o Método do Pórtico Equivalente na direção Y



(Fonte: Autor)

Multiplicando-se o carregamento total na laje de $9,52 \text{ kN/m}^2$ pelo comprimento da viga, obtém-se o carregamento distribuído uniformemente no pórtico como mostra a Figura 29

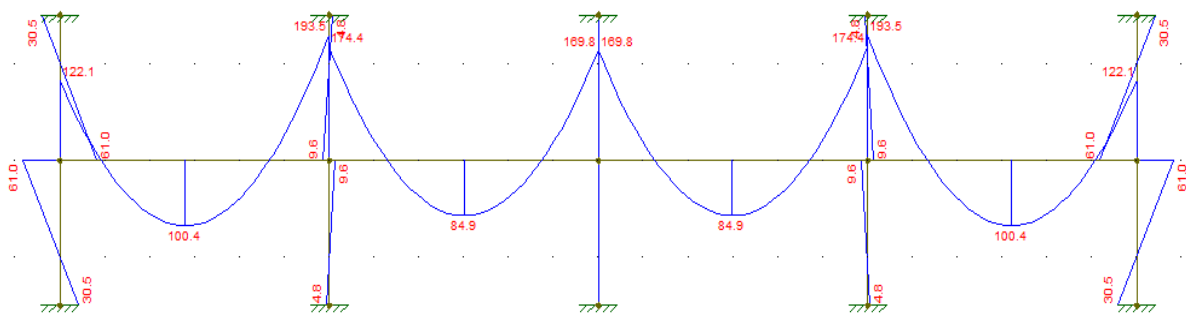
Figura 29 - Pórtico Equivalente Pavimento Tipo



(Fonte: Autor)

Calculando o pórtico anterior, obtêm-se os seguintes momentos fletores de referência na laje, como mostra Figura 30 e Tabela 7

Figura 30 - Momentos Fletores de Referência



(Fonte: Autor)

Tabela 7 - Momentos de Referência

Vão	Carregamento distribuído (kN/m)
6	57,11
Momentos de Referência Positivos (kN.m)	
Positivo tramo externo	100,40
Positivo tramo interno	84,90
Positivo tramo central	84,90
Momentos de Referência Negativos (kN.m)	
Negativo pilar externo	122,10
Negativo Pilar interno	193,50
Negativo Pilar Central	169,8

(Fonte: Autor)

Após a obtenção dos momentos de referência do pórtico equivalente, esses momentos serão distribuídos segundo a porcentagem que cada faixa exige citado no item 3.1.1,

nos quais as faixas serão divididas em externas e internas, como mostra as Tabela 8 para os momentos positivos e Tabela 9 para os momentos negativos. A Figura 31, representa a distribuição final dos momentos nas lajes, que conseqüentemente vai ser replicada para as lajes posteriores.

Tabela 8 - Momentos Positivos Distribuídos nas Faixas

Faixas	Momento Positivos (kN.m)		
	Tramo externo	Tramo interno	Tramo Central
Faixa Externa	27,6	23,3	23
Faixa Interna	45,2	38,2	38

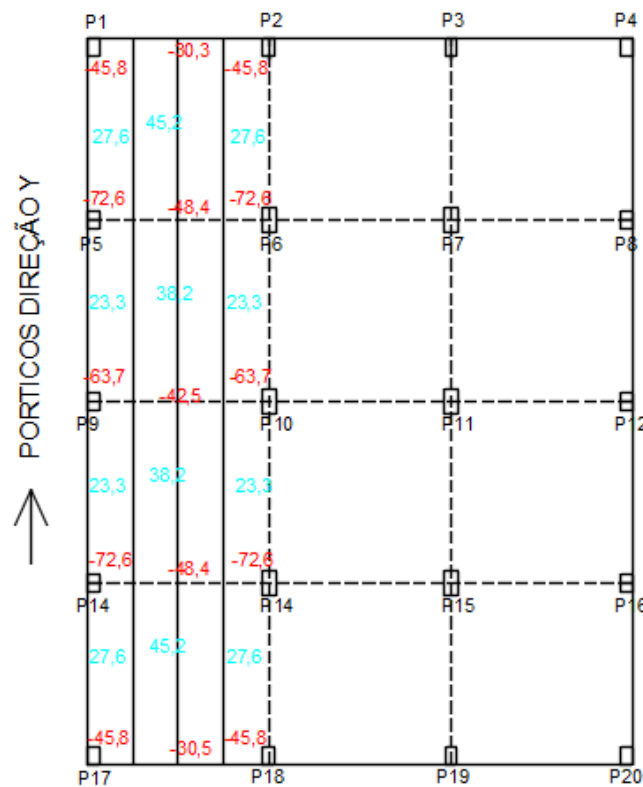
(Fonte: Autor)

