



**INSTITUTO FEDERAL  
SANTA CATARINA**

**CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ENGENHARIA CIVIL**

**HELLEN WESTPHAL SCHWAMBACH**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE  
LAJES MACIÇAS, LAJES  
NERVURADAS E LAJES  
BUBBLEDECK**

**Florianópolis - SC  
2019**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

**HELLEN WESTPHAL SCHWAMBACH**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE LAJE MACIÇA, LAJE NERVURADA E LAJE  
BUBBLEDECK**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil.

Professor Orientador: Fernando Toppan Rabello, Doutor.

**FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2019.**

Schwambach , Hellen

Estudo comparativo entre lajes maciças, lajes nervuradas e lajes BubbleDeck /Hellen Schwambach;orientação de Fernando Rabello. - Florianópolis, SC, 2019.

65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico de Construção Civil.

Inclui Referências.

1. BubbleDeck. 2. Lajes. 3. Dimensionamento. I. Rabello, Fernando. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Construção Civil. III. Título.

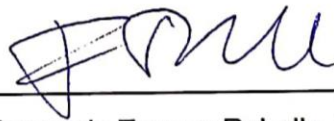
**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE LAJE MACIÇA, LAJE NERVURADA E LAJE  
BUBBLEDECK**

**HELLEN WESTPHAL SCHWAMBACH**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheira Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Superior de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 03 de julho, 2019.

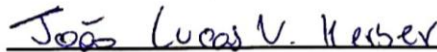
Banca Examinadora:



Fernando Toppan Rabello, Doutor



André Puel, Doutor



João Lucas Vasconcelos Kerber, Engenheiro Civil

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer, primeiramente, ao grande criador do universo, que me capacitou para chegar até aqui, colocando as pessoas certas no meu caminho e proporcionando oportunidades de aprendizado sem igual.

Agradeço também aos meus queridos pais, que sempre foram meus exemplos de perseverança, me patrocinando, incentivando e guiando em suas orações durante toda minha vida.

Meu muito obrigada ao meu marido Tiago que me alegrou nos momentos difíceis dessa etapa, sendo compreensivo, paciente, amoroso e cozinheiro dos melhores almoços.

Não poderia deixar de agradecer aos mestres do IFSC, que me inspiraram e tanto me ensinaram durante toda essa jornada. Em especial ao professor Fernando, que vem me orientando nessa trajetória.

Aos meus colegas de faculdade: agradeço as parcerias, risadas e companheirismo nos bons e não tão bons momentos.

Ao meu chefe e membro da banca João Lucas, que me ajudou na escolha do tema desse trabalho e sempre esteve à disposição quando precisei.

E à todas as pessoas que de alguma maneira me apoiaram e me carregaram em suas orações, meu muito obrigada!

## **RESUMO**

O sistema BubbleDeck é uma tecnologia que une sustentabilidade, economia de materiais e características estruturais iguais ou superiores às de lajes maciças convencionais. O que permite tais atributos são esferas ocas de plástico reciclado incorporadas no seu interior, que ocupam a região onde o concreto não desempenha função estrutural. Essas esferas reduzem o volume de concreto na laje, que se torna mais leve, permitindo vãos maiores. Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento das lajes BubbleDeck em comparação com lajes que são amplamente utilizadas, que nesse caso são as lajes maciças e nervuradas. Para tanto, foi feita a análise do comportamento das lajes em questão, a partir do dimensionamento de um pavimento tipo. Também foi realizado um estudo paramétrico, relacionando a taxa de armadura e o vão dos diferentes sistemas. Foi utilizado o software Eberick para gerar as grelhas com os momentos positivos e negativos das lajes, onde foram aplicados fatores de correção – fornecidos pelo fabricante – para possibilitar o dimensionamento das lajes BubbleDeck a partir de uma laje maciça. A laje BubbleDeck teve melhor desempenho no dimensionamento do pavimento tipo, com menor consumo de aço e peso total. No estudo de sensibilidade, a laje BubbleDeck apresentou os melhores resultados de deslocamento até o vão de 10 metros.

**Palavras-chave:** BubbleDeck, lajes, dimensionamento.

## ABSTRACT

The BubbleDeck system is a technology that combines sustainability, materials savings and structural features equal to or greater than conventional solid slabs. What allows such attributes are hollow spheres of recycled plastic embedded within it, which occupy the region where concrete does not perform structural function. These spheres reduce the volume of concrete in the slab, which becomes lighter, allowing larger spans. This work aims at analyzing the behavior of BubbleDeck slabs in comparison to slabs that are widely used, which in this case are the massive and ribbed slabs. For that, the behavior of the slabs in question was analyzed, from the design of a type pavement. A parametric study was also performed, relating the armature rate and span of the different systems. Eberick software was used to generate the grids with the positive and negative moments of the slabs, where correction factors were applied - provided by the manufacturer - to enable the design of BubbleDeck slabs from a massive slab. The BubbleDeck slab had better performance in the design of the pavement type, with lower consumption of steel and total weight. In the sensitivity study, the BubbleDeck slab presented the best displacement results up to a span of 10 meters.

**Key-words:** BubbleDeck, slabs, structural dimensioning.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Geometria Básica da BubbleDeck.....	15
Figura 2 – Módulos BubbleDeck .....	16
Figura 3 – Posicionamento da pré-laje.....	17
Figura 4 – Painel Acabado. ....	18
Figura 5 – Formas plásticas antes da concretagem.....	22
Figura 6 – Formas ATEX 600.....	22
Figura 7 – Formas ATEX 600U .....	23
Figura 8 – Disposição e dimensão das lajes .....	27
Figura 9 – Seção de uma laje maciça com armadura dupla .....	33
Figura 10 – Momentos positivos nas lajes maciças .....	43
Figura 11 – Momentos negativos nas lajes maciças .....	43
Figura 12 – Momentos positivos nas lajes nervuradas.....	45
Figura 13 – Momentos negativos nas lajes nervuradas .....	45
Figura 14 – Disposição das armaduras na laje BubbleDeck .....	46
Figura 15 - Trecho da tabela de verificação de flechas.....	49
Figura 16 – Lançamento das lajes isoladas .....	52
Figura 17 – Momentos negativos lajes isoladas.....	54



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de redução para BubbleDeck em relação à laje maciça .....	19
Tabela 2 – Espessuras das lajes e suas características .....	20
Tabela 3 – Combinações das ações .....	29
Tabela 4 – Classes de agressividade ambiental .....	29
Tabela 5 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobertura nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$ .....	30
Tabela 6 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto .....	30
Tabela 7 – Características do concreto .....	31
Tabela 8 – Características dos aços .....	32
Tabela 9 – Valores de $\xi$ em função do tempo .....	37
Tabela 10 – Armaduras laje maciça .....	42
Tabela 11 – Armaduras laje nervurada .....	44
Tabela 12 – Armaduras laje BubbleDeck .....	46
Tabela 13 – Flechas pavimento tipo .....	49
Tabela 14 – Cisalhamento laje maciça .....	50
Tabela 15 – Cisalhamento laje nervurada .....	51
Tabela 16 – Cisalhamento laje BubbleDeck .....	51
Tabela 17 – Armaduras lajes maciças isoladas .....	53
Tabela 18 – Armaduras lajes nervuradas isoladas .....	54
Tabela 19 – Armaduras lajes BubbleDeck isoladas .....	55
Tabela 20 – Flechas das lajes isoladas .....	56
Tabela 21 – Flechas das lajes BubbleDeck com 28 cm de altura .....	57
Tabela 22 – Cisalhamento lajes maciças isoladas .....	58
Tabela 23 – Cisalhamento lajes nervuradas isoladas .....	58
Tabela 24 – Cisalhamento lajes BubbleDeck isoladas .....	59

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Problema da pesquisa</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>13</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>13</b>
1.3.1	Objetivos específicos .....	13
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Laje BubbleDeck</b> .....	<b>15</b>
2.1.1	Métodos construtivos .....	16
2.1.1.1	<i>Módulos</i> .....	16
2.1.1.2	<i>Pré-lajes</i> .....	17
2.1.1.3	<i>Painéis Acabados</i> .....	17
2.1.2	Sequência de execução .....	18
2.1.3	Considerações para o dimensionamento .....	19
<b>2.2</b>	<b>Lajes maciças</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Pré dimensionamento</b> .....	<b>20</b>
<b>2.3</b>	<b>Lajes nervuradas</b> .....	<b>20</b>
2.3.2	Pré dimensionamento .....	21
2.3.3	Métodos construtivos .....	21
2.3.3.1	<i>Concretagem com formas plásticas</i> .....	21
2.3.3.2	<i>Concretagem com formas convencionais</i> .....	23
<b>2.4</b>	<b>Métodos de análise de estruturas de laje</b> .....	<b>23</b>
2.4.2	Analogia de grelhas .....	24
2.4.3	Método dos elementos finitos.....	24
<b>2.5</b>	<b>Considerações da revisão bibliográfica</b> .....	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Dimensionamento de um pavimento tipo</b> .....	<b>26</b>
3.1.1	Software Eberick .....	26
3.1.2	Características da construção.....	27
3.1.2.1	<i>Disposição das lajes</i> .....	27
3.1.2.2	<i>Altura das lajes</i> .....	28
3.1.2.3	<i>Carregamentos considerados</i> .....	28
3.1.2.4	<i>Cobrimento</i> .....	29
3.1.2.5	<i>Fck concreto</i> .....	30
3.1.2.6	<i>Aço</i> .....	32
3.1.3	Dimensionamento das armaduras .....	32
3.1.3.1	<i>Seção retangular – Laje maciça</i> .....	33
3.1.3.2	<i>Seção T – Laje nervurada</i> .....	34
3.1.3.3	<i>Laje BubbleDeck</i> .....	35
3.1.4	Verificações da seção .....	35
3.1.4.1	<i>Flecha</i> .....	35
3.1.4.2	<i>Cisalhamento</i> .....	38
<b>3.2</b>	<b>Estudo paramétrico</b> .....	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>Dimensionamento do pavimento tipo</b> .....	<b>41</b>

4.1.1	Armaduras das lajes .....	41
4.1.2	Verificações.....	48
<b>4.2</b>	<b>Estudo paramétrico .....</b>	<b>52</b>
4.2.1	Armaduras das lajes .....	53
4.2.2	Verificações.....	56
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>64</b>
	<b>ANEXO A – VALORES DE <math>\alpha</math> .....</b>	<b>65</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das principais fontes de poluição da natureza, com altas emissões de CO<sub>2</sub> para a produção do cimento e alta geração de resíduos. Diante disso, tem-se pensado em soluções que permitam a utilização de materiais reciclados e a diminuição do consumo de cimento, sem que haja a redução da qualidade e durabilidade das estruturas. Tendo em mente essa situação, o mercado precisa dispor de técnicas que tenham qualidade em conjunto com o comprometimento ambiental e buscar soluções para esses problemas.

Introduzir o tema de sustentabilidade na construção civil é um desafio ainda nos dias de hoje, uma vez que as principais evoluções tecnológicas no mercado são motivadas pela procura de um sistema construtivo mais econômico e mais rápido. Contudo, o tema vem ganhando espaço, e a busca por novas soluções construtivas procuram aliar questões econômicas e sustentáveis.

No que tange as lajes, existem diversas soluções no mercado atual. Sistemas como Steel Deck, lajes alveolares e lajes nervuradas, são tecnologias que procuram diminuir o consumo de concreto e aumentar a agilidade na execução. Além disso, essas soluções acabam se tornando mais sustentáveis, visto que a produção de cimento possui elevada emissão de CO<sub>2</sub>.

Nos anos 80, na Dinamarca, foi apresentado um novo sistema construtivo para as lajes, que utiliza esferas plásticas ocas e inertes em sua seção para reduzir o consumo de concreto, sem que haja perda de resistência mecânica. O sistema BubbleDeck permite que o consumo de cimento seja reduzido, a execução da obra seja mais rápida e ainda utiliza esferas de plástico recicláveis, possuindo um apelo sustentável significativo.

Porém, no Brasil, são poucos os estudos e projetos realizados que contemplem as lajes BubbleDeck. Não existe, atualmente, nenhuma norma específica ou software brasileiro que dimensione esse tipo de laje. Para fazê-lo, são utilizados alguns parâmetros de correção, como redução do peso próprio, fornecidos pelo fabricante.

Dessa forma, esse trabalho objetiva comparar as principais características das lajes BubbleDeck com outras lajes mais usuais, como as maciças e nervuradas.

Para isso, foram feitos dimensionamentos dimensionamento e verificação em Estado Limite Último e em Estado Limite de Serviço nessas três lajes, para verificar o comportamento de cada uma individualmente, e em comparação com as outras.

A importância da comparação de novos sistemas com os mais utilizados está na busca de dados consistentes que possam fornecer parâmetros para optar entre um dos sistemas estruturais a ser empregado numa determinada obra.

### **1.1 Problema da pesquisa**

O sistema BubbleDeck ainda é pouco difundido em território brasileiro. Pouco se sabe sobre o desempenho desta tecnologia em comparação com outras já consolidadas no Brasil. Tendo isso em mente, surge o problema desta pesquisa: qual o comportamento deste tipo de laje em comparação com lajes nervuradas e lajes maciças?

### **1.2 Justificativa**

As lajes BubbleDeck tem como objetivo agilizar a execução de uma obra e reduzir os custos de material e mão de obra. Ainda assim, este novo modelo é pouco conhecido e estudado no Brasil. Por este motivo, existe a necessidade de analisar as vantagens e desvantagens de um novo método e compará-lo com outros já utilizados.

### **1.3 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral comparar o desempenho estrutural de lajes maciças, lajes nervuradas e lajes BubbleDeck.

#### **1.3.1 Objetivos específicos**

A partir da análise do objetivo geral, surgiram os seguintes objetivos específicos:

- a) Dimensionar um pavimento tipo de um edifício comercial com os três tipos de laje;

- b) Comparar o desempenho estrutural a partir de quantitativos de aço e deslocamentos;
- c) Realizar um estudo paramétrico a partir do aumento contínuo dos vãos;
- d) Verificar as limitações em E.L.U e E.L.S de cada tipo de laje, em função da correlação entre a altura da laje e do vão livre.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está dividido em 5 grandes capítulos: Introdução, Revisão de Literatura, Metodologia, Análise de resultados e Conclusão.

Na Introdução, são apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho, bem como a justificativa e a problemática.

Na revisão de literatura, são descritos os embasamentos teóricos que serviram de referência para a elaboração do trabalho, e traz informações importantes sobre cada tipo de laje para o decorrer do estudo.

No terceiro capítulo, são apresentadas as metodologias adotadas para atingir os objetivos específicos.

No quarto capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos dos dimensionamentos dos três tipos de laje.

No quinto e último capítulo é feita a conclusão do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, serão abordadas bibliografias e embasamentos teóricos que foram importantes para a execução deste trabalho.

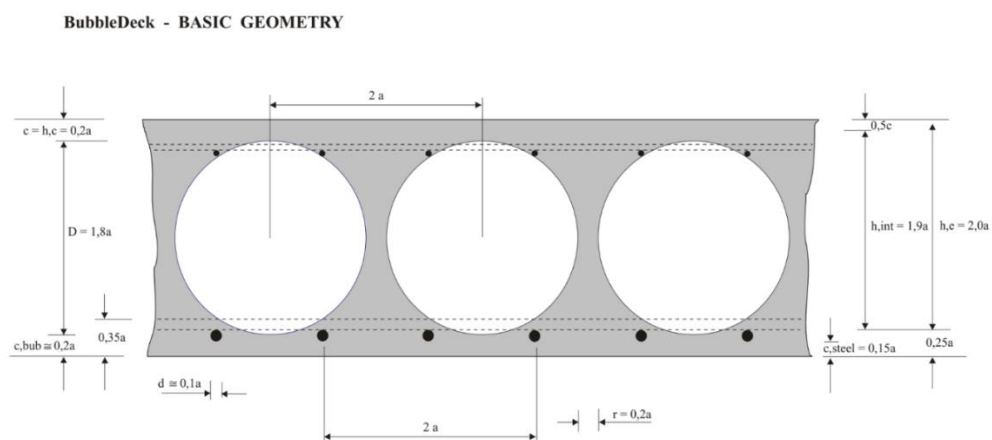
### 2.1 Laje BubbleDeck

O sistema BubbleDeck é um modelo de laje com origem dinamarquesa, pouco conhecido no Brasil. Consiste em esferas ocas de plástico reciclado fixadas nas armaduras da laje, envoltas em concreto. Esse sistema permite menor consumo de concreto, resultando em uma laje mais leve e, por consequência, que permite a execução de vãos maiores.

As lajes BubbleDeck apresentam “Selo Verde” com prêmios internacionais, não só por reduzir as quantidades de materiais empregados em uma mesma área, consequentemente reduzindo a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, mas também por utilizar plástico reciclável em substituição ao concreto.

Ainda não existem normas brasileiras específicas para a BubbleDeck, mas, de acordo com o fabricante, ela pode ser dimensionada como uma laje maciça, aplicando-se fatores de redução de rigidez, cortante e peso próprio. Esses fatores serão apresentados posteriormente, e foram obtidos a partir de ensaios e estudos realizados em universidades dinamarquesas e alemãs.

**Figura 1 – Geometria Básica da BubbleDeck**



Fonte: BubbleDeck International (2014)

### 2.1.1 Métodos construtivos

A estrutura em uma construção com BubbleDeck normalmente é composta apenas de pilares e da própria laje. Portanto, esse sistema pode ou não conter vigas para suportar as cargas da construção.

Existem três alternativas para a construção de lajes BubbleDeck, que serão apresentadas nos itens a seguir.

#### 2.1.1.1 Módulos

Os módulos são formados pelas esferas ocas, treliças de içamento e armaduras superiores e inferiores. Nesse método é necessário o uso de formas inferiores para posicionar a armadura e executar a concretagem. São ideais para obras onde o acesso e movimentação de elementos grandes é limitado, permitindo o posicionamento manual das peças.

A concretagem é feita em duas etapas, em que a primeira consiste em uma capa de concreto de 6 centímetros que evita o deslocamento das esferas e da armadura, e a segunda parte é a concretagem do restante da laje.

**Figura 2 – Módulos BubbleDeck**



Fonte: BubbleDeck Brasil (2017).



### 2.1.1.2 Pré-lajes

Nesse método é dispensado o uso de formas inferiores, pois é formado por uma pré-laje de 6 centímetros que recebe o módulo com as armaduras e esferas plásticas. É ideal para obras que necessitam de redução de tempo de construção e de mão de obra. No entanto, é necessária a utilização de guindaste para posicionamento dos elementos, e de posterior concretagem do restante da laje.

**Figura 3 – Posicionamento da pré-laje.**

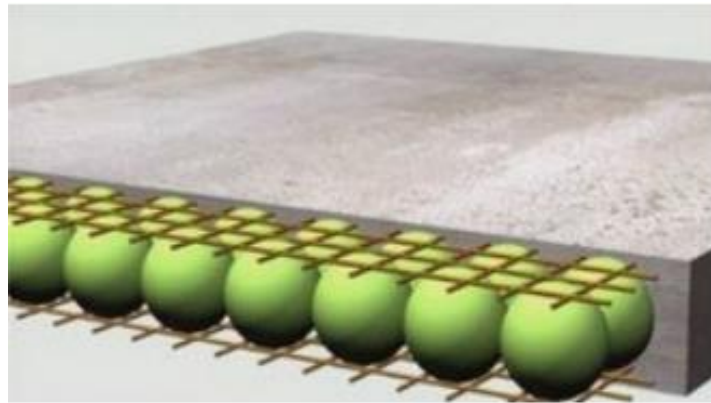


Fonte: BubbleDeck Brasil (2017)

### 2.1.1.3 Painéis Acabados

Nesse procedimento, as lajes pré-fabricadas precisam apenas de içamento e posicionamento na estrutura. Para que haja conexão entre um módulo e outro, são colocadas armaduras de ligação. Este sistema necessita de vigas ou outro suporte inferior.

**Figura 4 – Painel Acabado.**



Fonte: BubbleDeck Brasil (2014)

### 2.1.2 Sequência de execução

Segundo SILVA, (2011), a sequência de execução para qualquer um dos métodos construtivos é a seguinte:

- a) Escoramento provisório - posicionamento de vigas paralelas espaçadas de 1,8 m a 2,5 m;
- b) Posicionamento dos painéis - elementos colocados por meio de equipamentos mecânicos;
- c) Reforços nas juntas - armadura de ligação entre as peças pré-moldadas e armadura de ligação entre as malhas superiores;
- d) Capitéis - armadura adicional superior na região dos pilares devido à punção;
- e) Reforço de punção - colocação de armadura no perímetro da laje, caso necessário;
- f) Preparação - selagem de juntas, limpeza e saturação com água do módulo pré-moldado;
- g) Concretagem - lançamento e adensamento do concreto de segundo estágio, e posterior remoção do escoramento;
- h) Acabamentos - passo opcional, o concreto pode ficar aparente.

### 2.1.3 Considerações para o dimensionamento

Para o dimensionamento de lajes BubbleDeck, são utilizadas as especificações para lajes maciças da ABNT NBR 6118/2014, pois a forma das esferas possibilita a transferência das forças de forma homogênea dentro da laje (BUBBLEDECK, 2015).

Não existe, no momento, nenhum software brasileiro que dimensione especificamente lajes BubbleDeck. No entanto, a recomendação do fabricante é que seja utilizado um software comum com alguns fatores de redução. Estes fatores são apresentados na Tabela 1:

**Tabela 1 – Fatores de redução para BubbleDeck em relação à laje maciça**

Parâmetro	Peso próprio	Rigidez à flexão	Resistência ao cortante
Fator de redução	0,65	0,9	0,6

Fonte: Adaptado de BubbleDeck Brasil (2015)

Existem diferentes tamanhos de esferas que irão resultar em diferentes espessuras de lajes. O primeiro critério a ser levado em consideração para determinar a espessura da laje é o vão máximo que ela atingirá. Esse vão máximo é determinado pela razão entre o menor comprimento (L) do vão e a espessura (d) da laje. De acordo com o fabricante, essa razão é diferente para vãos em simples, contínuos ou em balanço:

$$\text{Vão simples: } \frac{L}{d} \leq 30$$

$$\text{Vãos contínuos: } \frac{L}{d} \leq 39$$

$$\text{Balanço: } \frac{L}{d} \leq 10,5$$

A Tabela 2 mostra as espessuras de laje possíveis associadas ao vão, à carga e ao consumo de concreto por m<sup>2</sup>:

Tabela 2 – Espessuras das lajes e suas características

Tipo	Espessura da Laje (cobrimento ajustável) (mm)	Diâmetro das Esferas (mm)	Vãos (Internos - com continuidade entre vãos) (m)	Vãos (Externos - sem continuidade entre vãos) (m)	Comprimento máximo em Balanço (m)	Massa da laje totalmente concretada (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de Concreto (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )
BD230	230 (225-280)	Ø 180	6 – 10	5 – 6	≤ 2.5	370	0.15
BD285	285 (280-330)	Ø 225	7 – 11	6 – 8	≤ 3.0	460	0.19
BD340	340 (330-385)	Ø 270	9 – 13	7 – 10	≤ 3.5	550	0.23
BD395	395 (385-435)	Ø 315	10 – 15	8 – 11	≤ 4.0	640	0.25
BD450	450 (435-500)	Ø 360	11 – 17	9 – 12	≤ 4.5	730	0.31

Fonte: BubbleDeck Brasil (2014)

## 2.2 Lajes maciças

São lajes armadas em uma ou duas direções, constituídas por placas de concreto armado, de espessura uniforme, apoiadas sobre vigas e concretadas sobre forma de madeira ou metálica, que é retirada após a cura do concreto.

### 2.2.2 Pré dimensionamento

A NBR 6118 recomenda uma relação de vão/30 a vão/35. Essa sugestão evita que a laje sofra grandes deformações e que vibre em excesso.

## 2.3 Lajes nervuradas

As lajes nervuradas são constituídas por nervuras na zona de tração e mesa maciça de concreto na zona de compressão, o que configura uma seção chamada de seção “T”. As nervuras, espaçadas entre si, podem ficar aparentes ou podem ser preenchidas por algum material leve, como EPS, o que permite que o peso próprio da laje nervurada em relação à uma laje maciça seja reduzido em 30%. Este tipo de laje é utilizado para vencer grandes vãos ou em casos de carregamentos especiais.

### 2.3.2 Pré dimensionamento

O pré-dimensionamento destas estruturas pode ser feito através da relação  $h = l/30$ , sendo  $h$  = altura da laje nervurada e  $l$  = distância entre os apoios (pilares), em centímetros. De acordo com ARAÚJO (2014), as lajes nervuradas necessitam de alturas 50% maiores que as lajes maciças para aumentar a inércia e diminuir a deformação. O autor ainda estima que, entre as lajes nervuradas, as que apresentam melhor custo-benefício são aquelas com vãos acima de 8 metros.

### 2.3.3 Métodos construtivos

A construção de lajes nervuradas pode ser realizada a partir de formas plásticas, que dispensam o assoalhamento, ou com o posicionamento do material de enchimento sobre formas convencionais e posterior concretagem.

Quanto aos apoios, as lajes nervuradas podem ser apoiadas em vigas, apoiadas em vigas faixas (com a largura maior que a altura), apoiadas diretamente nos pilares (necessidade de regiões maciças ao redor dos pilares), ou ainda apoiadas em estrutura metálica.

#### 2.3.3.1 Concretagem com formas plásticas

A concretagem de lajes nervuradas com formas plásticas se dá de maneira simples, pois são dispensadas as formas de madeira tradicionais que suportariam a estrutura durante a concretagem e cura do concreto. As formas plásticas possuem tamanhos pré estabelecidos pelo fabricante e dão agilidade ao processo da construção. Elas são apoiadas sobre o escoramento e a desforma pode ser feita manualmente.