Tabela 9 - Momentos Negativos Distribuídos nas Faixas

Faixas	Momento Negativos (kN.m)		
	Pilar externo	Pilar interno	Pilar Central
Faixa Externa	45,8	72,56	63,7
Faixa Interna	30,53	48,38	42,45

(Fonte: Autor)

Figura 31 - Distribuições final dos momentos nas faixas



(Fonte: Autor)

4.1.4 Dimensionamento das Armaduras

Para o cálculo de armaduras de flexão será usado o método citado no item 3.4 para cálculo de armaduras, onde serão considerados as piores hipóteses. No estudo de caso para o momento positivo, foi utilizado o momento de 45,20 kN.m e o momento negativo foi -72,6 kN.m. Uma observação que esses valores são todos característicos, serão majorados posteriormente.

4.1.4.1 Cálculo da Armadura Positiva (Armadura Inferior do Painel)

A armadura positiva utilizada nos painéis serão a mesma nos dois sentidos, onde será utilizado um $f_{ck} = 30$ MPa, o Aço CA-50, e um cobrimento da armadura de 2 cm.

$$M_k = 45,20 \text{ kN.m}$$

$$M_{dmax} = 63,25 \text{ kN.m/m}$$

$$e = 0,23 \text{ m}, c = 0,02 \text{ m}$$

$$d = e - c = 0,21 \text{ m}$$

$$f_{yd} = \frac{50 \text{ kN/cm}^2}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{cd} = \frac{30 \text{ 000 kN/m}^2}{1,4} = 21428,57 \text{ kN/m}^2$$

$$K_{md} = \frac{M_d}{1 (m) \times d^2 \times f_{cd}} = \frac{63,25}{1 \times 0,21 \times 21428,57} = 0,067$$

Com o k_{md} , usando tabela de dimensionamento de seção retangular de acordo com a NBR 6118. Obtém-se o $k_z = 0,959$

$$A_s = \frac{M_d}{K_z \times d \times f_{yd}} = \frac{63,25}{0,959 \times 0,21 \times 43,48} = 7,23 \text{ cm}^2/\text{m}$$

4.1.4.2 Cálculo da Armadura Negativa (Armadura superior sobre os pilares)

A armadura negativa sobre as regiões dos pilares, também será a mesma nas duas direções, onde será utilizado um $f_{ck} = 30$ MPa, o Aço CA-50, e um cobrimento da armadura de 2 cm.

$$M_k = 72,56 \text{ kN.m}$$

$$M_{dmax} = 101,59 \text{ kN.m}$$

$$e = 0,23 \text{ m}, c = 0,02 \text{ m}$$

$$d = e - c = 0,21 \text{ m}$$

$$f_{yd} = \frac{50 \text{ kN/cm}^2}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{cd} = \frac{30\,000 \text{ kN/m}^2}{1,4} = 21428,57 \text{ kN/m}^2$$

$$K_{md} = \frac{M_d}{1 (m) x d^2 x f_{cd}} = \frac{101,59}{1 x 0,21 x 21428,57} = 0,119$$

Com o k_{md} , usando tabela de dimensionamento de seção retangular de acordo com a NBR 6118. Obtém-se o $k_z = 0,9246$

$$A_s = \frac{M_d}{K_z x d x f_{yd}} = \frac{101,59}{0,9246 x 0,21 x 43,48} = 12,64 \text{ cm}^2/\text{m}$$

4.1.4.3 Verificação ao Puncionamento

Devido aos esforços de forças concentradas nas regiões dos pilares em lajes lisas, é necessário se fazer a verificação ao puncionamento. Como a laje Bubbledeck é um tipo de laje Lisa, segue os mesmos critérios. Foi escolhido um pilar interno (P10), um pilar de borda (P5) e um pilar de canto (P1) como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 - Características dos Pilares

PILARES	Dimensões	Pórtico X		Pórtico y		R médio N (KN)	
		Mx (kNm)	Vx (kNm)	My (kNm)	Vy (kNm)		
PILAR INTERNO	P10	50 x 80	0	177,3	0	170,6	173,95
PILAR BORDA	P5	40 x 60	30,5	79,7	4,8	177,7	128,7
PILAR CANTO	P1	40 x 60	30,5	79,7	30,5	79,7	79,7

(Fonte: Autor)

Assim, segundo as equações 3 a 11, mencionada na revisão bibliográfica pode-se fazer as verificações de puncionamento, obtendo seguintes resultados como mostra a Tabela 11.

Tabela 11 - Verificações Puncionamento em Laje Bubbledeck

PILARES	Dimensões	Fsd (kN)	C: Tsd (Mpa)	C': Tsd' (Mpa)	Trd2 (Mpa)	Trd1 (Mpa)	Trd2 > Tsd	Trd1 > Tsd'	
PILAR INTERNO	P10	50 x 80	243,5	0,47	0,24	5,09	0,71	ok	ok
PILAR BORDA	P5	40 x 60	180,18	1,13	0,41	5,09	0,71	ok	ok

PILAR CANTO	P1	40 x 60	111,58	1,5	0,49	5,09	0,71	ok	ok
-------------	----	---------	--------	-----	------	------	------	----	----

(Fonte: Autor)

Como podemos observar na Tabela 11, para todos pilares das lajes bubbledeck, não houve necessidade de colocar armadura de puncionamento. Fazendo a verificação da região da laje maciça em volta do pilar:

$$\frac{Fsd}{4 \times l \times d} = \tau Rd1 = \frac{243,5 \text{ kN}}{4 \times l \times 0,20\text{m}} = 0,71 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$$

Resolvendo a equação acima, logo o $l = 0,43 \text{ m}$, como a região maciça estipulada em volta de pilar foi de $1,20 \times 1,20 \text{ m}^2$, está satisfeita a condição de verificação de puncionamento.

4.2 Dimensionamento da Laje Lisa

Para o dimensionamento de lajes lisa, foi utilizado o mesmo modelo de pórticos equivalente, no qual foi dimensionada a Laje Lisa de mesma espessura da laje Bubbledeck, 23 cm, para efeito de comparação. Assim, com a espessura definida obtemos peso próprio da laje Lisa, como a Tabela 12.

Tabela 12 - Peso Próprio de Laje Lisa

Espessura	23	cm
Área total	432	m ²
Vol. laje maciça	99,36	m ³
PE Concreto	25	kN/m ³
Carga distribuída	5,75	kN/m ²

(Fonte: Autor)

Os carregamentos utilizados na laje Lisa, serão os mesmos utilizados anteriormente na laje Bubbledeck, tais como:

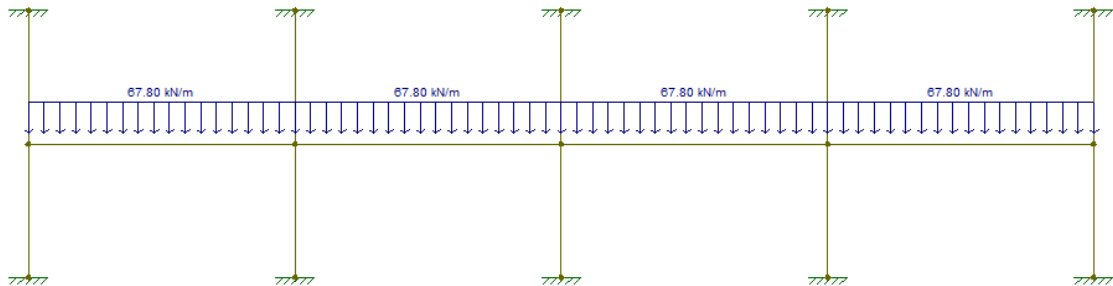
- Alvenaria: 2,1 kN/m²
- Contrapiso: 1,05 kN/m²
- Piso: 0,21 kN/m²
- Revestimento do teto: 0,19 kN/m²