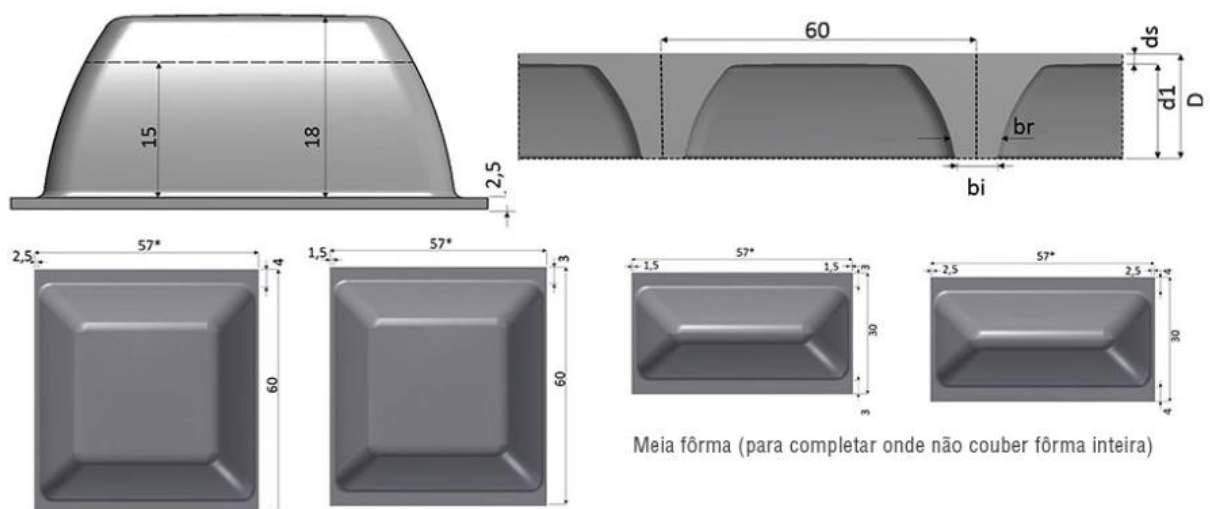
**Figura 5 – Formas plásticas antes da concretagem.**



Fonte: Atex Brasil (2018)

Para lajes com formato quadrado, com nervuras ortogonais, a distribuição dos esforços acontece de forma bidirecional. Nesse caso, predominam as fôrmas quadradas, que são indicadas para conseguir vãos maiores em edifícios mais altos. Isso oferece maior resistência aos esforços horizontais sem que haja necessidade de pilares. A Figura 6 apresenta algumas dimensões da forma ATEX 600:

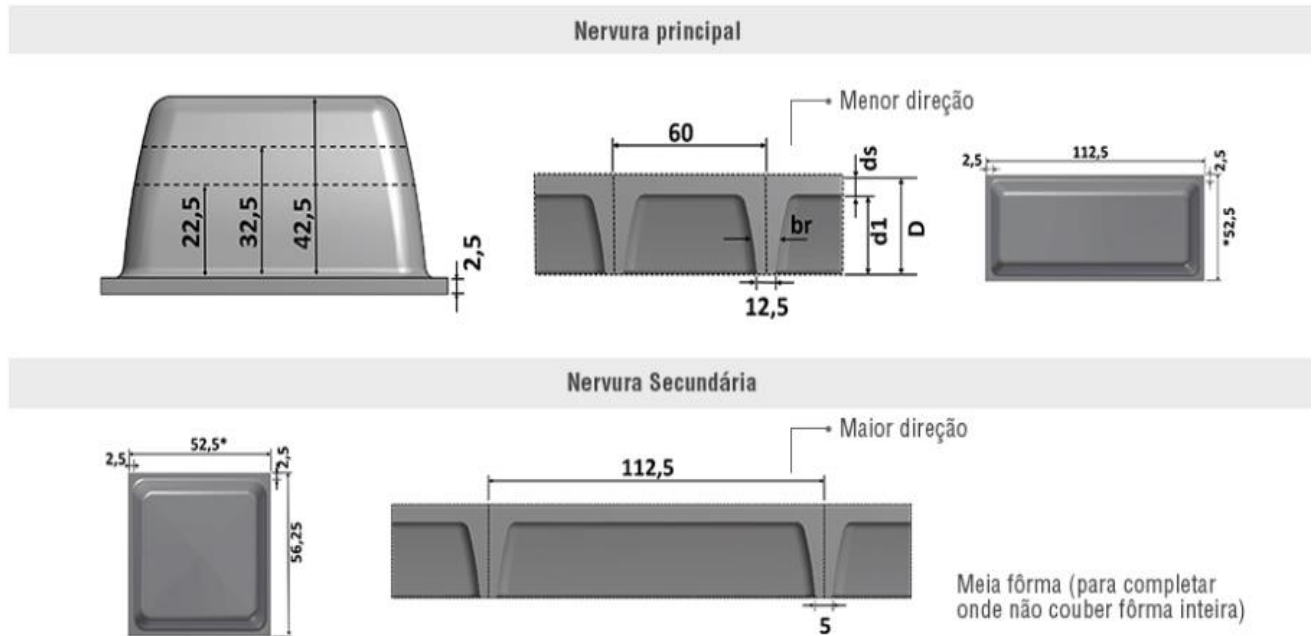
**Figura 6 – Formas ATEX 600**



Fonte: Atex Brasil (2018)

No caso de lajes armadas em uma direção, são utilizadas formas unidirecionais. Assim sendo, as nervuras ficam na direção do menor vão.

**Figura 7 – Formas ATEX 600U**



Fonte: Atex Brasil (2018)

### 2.3.3.2 Concretagem com formas convencionais

A concretagem com formas convencionais se dá de maneira muito semelhante à concretagem de uma laje maciça. A diferença é a colocação do material inerte sobre o assoalamento, que dará a forma desejada à laje nervurada. Após a distribuição desse material e das armaduras, é feita a concretagem.

## 2.4 Métodos de análise de estruturas de laje

Nos próximos itens serão apresentados alguns dos diferentes métodos de dimensionamento de lajes já desenvolvidos. Vale ressaltar que, para o presente trabalho, será utilizada apenas a analogia de grelhas.



#### 2.4.2 Analogia de grelhas

O processo de analogia de grelha é utilizado em muitos programas computacionais de análise estrutural. Ele possibilita o cálculo integrado de um pavimento, facilitando a análise deste em diferentes situações de esquema estrutural, gerando rapidez na definição do sistema estrutural mais adequado a ser utilizado.

Segundo SILVA, FILHO, & CARVALHO (2003), a analogia de grelhas permite reproduzir o comportamento de uma estrutura com praticamente qualquer geometria, seja ele composto de lajes de concreto armado maciças, com ou sem vigas, ou de lajes nervuradas.

Quanto aos carregamentos, considera-se que as cargas distribuídas se dividem entre as barras da grelha de acordo com a área de influência. As cargas concentradas podem ser consideradas uniformemente distribuídas ao longo das barras da grelha ou então concentradas diretamente nos seus nós.

#### 2.4.3 Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos é um modelo matemático baseado em métodos matriciais de rigidez e equações lineares, que analisam a estrutura de maneira detalhada. O uso de softwares se faz necessário para a resolução da grande quantidade de equações geradas no sistema.

Os elementos finitos são conectados entre si por pontos, os quais são denominados de nós. A soma destes gera a malha. Em função dessas subdivisões da geometria, as equações matemáticas que regem os comportamento físico não serão resolvidas de maneira exata, mas de forma aproximada por este método numérico. A exatidão do Método dos Elementos Finitos depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha.

Para lajes maciças, o modelo matemático pode ser estabelecido por uma placa quadrada/retangular, que será dividida em malhas de formas geométricas.

As dimensões da malha ficam a critério da necessidade de cada projeto. No entanto, quanto menor a malha, mais preciso será o resultado. Suas dimensões podem ser diferentes para determinadas áreas da laje, como por exemplo ao redor



dos pilares onde se concentram maiores tensões, as malhas podem ser mais fechadas para a obtenção de soluções mais próximas da realidade.

## **2.5 Considerações da revisão bibliográfica**

Através da revisão realizada observa-se que o sistema BubbleDeck possui características diferentes dos demais sistemas utilizados no mercado brasileiro. Contudo é possível identificar algumas semelhanças, principalmente em relação as lajes nervuradas, onde uma parte da seção de concreto é reduzida em função da solicitação atuante na mesma seção.

Além disso observa-se que a analogia de grelhas é o método mais adequado para a realização deste trabalho, em função da liberdade na modelagem dos vãos. Por fim fica evidente a necessidade da realização de estudos focados no sistema BubbleDeck.

### **3 METODOLOGIA**

A metodologia deste trabalho tem como base a norma ABNT NBR 6118:2014, que estabelece requisitos básicos para projetar estruturas em concreto armado. Os próximos itens trarão as ferramentas e procedimentos utilizados para atingir os objetivos citados anteriormente.

#### **3.1 Dimensionamento de um pavimento tipo**

Para melhor compreender o funcionamento e as diferenças de um projeto feito com lajes BubbleDeck, lajes maciças e lajes nervuradas, foi feito o dimensionamento das lajes de um pavimento tipo de um edifício comercial. Do dimensionamento, foram obtidos dados comparativos de consumo de concreto e de aço.

##### **3.1.1 Software Eberick**

Para a obtenção dos esforços solicitantes nas lajes, foi utilizado o software Eberick®, que é um sistema computacional de projetos de estruturas de edifícios em concreto armado desenvolvido pela empresa Alto QI. O programa é configurado a partir das normas da ABNT NBR 6118, mas o usuário pode modificar os dados de entrada de acordo com seu projeto específico. Portanto, todas as considerações e os resultados que o programa fornece devem ser analisados pelo projetista.

Neste trabalho, o software foi utilizado somente para gerar os modelos de grelhas para momentos positivos e negativos das lajes, bem como os esforços solicitantes de cisalhamento. Os momentos obtidos foram aplicados no cálculo das armaduras e verificações da seção, em uma planilha feita pela própria autora, baseada na NBR 6118:2014.

Como o programa não apresenta uma configuração específica para o dimensionamento de lajes BubbleDeck, foram utilizados os fatores de redução apresentados na Tabela 1.

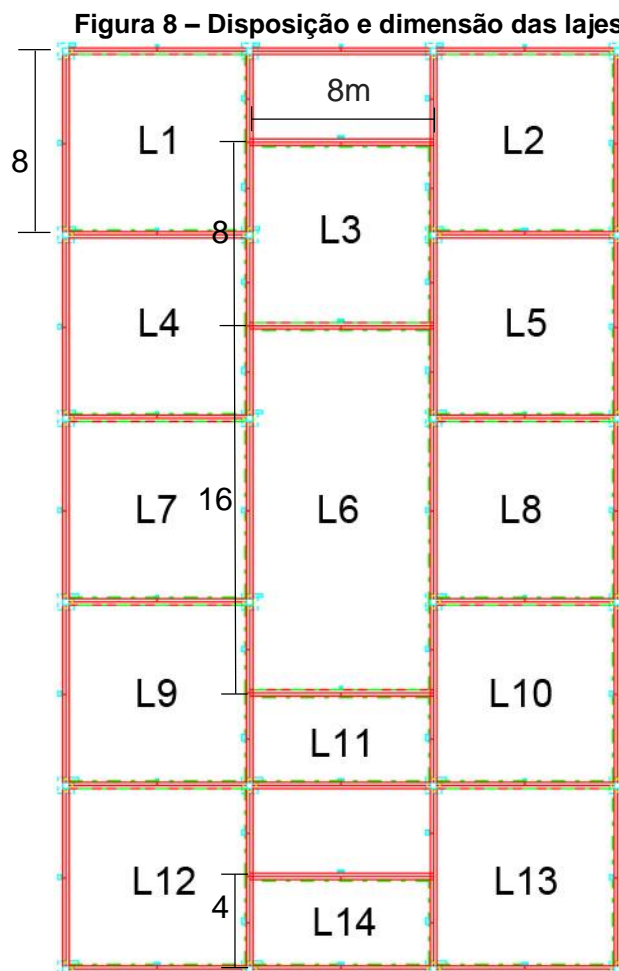
### 3.1.2 Características da construção

A seguir serão apresentadas as considerações para o lançamento e dimensionamento da estrutura.

#### 3.1.2.1 Disposição das lajes

A disposição das lajes foi pensada de maneira que configurasse um prédio comercial, permitindo diversas possibilidades de layout interno. Os pilares, posicionados em cada canto das lajes, têm seção 30x30 cm e 3 metros de altura.

As vigas foram colocadas entre cada pilar, com altura também de 3 metros. As lajes são simplesmente apoiadas nas vigas.



Fonte: Autor (2019)

### 3.1.2.2 *Altura das lajes*

A altura considerada para cada laje, inicialmente, foi a mínima para cada tipo de laje, de acordo com o pré dimensionamento. Portanto, a altura da BubbleDeck foi de 23cm, da laje maciça foi de 23cm e da nervurada foi de 30 cm. No entanto, a laje nervurada apresentou deformações muito grandes com 30 cm de altura, sendo adotada a altura de 33,5 cm.

### 3.1.2.3 *Carregamentos considerados*

Os carregamentos considerados para o cálculo das lajes seguirão os padrões indicados pela NBR 6120:1980:

- Peso próprio: 25 kN/m<sup>3</sup> (laje maciça); 16,25 kN/m<sup>3</sup> (BubbleDeck); 17,5 kN/m<sup>3</sup> (nervurada).
- Contrapiso: 21 kN/m<sup>3</sup>, 5 cm de espessura;
- Piso: 20 kN/m<sup>3</sup>, 1,2 cm de espessura;
- Carga acidental para edifícios comerciais: 2kN/m<sup>2</sup>
- Carga acidental para corredores: 3kN/m<sup>2</sup>

As combinações abaixo foram as consideradas neste trabalho:

- Última:  $F_d = \gamma_g * F_g + \gamma_q * F_q$
- Frequente de serviço:  $F_d = F_g + \psi_1 * F_q$
- Quase permanentes de serviço:  $F_d = F_g + \psi_2 * F_q$  Sendo que  $\gamma_g$  e  $\gamma_q = 1,4$ ,  $\psi_1 = 0,6$  e  $\psi_2 = 0,4$ , os coeficiente foram extraídos da NBR 6118:2014 para edifícios comerciais.

- Rara:  $F_d = F_g + F_q$ , usada na verificação de fissuras.

Dessa forma, os resultados das combinações acima foram agrupados na Tabela 3:

**Tabela 3 – Combinações das ações**

Combinação	Última (kN/m <sup>2</sup> )			Freq. Serviço (kN/m <sup>2</sup> )			Quase Perm. (kN/m <sup>2</sup> )			Rara (kN/m <sup>2</sup> )		
	Lisa	Nerv.	BD	Lisa	Nerv.	BD	Lisa	Nerv.	BD	Lisa	Nerv.	BD
Laje												
Carga escritório	12.66	12.81	9.84	8.24	8.35	6.23	7.84	7.95	5.83	9.04	9.15	7.03
Carga corredor	14.06	14.21	11.24	8.84	8.95	6.83	8.24	8.35	6.23	10.04	10.15	8.03

Fonte: Autor (2019)

### 3.1.2.4 Cobrimento

Segundo a NBR 6118, o cobrimento nominal de uma estrutura depende da classe de agressividade ambiental e do tipo de estrutura a ser construída.

**Tabela 4 – Classes de agressividade ambiental**

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>1), 2)</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>1)</sup>	Grande
		Industrial <sup>1), 2)</sup>	
IV	Muito forte	Industrial <sup>1), 3)</sup>	Elevado
		Respingos de maré	

<sup>1)</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

<sup>2)</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

<sup>3)</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014)

Considerando a localização da construção como a região do centro de Florianópolis, a partir da Tabela 4, temos que a classe de agressividade para construções em áreas urbanas é classe II – Moderada.

Para obter o cobrimento nominal necessário, tem-se a Tabela 5:

**Tabela 5 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para  $\Delta c = 10\text{mm}$**

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV <sup>3)</sup>
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje <sup>2)</sup>	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido <sup>1)</sup>	Todos	30	35	45	55

<sup>1)</sup> Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

<sup>2)</sup> Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal  $\geq 15\text{ mm}$ .

<sup>3)</sup> Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45\text{ mm}$ .

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014)

Sendo assim, o cobrimento nominal correspondente à classe de agressividade II e à uma laje em concreto armado é de 25mm.

### 3.1.2.5 Fck concreto

A resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias – Fck – também depende da classe de agressividade do ambiente da construção. Sendo a construção em questão considerada como classe II, pode-se conhecer o valor do Fck a partir da tabela a seguir:

**Tabela 6 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto**

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

NOTAS

1 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

2 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

3 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014)

A partir da Tabela 6, tem-se que a resistência mínima do concreto para concreto armado em classe de agressividade II é 25 MPa. Porém, será adotado um Fck de 30 MPa, mais usual para prédios que tem como sistema construtivo lajes nervuradas e BubbleDeck.

Com o valor do Fck já estabelecido, é possível calcular a resistência característica média à tração do concreto aos 28 dias ( $f_{ctk,m}$ ), a resistência característica inferior à tração do concreto aos 28 dias ( $f_{ctk,inf}$ ) e a resistência característica superior à tração aos 28 dias ( $f_{ctk,sup}$ ).

As equações para a obtenção dessas resistências foram extraídas da NBR 6118:2014:

$$f_{ctk,m} = 0,3 \times f_{ck}^{2/3} \quad (1)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \times f_{ctk,m} \quad (2)$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 \times f_{ctk,m} \quad (3)$$

Para transformar essas resistências para o ELU – estado limite último do concreto – divide-se cada uma das equações pelo coeficiente de ponderação das resistências no estado limite último ( $\gamma$ ), sendo  $\gamma_c = 1,4$ .

A Tabela 7 apresenta os valores característicos e de cálculo da resistência à compressão e tração do concreto para a estrutura em questão.

**Tabela 7 – Características do concreto**

Classe	Fck (MPa)	$f_{ct,m}$ (MPa)	$f_{ct,inf}$ (MPa)	$f_{ct,sup}$ (MPa)
Característico	30,00	2,90	2,03	3,76
Cálculo	21,43	2,07	1,45	2,69

Fonte: Autor (2019)

Também a partir do fck, pode-se calcular o módulo de elasticidade do concreto –  $E_{ci}$  – e o  $E_{cs}$  – módulo de elasticidade secante, indicado pela NBR para 6118:2014 para determinar esforços solicitantes.

$$E_{ci} = \alpha_e 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (4)$$

$$E_{cs} = \alpha_i E_{ci} \quad (5)$$

Sendo:

$\alpha_e = 1,2$  para basalto e diabásio;  $1,0$  para granito e gnaiss;  $0,9$  para calcário;  $0,7$  para arenito.

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \frac{f_{ck}}{80} \leq 1$$

Aplicando o  $F_{ck}$  de  $30 \text{ MPa}$  nas equações (4) e (5), com  $\alpha_e = 1$ , tem-se que  $E_{ci} = 30672,46 \text{ MPa}$  e  $E_{cs} = 26838,41 \text{ MPa}$ .

### 3.1.2.6 Aço

Os tipos de aço que serão utilizados no dimensionamento são o CA-60 para os fios de  $\Phi 5 \text{ mm}$  e o CA-50 com os diâmetros a partir de  $\Phi 6,3 \text{ mm}$ . A resistência a tração ( $f_{yk}$ ) e módulo de elasticidade ( $E_s$ ) dos aços citados acima estão apresentadas na tabela a seguir:

**Tabela 8 – Características dos aços**

Tipo de aço	$f_{yk}$ (MPa)	$f_{yd}$ (MPa)	$E_s$ (MPa)
CA-50	500	434,78	210000
CA-60	600	521,74	

Fonte: Adaptado de NBR 6118 (2014)

Os valores de  $F_{yk}$  são característicos e foram divididos pelo coeficiente de ponderação do ELU ( $\gamma_s = 1,15$ ), transformando-os em valores de cálculo ( $F_{yd}$ ).

### 3.1.3 Dimensionamento das armaduras

O dimensionamento das armaduras foi feito por meio de planilhas desenvolvidas com as equações que serão apresentadas a seguir. A modelagem da estrutura no software Eberick forneceu os momentos positivos e negativos, bem como os esforços cortantes atuantes em cada laje.

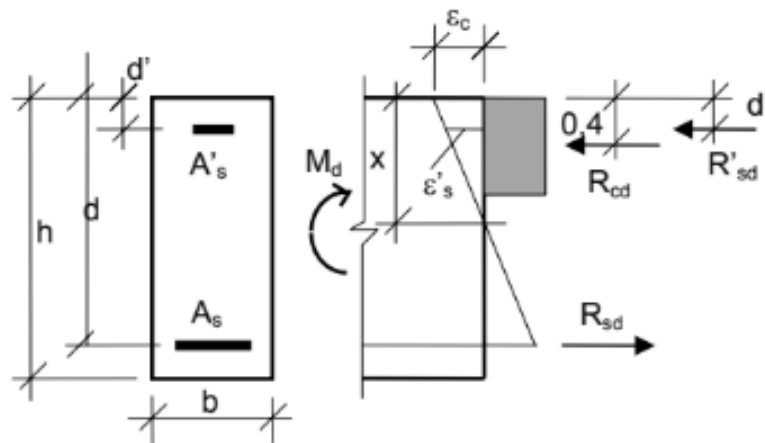


### 3.1.3.1 Seção retangular – Laje maciça

Nas lajes maciças com armadura simples, a zona comprimida da seção sujeita a flexão tem formato retangular, e as barras que constituem a armadura estão agrupadas junto à borda tracionada.

Quando há, além da armadura de tração  $A_s$ , uma armadura de compressão  $A'_s$  posicionada junto à borda oposta, tem-se uma seção com armadura dupla. Ela é utilizada para se obter uma seção sub-armada, não havendo necessidade de alterar as dimensões da laje, introduzindo uma parcela adicional na resultante de compressão e aumentando a resistência da seção.

**Figura 9 – Seção de uma laje maciça com armadura dupla**



Fonte: Apostila ES013 USP (2001)

A posição da linha neutra no domínio 2 ( $0,000 \leq \beta_x \leq 0,259$ ) ou no domínio 3 ( $0,259 \leq \beta_x \leq \beta_{x, \text{lim}}$ ) pode ser atingida definindo um valor de  $\beta_x$  que proporcione um dimensionamento com a menor quantidade total de armadura (menor  $A_s + A'_s$ ). Na prática, isto nem sempre é possível. O mais comum é simplesmente adotar  $\beta_{\text{lim}}$ , independentemente de qualquer estudo econômico.

Dessa forma, o domínio escolhido para as seções deste trabalho foi o domínio 3, e a relação  $\beta_x$  escolhida foi  $\beta_x = \beta_{x, \text{lim}} = 0,45$  ( $F_{ck} = 30 \text{ MPa}$ ).

Para dimensionar a armadura de lajes maciças retangulares, pode-se utilizar a mesma equação de vigas retangulares, para um metro de comprimento:

$$A_s = \frac{Md}{\sigma_s(1 - 0,4\beta_x)d} \quad (6)$$

Onde:

$$\beta x = \frac{x}{d};$$

$\sigma_s$  = tensão na armadura tracionada;

$M_d$  = momento de cálculo;

$A_s$  em  $\text{cm}^2/\text{m}$ .

O momento utilizado para calcular a armadura foi o máximo de cada laje, tanto para a armadura positiva quanto a negativa.

### 3.1.3.2 Seção T – Laje nervurada

Para calcular as armaduras das lajes nervuradas, pode ser aplicada a mesma equação de lajes maciças, em que a armadura resultante é colocada em cada nervura, por metro. Para tanto, o momento de cálculo deve ser dividido pelo espaçamento entre os eixos das nervuras.

As dimensões escolhidas para a laje nervurada estão descritas no quadro abaixo:

**Quadro 1 – Dimensões da laje nervurada**

Altura da alma (cm)	Espessura da mesa (cm)	Altura total (cm)	Largura da nervura (cm)	Espaçamento entre eixos nervuras (cm)	Peso próprio ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	Volume de concreto ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )
26,0	7,5	33,5	12,0	65,0	3,6	0,144

Fonte: Adaptado de Atex Brasil (2019)

A armadura da mesa para lajes nervuradas em que a distância entre os eixos das nervuras não ultrapassa 65 centímetros é igual a armadura mínima para essa seção. Sendo assim, a área de aço da mesa por metro em cada direção é dada por:

$$A_s \text{ mesa} = 0,15 h_f \quad (7)$$

Sendo:

$h_f$  = altura da mesa.

Segundo ARAÚJO (2014), ainda é possível calcular a altura equivalente da laje nervurada em relação a uma laje maciça, com as seguintes equações:

$$\xi = \frac{l_{ox}l_{oy}}{S_x S_y} \quad (8)$$

$$h_e = [(1 - \xi)h^3 + \xi h_f^3]^{1/3} \quad (9)$$

Onde:

$l_o$  = espaço vazio entre nervuras, nas direções x e y;

$S$  = distância entre eixos das nervuras;

$h$  = altura total da laje;

$h_f$  = altura da mesa.

### 3.1.3.3 Laje BubbleDeck

As lajes BubbleDeck podem ser dimensionadas como uma laje maciça, de acordo com o fabricante. Dessa forma, o dimensionamento da armadura e as verificações realizadas para esse tipo de laje seguiram as mesmas equações e métodos do item 3.1.3.1.

### 3.1.4 Verificações da seção

Ao dimensionar uma estrutura, é necessário realizar algumas verificações para garantir a segurança e conforto dos usuários, bem como a durabilidade da construção. Os próximos itens trazem algumas verificações sugeridas pela NBR 6118:2014.

#### 3.1.4.1 Flecha

Na verificação da flecha de uma laje, são avaliados: a existência de fissuras, o momento de inércia, as flechas imediata, diferida e total, e os valores limites.

Segundo MUZARDO e SANTOS (2010), em lajes de edifícios onde a única ação variável é a carga de uso, o valor da combinação rara é igual ao valor total da carga característica. Sendo assim, o momento atuante  $M_a$  é:

$$M_a = M_{d,rara} = M_r$$

O momento de fissuração  $M_r$ , de acordo com a NBR 6118, é:

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t} \quad (10)$$

$\alpha = 1,5$  para seção retangular;  $1,2$  para seção T;

$f_{ct} = f_{ctd,m}$  = equação (1), página 31;

$I_c$  = momento de inércia da seção

$y_t$  = distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada.