- Carga Acidental segundo NBR 6120/1980: 2,00 kN/m²

Assim, totalizando um carregamento total atuante na laje Lisa de 11,30 kN/m² e utilizando o mesmo método de pórticos equivalente, podemos obter os esforços na laje Lisa. Por ser simetria dos vãos, considerou-se apenas uma direção para efeito de cálculo.

Multiplicando-se o carregamento total na laje de 11,30 kN/m² pelo tamanho do vão podemos obter o seguinte carregamento distribuído uniformemente no pórtico, como mostra a Figura 32

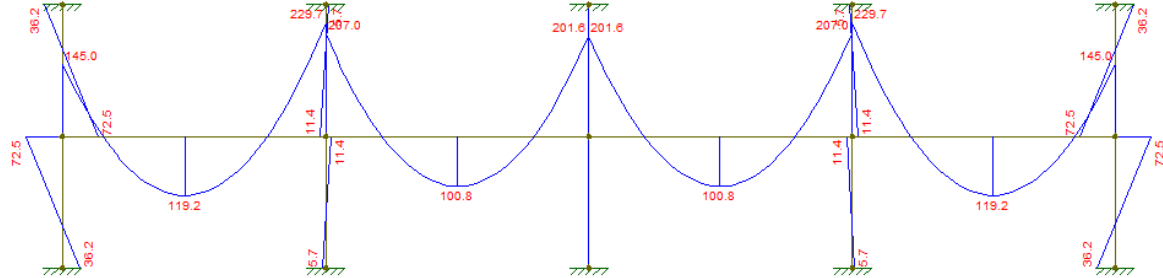
Figura 32 - Carregamento Laje Lisa



(Fonte: Autor)

Assim, calculando o pórtico anterior, obtemos os seguintes momentos fletores de referência na laje, como mostra Figura 33 e a Tabela 13

Figura 33 - Momentos de Referência Laje Lisa



(Fonte: Autor)

Tabela 13 - Momentos de Referência Laje Lisa

Vão	Carregamento distribuído (kN/m)
6	67,8
Momentos de Referência Positivos (kN.m)	
Positivo tramo externo	119,2
Positivo tramo interno	100,8
Positivo tramo central	100,8
Momentos de Referência Negativos (kN.m)	
Negativo pilar externo	145

Negativo Pilar interno	229,7
Negativo Pilar Central	201,6

(Fonte: Autor)

Os momentos de referência obtidos anteriormente, serão distribuídos em faixas na laje com uma porcentagem de acordo com cada faixa exige, citado no item 3.1.1, nos quais as faixas serão divididas em externas e internas, como mostra as Tabela 14, Tabela 15 e a Figura 34.

Tabela 14 - Momentos Positivo Laje Lisa distribuídos nas faixas

Faixas	Momento Positivos (kN.m)		
	Tramo externo	Tramo interno	Tramo central
Faixa Externa	32,78	27,72	28
Faixa Interna	53,64	45,36	45