Se o momento  $M_a$  for maior que momento de fissuração  $M_r$ , a seção é dada como fissurada. Nessa situação, considera-se o momento de inércia equivalente:

$$I_{eq} = \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3 \cdot I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a}\right)^3\right] \cdot I_2 \quad (11)$$

$I_2$  é momento de inércia da seção fissurada no estágio 2, que depende da posição da linha neutra  $x$ . Ele é determinado por:

$$I_2 = \left(\frac{b \cdot x^3}{12}\right) + b \cdot x \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^2 + \alpha e \cdot A'_s \cdot (x - d')^2 + \alpha e \cdot A_s \cdot (d - x)^2 \quad (12)$$

Sendo:

$$\alpha e = \frac{E_s}{E_c s}$$

De acordo com LIMA (2007), a flecha imediata pode ser calculada a partir da equação (13):

$$\alpha_i = \frac{\alpha}{100} \cdot \frac{b}{12} \cdot \frac{p l_x^4}{E_c I_c} \quad (13)$$

Onde:

$\alpha$  = coeficiente adimensional tabelado, função do tipo de vinculação e de  $\lambda = \frac{l_y}{l_x}$  (Anexo

a – valores de  $\alpha$ );

$l_x$  = menor vão;

$b$  = 100 cm;

$p$  = carga na combinação quase permanente;

$E_c = E_{cs} = 0,85.5600\sqrt{f_{ck}}$ .

Se houver fissuração,  $I_c$  deve ser substituído por  $I_{eq}$  - equação (13).

Além da flecha imediata, deve-se calcular a parcela de flecha adicional diferida, resultante das cargas de longa duração. Ela pode ser calculada através da multiplicação da flecha imediata pelo fator  $\alpha f$ :

$$\alpha f = \frac{\Delta \xi}{1 + 50\rho'} \quad (14)$$

$$\rho' = \frac{A's}{b.d} \quad (15)$$

$$\Delta \xi = \xi(t) - \xi(t_0) \quad (16)$$

Onde:

$t$  = tempo, em meses, quando se deseja o valor da flecha diferida;

$t_0$  = idade, em meses, relativa à aplicação da carga de longa duração.

O coeficiente  $\xi$ , apresentado na Tabela 9, é dado em função do tempo desejado para o valor da flecha.

**Tabela 9 – Valores de  $\xi$  em função do tempo**

Tempo (t) meses	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	$\geq 70$
Coeficiente $\xi(t)$	0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014)

Finalmente, a flecha diferida  $a_f$  é dada por:

$$a_f = \alpha_f \cdot a_i \quad (17)$$

Com os valores de flecha imediata e flecha diferida, pode-se então calcular o valor final da flecha, obtida por:

$$a_t = a_i + a_f \quad (18)$$

O valor limite da flecha total, segundo a NBR 6118:2014 é:

$$a_{lim} = \frac{l_x}{250} \quad (19)$$

Esse limite corresponde à aceitabilidade visual dos usuários. Se a flecha final da laje for maior que a admissível, é possível utilizar uma contra flecha. A NBR 6118:2014 estabelece um limite de  $\frac{l_x}{350}$  para a contra flecha.

### 3.1.4.2 Cisalhamento

As forças cortantes, em geral, são satisfatoriamente resistidas pelo concreto, dispensando o emprego de armadura transversal. Segundo a NBR 6118:2014, lajes maciças e nervuradas não necessitam de armadura de cisalhamento, se a seguinte condição for satisfeita:

$$V_{sd} \leq V_{Rd1} \quad (20)$$

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k(1,2 + 40 \cdot \rho_1)] \cdot b_w \cdot d \quad (21)$$

Onde:

$V_{sd}$  = força cortante de cálculo;

$V_{Rd1}$  = resistência de projeto ao cisalhamento;

$d$  = altura útil da laje;

$$\tau_{Rd} = 0,25 \cdot f_{ctd,inf};$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{b_w \cdot d} \leq 0,02 = \text{Taxa geométrica de armadura longitudinal de tração};$$

$k = 1,6 - d \geq 1$ , com  $d$  em metros.

Para verificar a compressão diagonal do concreto em elementos que não possuem armaduras de cisalhamento, a NBR 6118:2014 sugere a seguinte equação:

$$V_{sd} \leq V_{Rd2} \quad (22)$$

$$V_{Rd2} = 0,5 \cdot \alpha_{v1} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,9 \cdot d \quad (23)$$

Onde:

$V_{Rd2}$  = força cortante resistente de cálculo relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto;

$$\alpha_{v1} = \left( 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} \right) \leq 0,5, \text{ com } f_{ck} \text{ em MPa}$$

Caso a condição não seja verificada, deve ser dimensionada uma armadura para resistir a esses esforços.

### 3.2 Estudo paramétrico

Com o intuito de determinar a eficiência de cada laje a ser estudada, foi feito um estudo paramétrico, fixando-se valores de carga, altura da laje e  $F_{ck}$ , a taxa de armadura e o vão dos três tipos de laje. Os resultados foram obtidos a partir do dimensionamento de lajes quadradas simplesmente apoiadas de tamanhos crescentes (5x5m, 6x6m, 7x7m...).

Além de encontrar a relação entre a taxa de armadura e o vão da estrutura em questão, foi analisada também a deformação da laje ao passo que se aumentam os vãos das mesmas.

De acordo com MOURA E MARCELLINO (2001), verificar a estrutura no estado limite de serviço é indispensável para garantir um desempenho satisfatório das estruturas em condição de serviço. Dessa forma, a estrutura deve ser rígida suficiente para que não haja deformações que provoquem danos em elementos não estruturais, não afetem o seu uso ou a sua aparência, nem causem desconforto aos usuários.

Ao analisar e dimensionar a estrutura com os diferentes tipos de lajes, buscou-se determinar o vão máximo que cada laje pode atingir sem que se ultrapasse a flecha máxima total.

Ao final desta análise, foi gerado um gráfico de Taxa de armadura x Vão e um gráfico Deformação x Vão, bem como o peso de aço total das lajes.



## **4 ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Nesse capítulo, serão abordados os resultados obtidos durante o dimensionamento das estruturas propostas na metodologia.

Na primeira parte, é apresentado o dimensionamento das armaduras do pavimento tipo para os três tipos de laje, juntamente com as verificações de cisalhamento e flecha.

Em seguida, é feita a análise do dimensionamento das lajes com vãos crescentes, com as taxas de armadura em Kg/m<sup>2</sup>. Logo após, são apresentados os resultados das verificações de deslocamento e cisalhamento.

### **4.1 Dimensionamento do pavimento tipo**

A seguir serão apresentados os resultados obtidos no dimensionamento do pavimento tipo do edifício comercial mostrado na metodologia.

#### **4.1.1 Armaduras das lajes**

A partir do dimensionamento das armaduras negativas e positivas do pavimento tipo com lajes maciças, foi gerada a tabela a seguir:

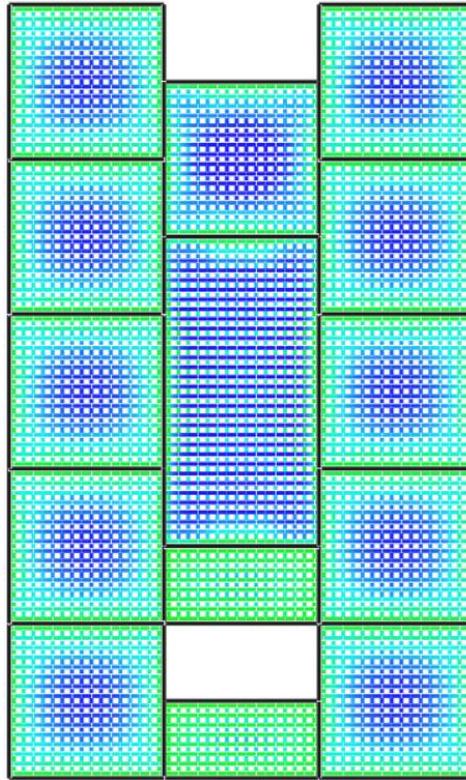
**Tabela 10 – Armaduras laje maciça**

Laje	Armadura x positiva	Armadura y positiva	Armadura x negativa	Armadura y negativa	Armadura total laje (kg)
<b>L1</b>	Ø 10.0 c/ 15	Ø 10.0 c/ 15	Ø 6.3 c/ 23	Ø 6.3 c/ 23	535.03
<b>L2</b>	Ø 10.0 c/ 15	Ø 10.0 c/ 15	Ø 6.3 c/ 23	Ø 6.3 c/ 23	535.03
<b>L3</b>	Ø 12.5 c/ 19	Ø 12.5 c/ 18	Ø 8.0 c/ 24	Ø 8.0 c/ 24	726.03
<b>L4</b>	Ø 10.0 c/ 15	Ø 10.0 c/ 15	Ø 6.3 c/ 23	Ø 6.3 c/ 23	535.03
<b>L5</b>	Ø 10.0 c/ 15	Ø 10.0 c/ 15	Ø 6.3 c/ 23	Ø 6.3 c/ 23	535.03
<b>L6</b>	Ø 12.5 c/ 9	Ø 10.0 c/ 20	Ø 6.3 c/ 10	Ø 6.3 c/ 10	1896.78
<b>L7</b>	Ø 10.0 c/ 15	Ø 10.0 c/ 15	Ø 6.3 c/ 23	Ø 6.3 c/ 23	535.03
<b>L8</b>	Ø 10.0 c/ 15	Ø 10.0 c/ 15	Ø 6.3 c/ 23	Ø 6.3 c/ 23	535.03
<b>L9</b>	Ø 10.0 c/ 15	Ø 10.0 c/ 15	Ø 6.3 c/ 23	Ø 6.3 c/ 23	535.03
<b>L10</b>	Ø 10.0 c/ 15	Ø 10.0 c/ 15	Ø 6.3 c/ 23	Ø 6.3 c/ 23	535.03
<b>L11</b>	Ø 6.3 c/ 30	Ø 8.0 c/ 15	-	-	110.40
<b>L12</b>	Ø 10.0 c/ 15	Ø 10.0 c/ 15	Ø 6.3 c/ 23	Ø 6.3 c/ 23	535.03
<b>L13</b>	Ø 10.0 c/ 15	Ø 10.0 c/ 15	Ø 6.3 c/ 23	Ø 6.3 c/ 23	535.03
<b>L14</b>	Ø 6.3 c/ 30	Ø 8.0 c/ 15	-	-	110.40
Peso total de aço pavimento tipo					8193.89

Fonte: Autor (2019)

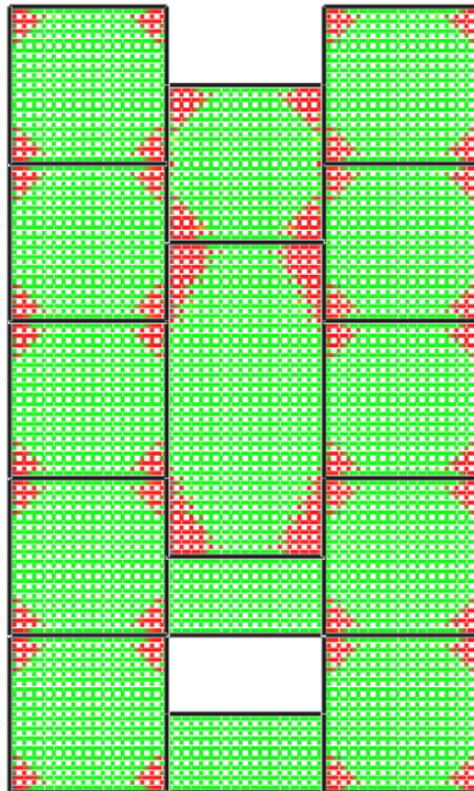
As armaduras positivas foram colocadas em todo comprimento das lajes, nas duas direções. Já as armaduras negativas foram colocadas apenas onde houve momento negativo, como mostram as figuras a seguir:

**Figura 10 – Momentos positivos nas lajes maciças**



Fonte: Autor (2019)

**Figura 11 – Momentos negativos nas lajes maciças**



Fonte: Autor (2019)

Essas armaduras de momentos volventes são importantes para que não ocorram fissuras nesses locais, evitando o aumento das flechas e dos momentos positivos.

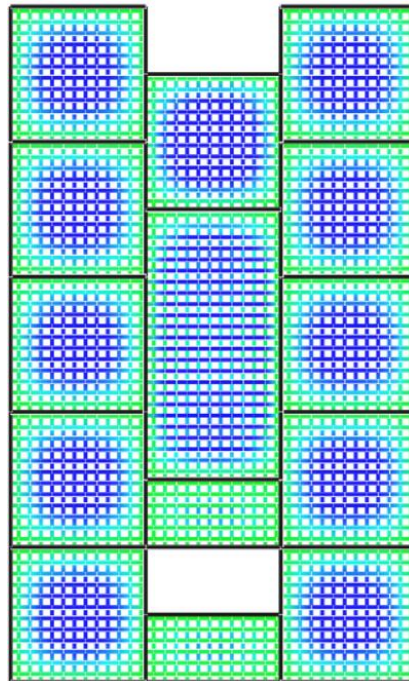
Do dimensionamento do pavimento tipo com lajes nervuradas, foram extraídos os seguintes resultados:

**Tabela 11 – Armaduras laje nervurada**

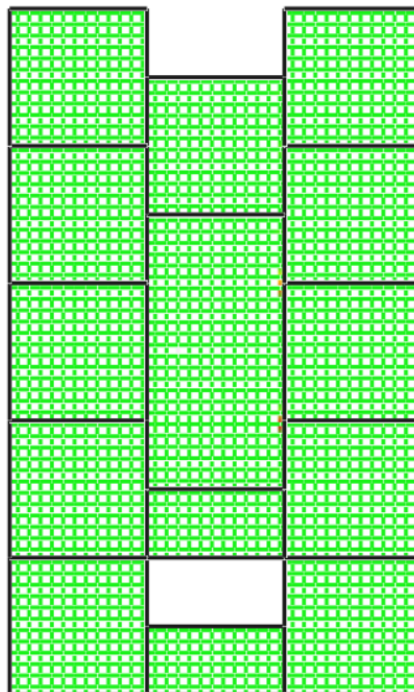
Laje	Armadura x positiva	Armadura y positiva	Armadura Mesa	Armadura total laje (kg)
<b>L1</b>	4 Ø10.0 c/N	4 Ø10.0 c/N	Ø 5.0 c/25	495.86
<b>L2</b>	4 Ø10.0 c/N	4 Ø10.0 c/N	Ø 5.0 c/25	495.86
<b>L3</b>	3 Ø12.5 c/N	3 Ø12.5 c/N	Ø 5.0 c/25	576.84
<b>L4</b>	3 Ø12.5 c/N	3 Ø12.5 c/N	Ø 5.0 c/25	578.77
<b>L5</b>	3 Ø12.5 c/N	3 Ø12.5 c/N	Ø 5.0 c/25	578.77
<b>L6</b>	5 Ø12.5 c/N	2 Ø12.5 c/N	Ø 5.0 c/25	1342.24
<b>L7</b>	3 Ø12.5 c/N	3 Ø12.5 c/N	Ø 5.0 c/25	578.77
<b>L8</b>	3 Ø12.5 c/N	3 Ø12.5 c/N	Ø 5.0 c/25	578.77
<b>L9</b>	4 Ø10.0 c/N	4 Ø10.0 c/N	Ø 5.0 c/25	495.86
<b>L10</b>	4 Ø10.0 c/N	4 Ø10.0 c/N	Ø 5.0 c/25	495.86
<b>L11</b>	2 Ø8.0 c/N	2 Ø12.5 c/N	Ø 5.0 c/25	141.10
<b>L12</b>	4 Ø10.0 c/N	4 Ø10.0 c/N	Ø 5.0 c/25	495.86
<b>L13</b>	4 Ø10.0 c/N	4 Ø10.0 c/N	Ø 5.0 c/25	495.86
<b>L14</b>	1 Ø8.0 c/N	2 Ø10.0 c/N	Ø 5.0 c/25	87.59
Peso total de aço pavimento tipo				7438.01

Fonte: Autor (2019)

As armaduras positivas da laje nervurada foram calculadas a partir do momentos positivos máximo em cada laje. Não houve necessidade de armadura superior, pois os momentos negativos foram nulos. Porém, foi calculada armadura de mesa, equivalente à taxa de armadura mínima dessa seção.

**Figura 12 – Momentos positivos nas lajes nervuradas**

Fonte: Autor (2019)

**Figura 13 – Momentos negativos nas lajes nervuradas**

Fonte: Autor (2019)

Por fim, a partir do dimensionamento do pavimento tipo com lajes BubbleDeck foi gerada a Tabela 12:

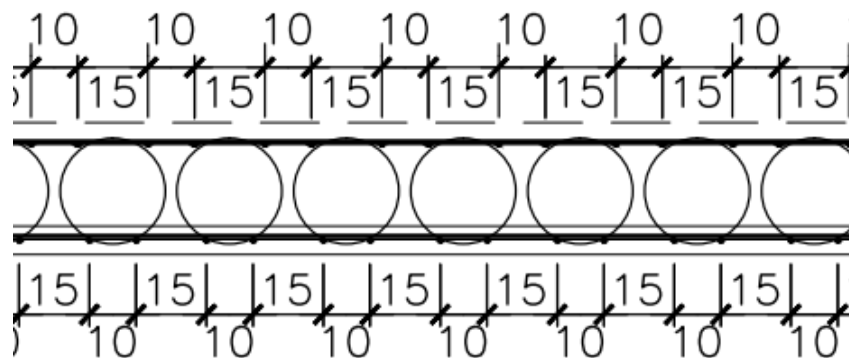
Tabela 12 – Armaduras laje BubbleDeck

Laje	Armadura x positiva	Armadura y positiva	Armadura x negativa	Armadura y negativa	Armadura superior construtiva	Armadura total laje (kg)
L1	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	472.54
L2	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	472.54
L3	2 Ø 6.3 c/ 12.5	2 Ø 6.3 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	1 Ø 6.3 c/ 12.5	Q61	605.29
L4	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	472.54
L5	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	472.54
L6	2 Ø 10.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	2 Ø 6.3 c/ 12.5	2 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	1637.33
L7	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	472.54
L8	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	472.54
L9	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	472.54
L10	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	472.54
L11	1 Ø 5.0 c/ 12.5	2 Ø 5.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	149.31
L12	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	472.54
L13	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	472.54
L14	1 Ø 5.0 c/ 12.5	2 Ø 5.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	149.31
Peso de aço total pavimento tipo						7266.60

Fonte: Autor (2019)

Para otimizar o dimensionamento, algumas das lajes BubbleDeck foram armadas com feixes de armaduras, compostos por 2 barras de mesmo diâmetro. As armaduras superiores e inferiores foram posicionadas de acordo com a figura a seguir:

Figura 14 – Disposição das armaduras na laje BubbleDeck



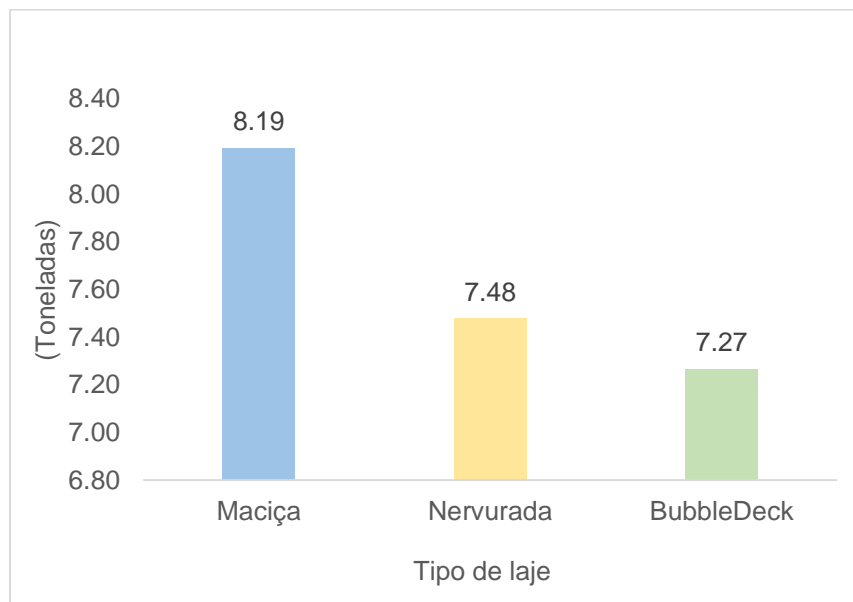
Fonte: BubbleDeck Brasil (2014)

Essa disposição das armaduras é recomendada pelo fabricante. Para facilitar os cálculos, foi feita a distância média entre as armaduras, com o valor de 12,5 cm, como mostrado na Tabela 12.

Assim como nas lajes maciças, as lajes BubbleDeck necessitaram de armadura negativa apenas nos cantos das lajes. Foi colocada uma armadura construtiva na parte superior das lajes, para auxiliar na fixação das bolhas plásticas nos locais onde não há armadura de momento negativo. As telas Q61 são malhas de fios de aços CA-60 soldados em seus cruzamentos, os quais possuem diâmetro de 4,2 mm e têm um peso de 0,97 kg/m<sup>2</sup>.

Como é possível observar, a laje BubbleDeck teve um menor consumo de aço se comparada com as lajes maciças e nervuradas. Para evidenciar as diferenças entre as armaduras entre cada tipo de laje, foi feito o Gráfico 1:

**Gráfico 1 – Peso de aço pavimento tipo**



Fonte: Autor (2019)

A diferença de peso de aço da laje nervurada para a maciça foi de 9,22%. Entre a laje nervurada e a BubbleDeck, a diferença foi de 2,30%. Por fim, a diferença de peso de aço entre a laje maciça e a BubbleDeck foi de 11,32%.

Essa diferença de peso de aço se deve, principalmente, ao peso próprio de cada laje. As lajes nervurada e BubbleDeck têm um peso próprio menor que a maciça, o que gera um momento fletor mais baixo e, por consequência, uma menor área de armadura necessária para a seção.

O peso de concreto do pavimento tipo para cada tipo de laje está demonstrado no quadro a seguir:

**Quadro 2 – Peso de concreto das lajes**

Laje	Maciça	Nervurada	BubbleDeck
Consumo de concreto (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	0.230	0.144	0.150
Peso concreto (ton)	494.592	309.66	322.56

Fonte: Autor (2019)

O consumo de concreto das lajes nervurada e BubbleDeck foi retirado das especificações dos respectivos fabricantes (Atex e BubbleDeck).

O peso total final das lajes do pavimento tipo, somando o aço e o concreto, foi de:

**Quadro 3 – Peso total das lajes**

Laje	Maciça	Nervurada	BubbleDeck
Peso total (ton)	502.79	317.14	329.83

Fonte: Autor (2019)

Mesmo com um consumo de concreto por m<sup>2</sup> maior que a da laje nervurada, a laje BubbleDeck foi a solução mais leve para o pavimento tipo estudado.

#### 4.1.2 Verificações

Foram feitas verificações de flecha e cisalhamento em todas as lajes de cada tipo: maciça, nervurada e BubbleDeck. A seguir, é apresentado um trecho da tabela de verificações, para demonstrar como o autor fez os cálculos a partir dos dados de esforços solicitantes, extraídos do Eberick.



Figura 15 - Trecho da tabela de verificação de flechas

(Mpa)		(kN/cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>4</sup> )	(cm)		
fck	$\alpha$	$\cdot f_{ct}$	$I_c$	$Y_t$	Es	Ecs
30	1.5	0.1448	101391.667	11.5	2100000	260715.9

Dimensoes laje	h	b
(cm)	23	100
Cobrimento	lx	ly
2.5	1000	1000
Mr	1915.289567	(kN*cm)
	191528.9567	(kgf*cm)
Ma	396300	(kgf*cm)
UTILIZAR leq		
Md	5864	(kgf*m)
$\alpha e$	8.054743493	
As	8.02	(cm <sup>2</sup> /m)
d	20.5	(cm)
x	9.23	(cm)
$I_2$	34384.08417	(cm <sup>4</sup> )
leq	41948.14585	(cm <sup>4</sup> )

Flecha imediata $\alpha i$	
$\alpha$	4.76
lx	1000
p	0.0784 (kgf/cm <sup>2</sup> )
lc	41948.14585
	<b>2.843553606</b>

Flecha diferida af	
$\Delta \epsilon$	0.832
$A's$	0
$\rho'$	0
$\alpha f$	0.832
	<b>2.3658366</b>

$\alpha_{lim}$	4
FLECHA TOTAL	5.21
<b>Flecha maior que o limite</b>	
Contraflecha	2.86
	<b>2.35</b>

(cm)

Fonte: Autor (2019)

A Tabela 13 mostra os valores de flecha encontrados:

Tabela 13 – Flechas pavimento tipo

Laje	Vão (m)	Uso	Flecha (cm)			Flecha máxima (cm)
			Maciça	Nervurada	BubbleDeck	
1	8x8	Escritório	1.50	1.36	0.70	3.2
2	8x8	Escritório	1.50	1.36	0.70	3.2
3	8x8	Circulação	1.98	1.43	0.91	3.2
4	8x8	Escritório	1.51	1.36	0.91	3.2
5	8x8	Escritório	1.51	1.36	0.71	3.2
6	8x16	Circulação	4.79	3.43	3.30	3.2
7	8x8	Escritório	1.50	1.36	0.71	3.2
8	8x8	Escritório	1.50	1.36	0.71	3.2
9	8x8	Escritório	1.51	1.36	0.71	3.2
10	8x8	Escritório	1.51	1.36	0.71	3.2
11	4x8	Circulação	0.15	0.15	0.11	1.6
12	8x8	Escritório	1.50	1.36	0.68	3.2
13	8x8	Escritório	1.50	1.36	0.68	3.2
14	4x8	Circulação	0.15	0.15	0.11	1.6

Fonte: Autor (2019)

As flechas foram calculadas com aplicação da carga a partir de 6 meses da construção das lajes. Como fica evidente na tabela acima, as flechas das lajes maciças foram maiores que as das lajes nervuradas e BubbleDeck. Apesar desse sistema apresentar maior inércia e área tracionada que as outras, ele também tem maior peso próprio, o que contribui para o aumento das flechas.

Para as verificações de cisalhamento, foram utilizados os esforços cortantes solicitantes extraídos da análise no software Eberick. Os valores resistentes foram calculados a partir das equações (21) e (23). Os valores solicitantes e resistentes estão apresentados nas tabelas a seguir:

**Tabela 14 – Cisalhamento laje maciça**

Laje	Vsd (tf/m)	Vrd1 (tf/m)	Vrd2 (tf/m)
1	4.97	13.47	98.84
2	4.97	13.47	98.84
3	7.43	13.10	98.84
4	4.97	13.47	98.84
5	4.97	13.47	98.84
6	7.23	15.17	98.84
7	4.97	13.47	98.84
8	4.97	13.47	98.84
9	4.97	13.47	98.84
10	4.97	13.47	98.84
11	2.86	12.62	98.84
12	4.97	13.47	98.84
13	4.97	13.47	98.84
14	2.86	12.62	98.84

Fonte: Autor (2019)

Como o esforço cortante solicitante (Vsd) foi menor que a resistência ao cisalhamento (Vrd1) e a resistência a ruína das diagonais (Vrd2), não foi necessário dimensionar armadura de cisalhamento para as lajes maciças do pavimento tipo.