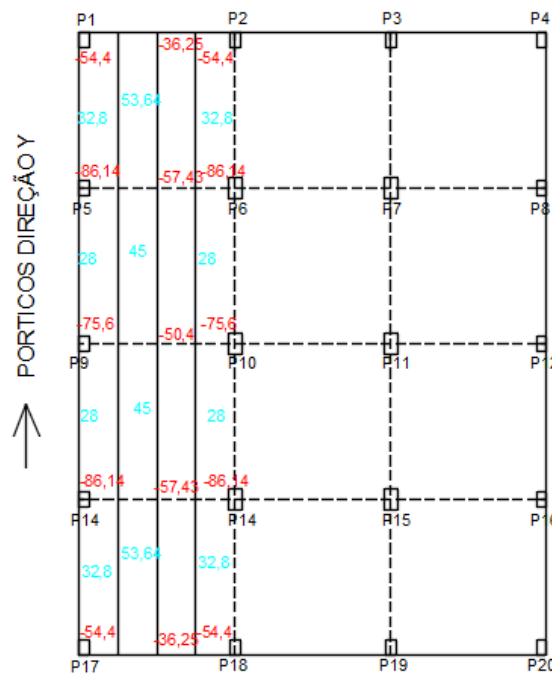
(Fonte: Autor)

Tabela 15 - Momentos Negativos Laje Lisa distribuídos nas faixas

Faixas	Momento Negativos (kN.m)		
	Pilar externo	Pilar interno	Pilar central
Faixa Externa	54,4	86,14	75,6
Faixa Interna	36,25	57,43	50,40

(Fonte: Autor)

Figura 34 - Distribuições final dos momentos nas faixas na laje Lisa



(Fonte: Autor)

4.2.1 Dimensionamento das Armaduras

Para o cálculo de armaduras de flexão das Lajes Lisas será usado o método citado no item 3.4 para cálculo de armaduras, onde serão considerados as piores hipóteses. No estudo de caso para o momento positivo, foi utilizado o momento de 53,64 kN.m e o momento negativo foi -86,14 kN.m, esses valores são todos característicos, que serão majorados posteriormente.

4.2.1.1 Cálculo da Armadura Positiva (Armadura Inferior do Painel)

A armadura positiva utilizada nos painéis serão a mesma nos dois sentidos, onde será utilizado um $f_{ck} = 30$ MPa, o Aço CA-50, e um cobrimento da armadura de 2 cm.

$$M_k = 53,64 \text{ kN.m}$$

$$M_{dmax} = 75,09 \text{ kN.m/m}$$

$$e = 0,23 \text{ m}, \quad c = 0,02 \text{ m}$$

$$d = e - c = 0,21 \text{ m}$$

$$f_{yd} = \frac{50 \text{ kN/cm}^2}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{cd} = \frac{30\,000 \text{ kN/m}^2}{1,4} = 21428,57 \text{ kN/m}^2$$

$$K_{md} = \frac{M_d}{1 \text{ (m)} \times d^2 \times f_{cd}} = \frac{75,09}{1 \times 0,21 \times 21428,57} = 0,087$$

Com o k_{md} , usando tabela de dimensionamento de seção retangular de acordo com a NBR 6118. Obtém-se o $k_z = 0,9458$

$$A_s = \frac{M_d}{k_z \times d \times f_{yd}} = \frac{75,09}{0,9458 \times 0,21 \times 43,48} = 8,30 \text{ cm}^2/\text{m}$$

4.2.1.2 Cálculo da Armadura Negativa (Armadura Superior Sobre os Pilares)

A armadura negativa sobre as regiões dos pilares, também será a mesma nas duas direções, onde será utilizado um $f_{ck} = 30$ MPa, o Aço CA-50, e um cobrimento da armadura de 2 cm.

$$M_k = -86,14 \text{ kN.m}$$

$$M_{dmax} = 120,59 \text{ kN.m}$$

$$e = 0,23 \text{ m}, \quad c = 0,02 \text{ m}$$

$$d = e - c = 0,21 \text{ m}$$

$$f_{yd} = \frac{50 \text{ kN/cm}^2}{1,15} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{cd} = \frac{30\,000 \text{ kN/m}^2}{1,4} = 21428,57 \text{ kN/m}^2$$

$$K_{md} = \frac{M_d}{1(m) \times d^2 \times f_{cd}} = \frac{120,59}{1 \times 0,21 \times 21428,57} = 0,128$$

Com o k_{md} , usando tabela de dimensionamento de seção retangular de acordo com a NBR 6118. Obtém-se o $k_z = 0,9194$

$$A_s = \frac{M_d}{K_z \times d \times f_{yd}} = \frac{120,59}{0,9194 \times 0,20 \times 43,48} = 14,37 \text{ cm}^2/\text{m}$$

4.2.1.3 Verificação ao Puncionamento

A verificação de puncionamento na laje Lisa, foi escolhida os mesmos pilares da Bubbledeck, um pilar interno (P10), um pilar de borda (P5) e um pilar de canto (P1) como mostra a Tabela 16.