**Tabela 15 – Cisalhamento laje nervurada**

Laje	Vsd (tf/m)	Vrd1 (tf/m)	Vrd2 (tf/m)
1	1.94	3.05	17.94
2	1.94	3.05	17.94
3	2.69	2.71	17.94
4	1.94	3.05	17.94
5	1.94	3.05	17.94
6	3.18	3.20	17.94
7	1.94	3.05	17.94
8	1.94	3.05	17.94
9	1.94	3.05	17.94
10	1.94	3.05	17.94
11	1.67	2.27	17.94
12	1.94	3.05	17.94
13	1.94	3.05	17.94
14	1.67	2.27	17.94

Fonte: Autor (2019)

As resistências ao cisalhamento da laje nervurada foram menores que as das lajes maciças. Ainda assim, não houve necessidade de armadura específica para os esforços de cisalhamento.

Por fim, os esforços cortantes e resistentes para a laje BubbleDeck são exibidos na Tabela 16. Foi aplicado o fator de redução de 0,6 sobre a resistência ao cisalhamento (Vrd1) e a resistência a ruína das diagonais (Vrd2), como indicado pelo fabricante.

**Tabela 16 – Cisalhamento laje BubbleDeck**

Laje	Vsd (tf/m)	Vrd1 (tf/m)	Vrd2 (tf/m)
1	4.97	7.95	59.30
2	4.97	7.95	59.30
3	2.86	8.03	59.30
4	4.97	7.95	59.30
5	4.97	7.95	59.30
6	7.23	8.98	59.30
7	4.97	7.95	59.30
8	4.97	7.95	59.30
9	4.97	7.95	59.30
10	4.97	7.95	59.30
11	2.85	7.78	59.30
12	4.97	7.95	59.30
13	4.97	7.95	59.30
14	2.85	7.78	59.30

Fonte: Autor (2019)

Mesmo com o fator de redução aplicado, as lajes BubbleDeck do pavimento tipo em questão apresentaram boa resistência ao cisalhamento, com valores maiores que os solicitantes. Dessa forma, não foi necessária armadura de cisalhamento.

## 4.2 Estudo paramétrico

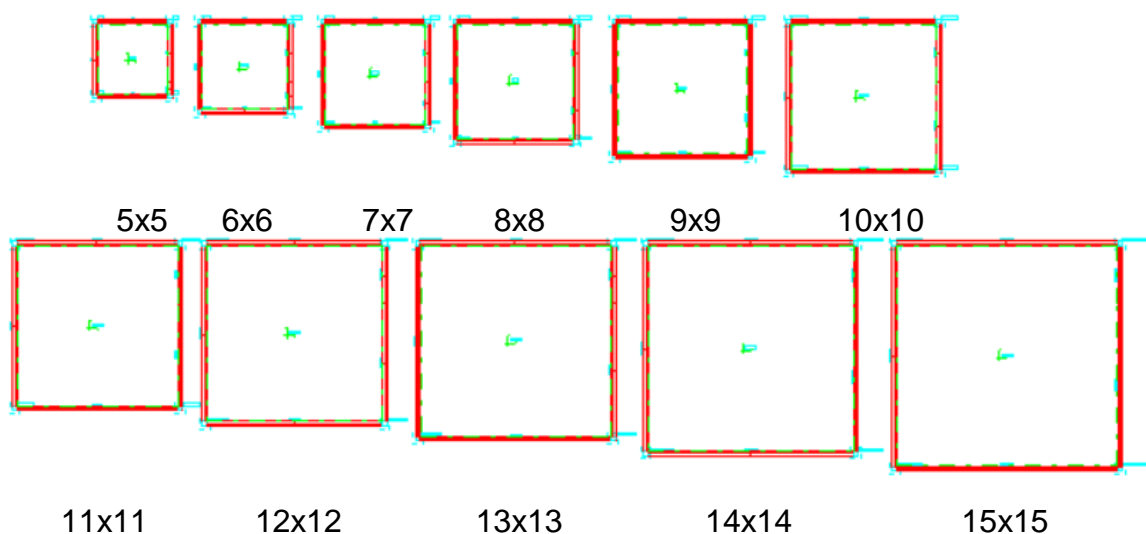
Para relacionar a taxa de armadura das lajes com os respectivos vãos, foram lançadas no software Eberick as lajes quadradas com vãos crescentes, partindo de 5 metros, com os três tipos de laje. Assim como no capítulo anterior, os pilares utilizados têm seção quadrada de 30 centímetros e 3 metros de comprimento.

Do mesmo modo, as vigas têm altura de 3 metros e largura de 30 centímetros. Essa altura foi adotada para que as deformações e esforços presentes nas lajes sejam provenientes apenas dela mesma, e não um efeito das deformações das vigas.

A altura das lajes foi mantida constante em todos os vãos: a laje maciça e BubbleDeck com 23 centímetros de altura e a laje nervurada com 33,5 centímetros de altura.

Vale lembrar que as características das lajes, como cobrimento e  $F_{ck}$ , foram as mesmas descritas no item 3.1.2 da metodologia.

**Figura 16 – Lançamento das lajes isoladas**



#### 4.2.1 Armaduras das lajes

As armaduras inferiores das lajes foram dimensionadas a partir do momento positivo atuante máximo em cada uma, fornecidos pelo software Eberick. Da mesma forma, as armaduras superiores foram calculadas com o momento negativo de cálculo máximo, e colocadas nas respectivas áreas de abrangência.

As armaduras obtidas estão apresentadas nas tabelas a seguir:

**Tabela 17 – Armaduras lajes maciças isoladas**

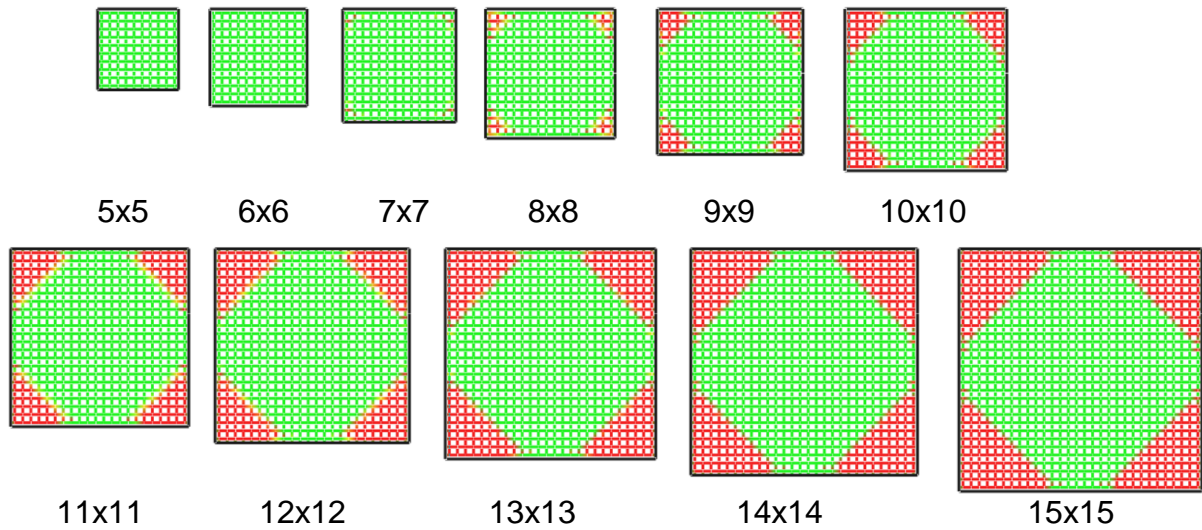
Laje	Armadura x positiva	Armadura y positiva	Armadura x negativa	Armadura y negativa	Armadura total laje (kg)
<b>5x5</b>	Ø 8.0 c/ 14	Ø 8.0 c/ 14	Ø 5.0 c/ 30	Ø 5.0 c/ 12.5	141.07
<b>6x6</b>	Ø 8.0 c/ 14	Ø 8.0 c/ 14	Ø 5.0 c/ 30	Ø 5.0 c/ 12.5	203.14
<b>7x7</b>	Ø 8.0 c/ 13	Ø 8.0 c/ 13	Ø 5.0 c/ 30	Ø 5.0 c/ 30.0	313.79
<b>8x8</b>	Ø 10.0 c/ 15	Ø 10.0 c/ 15	Ø 5.0 c/ 15	Ø 5.0 c/ 15.0	547.04
<b>9x9</b>	Ø 10.0 c/ 12	Ø 10.0 c/ 12	Ø 8.0 c/ 22	Ø 8.0 c/ 22.0	892.20
<b>10x10</b>	Ø 12.5 c/ 15	Ø 12.5 c/ 15	Ø 8.0 c/ 15	Ø 8.0 c/ 15.0	1370.90
<b>11x11</b>	Ø 12.5 c/ 13	Ø 12.5 c/ 13	Ø 8.0 c/ 11	Ø 8.0 c/ 11.0	2151.64
<b>12x12</b>	Ø 16.0 c/ 17	Ø 16.0 c/ 17	Ø 10.0 c/ 14	Ø 10.0 c/ 14.0	3100.81
<b>13x13</b>	Ø 12.5 c/ 9	Ø 12.5 c/ 9	Ø 10.0 c/ 11	Ø 10.0 c/ 11.0	4379.44
<b>14x14</b>	Ø 16.0 c/ 13	Ø 16.0 c/ 13	Ø 12.5 c/ 14	Ø 12.5 c/ 14.0	5996.42
<b>15x15</b>	Ø 16.0 c/ 11	Ø 16.0 c/ 11	Ø 12.5 c/ 12	Ø 12.5 c/ 12.0	8830.85

Fonte: Autor (2019)

A armadura mínima para a seção de 23x100 cm é de 3,45 cm<sup>2</sup>. A armadura máxima essa mesma seção é de 92cm<sup>2</sup>, somando a área de aço inferior e superior. Portanto, todas as lajes estão nos limites de armadura estabelecidos.

Assim como no dimensionamento do pavimento tipo, as lajes maciças necessitaram de armadura negativa apenas nos cantos das lajes, como mostra a Figura 17:

Figura 17 – Momentos negativos lajes isoladas



Fonte: Autor (2019)

Tabela 18 – Armaduras lajes nervuradas isoladas

Laje	Armadura x positiva	Armadura y positiva	Armadura x negativa	Armadura y negativa	Armadura mesa	Armadura total laje (kg)
5x5	3 Ø8.0 c/N	3 Ø8.0 c/N	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/25	121.95
6x6	2 Ø10.0 c/N	2 Ø10.0 c/N	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/25	181.04
7x7	4 Ø8.0 c/N	4 Ø8.0 c/N	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/25	298.58
8x8	4 Ø10.0 c/N	4 Ø10.0 c/N	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/25	564.85
9x9	3 Ø12.5 c/N	3 Ø12.5 c/N	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/25	819.82
10x10	4 Ø12.5 c/N	4 Ø12.5 c/N	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/25	1308.43
11x11	3 Ø16.0 c/N	3 Ø16.0 c/N	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/25	1911.58
12x12	4 Ø16.0 c/N	4 Ø16.0 c/N	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/25	2974.11
13x13	4 Ø16.0 c/N	4 Ø16.0 c/N	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/	Ø5.0 c/25	3490.45
14x14	5 Ø16.0 c/N	5 Ø16.0 c/N	Ø5.0 c/ 30	Ø5.0 c/ 30	Ø5.0 c/25	4999.75
15x15	5 Ø16.0 c/N	5 Ø16.0 c/N	Ø5.0 c/ 25	Ø5.0 c/ 25	Ø5.0 c/25	5818.36

Fonte: Autor (2019)

A área mínima de aço para as nervuras de 12x33,5 cm é de 0,603 cm<sup>2</sup>. A área de aço máxima essa mesma seção é de 16,08cm<sup>2</sup>. Portanto, todas as lajes estão dentro dos limites estabelecidos.