Tabela 16 - Características dos Pilares da Laje Lisa

PILARES	Dimensões	Pórtico X		Pórtico y		R médio
		Mx (kNm)	Vx (kNm)	My (kNm)	Vy (kNm)	N (KN)
PILAR INTERNO	P10 50 x 80	0	210,4	0	202,5	206,45
PILAR BORDA	P5 40 x 60	36,3	94,6	5,7	210,9	152,75
PILAR CANTO	P1 40 x 60	36,3	94,6	36,2	94,6	94,6

(Fonte: Autor)

Assim, segundo as equações 3 a 11, mencionada na revisão bibliográfica pode-se fazer as verificações de puncionamento, obtendo seguintes resultados como mostra a Tabela 17.

Tabela 17 - Verificações de puncionamento na Laje Lisa

PILARES	Dimensões	Fsd (kN)	C: Tsd (Mpa)	C': Tsd' (Mpa)	Trd2 (Mpa)	Trd1 (Mpa)	Trd2 > Tsd	Trd1 > Tsd'
PILAR INTERNO	P10 50 x 80	289,03	0,56	0,28	5,09	0,73	ok	ok
PILAR BORDA	P5 40 x 60	213,85	1,34	0,49	5,09	0,73	ok	ok

PILAR CANTO	P1	40 x 60	132,44	1,79	0,59	5,09	0,73	ok	ok
-------------	----	---------	--------	------	------	------	------	----	----

(Fonte: Autor)

Como mostra a Tabela 17, para lajes lisas, também não foi necessário uso de armaduras contra ao puncionamento.

5 DISCUSSÕES

Os parâmetros a serem comparados entre a estrutura utilizando laje com vazios (Bubbledeck) e a estrutura de Laje Lisa Maciça serão: Taxas de armaduras, volume de concreto e momentos característicos máximos.

5.1 Taxas de Armadura

A seguir serão apresentados os cálculos para obtenção de taxas de armaduras para laje tipo Bubbledeck e lajes Lisas.

Para laje do tipo Bubbledeck, foram obtidas as seguintes taxas:

- Armadura de flexão inferior

$$\rho = \frac{A_s}{h \times 100} \times 100 = \frac{7,23}{23 \times 100} \times 100 = 31 \%$$

- Armadura de flexão superior

$$\rho = \frac{A_s}{h \times 100} \times 100 = \frac{12,64}{23 \times 100} \times 100 = 55 \%$$

- Armadura de punção

$$\rho = 0 \%$$

Para laje do tipo Lisa, foram obtidas as seguintes taxas:

- Armadura de flexão inferior

$$\rho = \frac{A_s}{h \times 100} \times 100 = \frac{8,30}{23 \times 100} \times 100 = 36 \%$$

- Armadura de flexão superior

$$\rho = \frac{A_s}{h \times 100} \times 100 = \frac{14,37}{23 \times 100} \times 100 = 62,5 \%$$

- Armadura de punção

$$\rho = 0 \%$$

A partir dos resultados acima, podemos observar, que as taxas maiores foram nas lajes Lisas, mostrando assim uma das vantagens da laje Bubbledeck em relação a laje Lisa.

5.2 Volume de Concreto

O volume de concreto para as lajes Lisas e lajes Bubbledeck, já foram calculados anteriormente, assim podemos ver na Tabela 6 mencionada na seção 4.1.1, a comparação destes parâmetros, em que a laje Bubbledeck teve um volume de concreto de 68,58 m³ e a laje Lisa obteve um volume de 99,36 m³, com isso percebe-se que a laje Bubbledeck teve uma redução significativa de concreto comparada com a laje Lisa, cerca de 31 %. Podemos ver também na Tabela 6, a altura equivalente, que a laje Bubbledeck teria se ela fosse totalmente maciça, ou seja, se não tivesse os vazios incorporado na laje, no qual essa altura corresponderia a uma laje de aproximadamente 16 cm de altura, bem menor que a atual, de 23 cm.

5.3 Momentos Fletores

Por último, podemos analisar os momentos fletores positivos e negativos máximos atuantes nos dois tipos de estrutura e ter uma ideia de valor da diferença entre eles, como mostra a Tabela 18, e Como era de se esperar, por conta de seu volume ser maior, os momentos máximos na laje Lisa são superiores que os da laje Bubbledek, chegando a cerca de 16% a mais.

Tabela 18 - Momentos Característicos Máximos atuantes em Lajes Bubbledeck e Lisa

	Momentos Positivos (kN.m)	Momentos Negativo (kN.m)
Laje Bubbledeck	45,20	72,56
Laje Lisa	53,64	86,14
Redução %	15,74	15,77

(Fonte: Autor)

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O estudo bibliográfico apresentou um sistema recente e não muito difundido no mercado brasileiro, que foi o sistema de lajes com vazios, em específico o sistema de Lajes Bubbledeck, mostrando suas vantagens, o sistema construtivo e os métodos de cálculo para dimensionamento. O sistema Bubbledeck promete ser uma solução atraente e viável no cenário atual, por trazer vários benefícios ao mercado, como um ganho em economia de materiais, mão de obra e velocidade de construção.

O presente trabalho compara as lajes Bubbledeck e lajes Lisas com mesma espessura. O assunto foi exposto na tentativa de se abranger de maneira generalizada o projeto em lajes Bubbledeck, sua viabilidade econômica e aspectos construtivos.

A laje Bubbledeck do projeto analisado se mostrou como a mais vantajosa e econômica levando em conta os parâmetros de comparação, que foi a taxa de armadura, volume de concreto, e momentos característicos máximos, comprovando as expectativas do autor. Em relação ao aspecto econômico de um empreendimento, existe outra vantagem nas lajes Bubbledeck, que seria o alívio de carga nas fundações, gerando assim mais economia no custo final da obra.

Portanto, apesar de o sistema construtivo de lajes Bubbledeck não ser tão utilizado ainda no mercado brasileiro atual, essa tipologia apresenta-se como uma técnica construtiva vantajosa em relação aos sistemas construtivos atuais. E como recomendação para trabalhos futuros sugere-se a utilização de um programa de elementos finitos para o cálculo dos esforços solicitantes, a comparação de laje Bubbledeck com uma laje Lisa de espessura equivalente ao volume de concreto que seria de 16 cm e espessura equivalentes a rigidez da laje Bubbledeck, que corresponderia a 22 cm, utilização de outros parâmetros de comparação como a flecha máxima e a inclusão da verificação do colapso progressivo.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. M. DE. **Curso de Concreto Armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2010. v. 4
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120 Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**, 2014.
- BUBBLEDECK. **Tipos de Laje Bubbledeck**, 2014.
- BUBBLEDECK BRASIL. **Apresentação Bubbledeck**. Brasília: Bubbledeck Brasil, 2017.
- BUBBLEDECK INTERNACIONAL. **The Technical University of Denmark**, 2008.
- CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2009. v. 2
- GUARDA, M. C. DA; LIMA, J. S.; PINHEIRO, L. M. Novas diretrizes para a análise da Punção no projeto de Lajes Lisas. [s.d.].
- GUEDES, N.; ANDRADE, R. **Avaliação de desempenho de estruturas utilizando lajes do tipo bubbledeck®**. Brasília, 2015.
- MORAES, R. R. DE. **Puncionamento: verificação da espessura das lajes sem vigas para a dispensa da armadura de cisalhamento em função da geometria das estruturas estudadas**. Porto Alegre, 2013.
- SILVA, Y. **Estudo comparativo entre lajes “bubbledeck” e lajes lisas**. Rio de Janeiro, 2011.