Tabela 19 – Armaduras lajes BubbleDeck isoladas

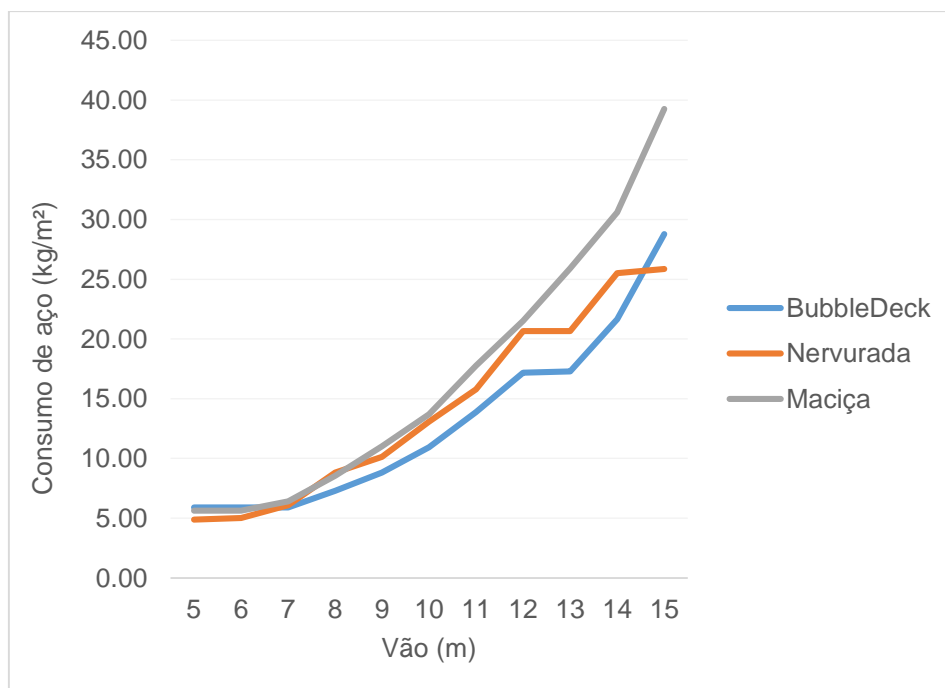
Laje	Armadura x positiva	Armadura y positiva	Armadura x negativa	Armadura y negativa	Armadura construtiva	Armadura total laje (kg)
5x5	2 Ø 5.0 c/ 12.5	2 Ø 5.0 c/ 12.5	0 Ø 5.0 c/ 12.5	0 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	147.45
6x6	2 Ø 5.0 c/ 12.5	2 Ø 5.0 c/ 12.5	0 Ø 5.0 c/ 12.5	0 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	212.33
7x7	2 Ø 5.0 c/ 12.5	2 Ø 5.0 c/ 12.5	0 Ø 5.0 c/ 12.5	0 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	289.00
8x8	1 Ø 8.0 c/ 12.5	1 Ø 8.0 c/ 12.5	0 Ø 5.0 c/ 12.5	0 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	466.56
9x9	2 Ø 6.3 c/ 12.5	2 Ø 6.3 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	1 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	715.10
10x10	1 Ø 10.0 c/ 12.5	1 Ø 10.0 c/ 12.5	1 Ø 6.3 c/ 12.5	1 Ø 6.3 c/ 12.5	Q61	1093.03
11x11	2 Ø 8.0 c/ 12.5	2 Ø 8.0 c/ 12.5	2 Ø 5.0 c/ 12.5	2 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	1680.57
12x12	4 Ø 6.3 c/ 12.5	4 Ø 6.3 c/ 12.5	3 Ø 5.0 c/ 12.5	3 Ø 5.0 c/ 12.5	Q61	2474.48
13x13	4 Ø 6.3 c/ 12.5	4 Ø 6.3 c/ 12.5	2 Ø 6.3 c/ 12.5	2 Ø 6.3 c/ 12.5	Q61	2923.77
14x14	2 Ø 10.0 c/ 12.5	2 Ø 10.0 c/ 12.5	1 Ø 10.0 c/ 12.5	1 Ø 10.0 c/ 12.5	Q61	4246.80
15x15	4 Ø 8.0 c/ 12.5	4 Ø 8.0 c/ 12.5	2 Ø 8.0 c/ 12.5	2 Ø 8.0 c/ 12.5	Q61	6478.08

Fonte: Autor (2019)

A armadura mínima para a seção da BubbleDeck de 23x100 cm é de 3,45 cm<sup>2</sup>. A armadura máxima essa mesma seção é de 92 cm<sup>2</sup>, somando a área de aço inferior e superior. Portanto, todas as lajes estão nos limites de armadura estabelecidos.

O Gráfico 2 evidencia a relação entre o peso de aço por m<sup>2</sup> e o vão das lajes:

Gráfico 2 – Consumo de aço de acordo com o vão



Fonte: Autor (2019)

As lajes maciça e BubbleDeck foram armadas com a área mínima de aço necessária para os vãos de 5 e 6 metros, pois os momentos solicitantes foram baixos para esses comprimentos.

#### 4.2.2 Verificações

As flechas obtidas a partir do dimensionamento do pavimento tipo estão demonstradas na tabela a seguir:

**Tabela 20 – Flechas das lajes isoladas**

Vão (m)	Flecha (cm)			Flecha máxima
	Maciça	Nervurada	BubbleDeck	(cm)
5x5	0.13	0.21	0.10	2.00
6x6	0.28	0.45	0.21	2.40
7x7	0.57	0.85	0.38	2.80
8x8	1.48	1.43	0.67	3.20
9x9	3.07	2.26	1.65	3.60
10x10	5.21	3.40	3.22	4.00
11x11	7.70	4.90	5.39	4.40
12x12	10.79	6.76	7.96	4.80
13x13	13.13	9.05	10.92	5.20
14x14	18.76	11.93	14.54	5.60
15x15	23.28	15.40	18.07	6.00

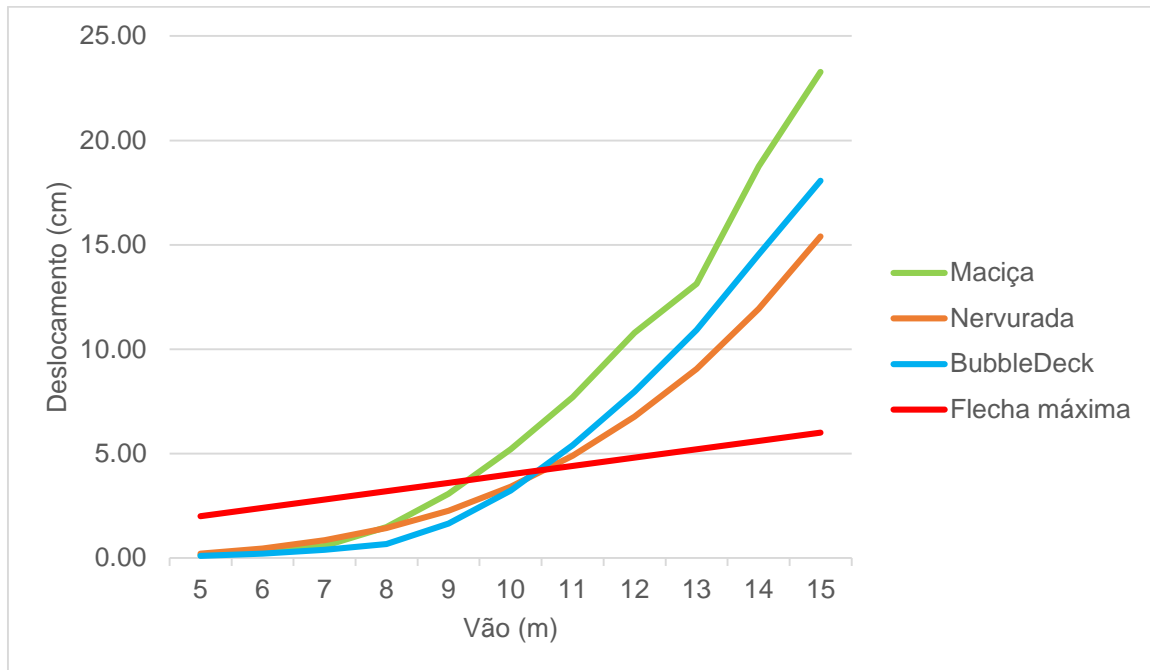
Fonte: Autor (2019)

A laje maciça manteve o seu deslocamento elástico abaixo do deslocamento máximo até o vão de 9 metros. Já as lajes nervurada e BubbleDeck mantiveram a flecha abaixo do valor máximo até o vão de 10 metros. Ainda seria possível aplicar a contraflecha nas lajes que ultrapassaram o limite de deslocamento máximo para diminuir a flecha.

Para melhor visualizar os resultados obtidos com o cálculo dos deslocamentos (sem considerar a contraflecha), foi feito o Gráfico 3:



Gráfico 3 – Deslocamento de acordo com o vão



Fonte: Autor (2019)

É possível observar que, para os vãos de até 10 metros, a laje BubbleDeck foi a que apresentou o menor valor de deslocamento. A partir daí, a laje nervurada teve as menores flechas entre os três tipos de laje. É interessante observar que esse comportamento é o esperado de acordo com as recomendações do fabricante para vãos de 6 a 10 metros. Dessa forma, seria necessário aumentar a altura da laje para 28 centímetros, recomendada para vãos de 8 a 11 metros.

Isso ficou evidente ao realizar o cálculo da flecha para os vãos de 10 a 13 metros com a laje BubbleDeck de 28 centímetros de altura:

**Tabela 21 – Flechas das lajes BubbleDeck com 28 cm de altura**

Laje (28cm)	Flecha (cm)	Flecha limite (cm)
10x10	1.43	4.00
11x11	2.69	4.4
12x12	4.42	4.80
13x13	6.59	5.2

Fonte: Autor (2019)

Quanto aos esforços de cisalhamento, foram obtidos os seguintes resultados:

**Tabela 22 – Cisalhamento lajes maciças isoladas**

Laje	Vsd (tf/m)	Vrd1 (tf/m)	Vrd2 (tf/m)
5x5	2.62	12.70	99.28
6x6	3.14	12.70	99.28
7x7	3.75	12.93	99.28
8x8	4.93	13.10	99.28
9x9	6.28	13.37	99.28
10x10	7.77	13.61	99.28
11x11	9.43	13.38	99.28
12x12	11.23	14.16	99.28
13x13	13.19	14.56	99.28
14x14	15.30	14.91	99.28
15x15	17.57	15.66	99.28

Fonte: Autor (2019)

As lajes maciças apresentaram boa resistência ao cisalhamento em todos os vãos, portanto não houve necessidade de armadura específica para esforços cortantes.

**Tabela 23 – Cisalhamento lajes nervuradas isoladas**

Laje	Vsd (tf/m)	Vrd1 (tf/m)	Vrd2 (tf/m)
5x5	1.23	2.25	18.39
6x6	1.44	2.35	18.39
7x7	1.65	2.33	18.39
8x8	2.01	2.51	18.39
9x9	2.18	2.66	18.39
10x10	2.39	3.38	18.39
11x11	2.60	2.90	18.39
12x12	2.95	3.09	18.39
13x13	3.13	3.18	18.39
14x14	3.33	3.38	18.39
15x15	3.67	3.56	18.39

Fonte: Autor (2019)

As lajes nervuradas tiveram boa resistência aos esforços cortantes até o vão de 14 metros. No entanto, a laje com vão de 15 metros necessitaria de armadura específica para esforços de cisalhamento.

**Tabela 24 – Cisalhamento lajes BubbleDeck isoladas**

Laje	Vsd (tf/m)	Vrd1 (tf/m)	Vrd2 (tf/m)
5x5	2.06	7.64	59.87
6x6	2.46	7.64	59.87
7x7	2.94	7.70	59.87
8x8	3.86	7.76	59.87
9x9	4.92	7.88	59.87
10x10	6.09	7.88	59.87
11x11	7.39	8.17	59.87
12x12	8.80	8.26	59.87
13x13	10.33	8.51	59.87
14x14	11.98	8.62	59.87
15x15	13.75	8.89	59.87

Fonte: Autor (2019)

Por fim, as lajes BubbleDeck tiveram os esforços resistentes multiplicados pelo fator de 0,6, como recomendado pelo fabricante. Isso fez com que, a partir do vão de 11 metros, os esforços solicitantes fossem maiores que os resistidos pelas lajes. Dessa forma, seria necessário empregar armadura específica para o cisalhamento.

## 5 CONCLUSÃO

Ao analisar o desempenho de um sistema estrutural, não se deve levar em conta apenas o dimensionamento no estado limite último, mas também o comportamento da construção no estado limite de serviço.

No caso do dimensionamento do pavimento tipo em questão, todos os sistemas construtivos estudados tiveram bom desempenho, com áreas de aço dentro dos limites máximos e mínimos estabelecidos pela norma, bem como deslocamentos e esforços de cisalhamentos dentro dos valores aceitáveis.

Contudo, o sistema que apresentou maiores benefícios em questão de economia de material foi o BubbleDeck, com redução de peso de aço de 2,30% em relação à laje nervurada e de 11,32% em relação à laje maciça. Mesmo com um consumo de aço mais elevado que o da laje BubbleDeck, o peso total do pavimento tipo com a laje nervurada foi o menor das três soluções.

Em relação aos deslocamentos, a laje BubbleDeck apresentou melhor comportamento nas 14 lajes do pavimento tipo. Ainda assim, o valor da flecha das outras soluções também ficou dentro do limite aceitável pela norma, com exceção da laje 6.

Na verificação ao cisalhamento, todas as lajes tiveram bom desempenho e não houve necessidade de armadura específica para esse esforço.

É importante ressaltar que esses resultados poderiam ser diferentes para outros casos, que dependem dos tamanhos dos vãos, dos carregamentos nas lajes e das espessuras das mesmas.

Na análise de desempenho dos três sistemas estruturais com vãos crescentes, fica evidente que as lajes BubbleDeck seguiram o aquilo que é recomendado pelo fabricante, e os vãos acima de 10 metros ultrapassaram os limites de deslocamento estabelecidos pela NBR 6118:2014.

Até o vão de 10 metros, a laje BubbleDeck foi a que apresentou menores taxas de armadura e menores deslocamentos, com exceção à laje nervurada que teve a menor taxa de armadura nos vãos de 5 e 6 metros. Além disso, as lajes BubbleDeck com vão maior ou igual a 11 metros tiveram esforços solicitantes de cisalhamento

maiores que os resistentes. Portanto, foi confirmada a recomendação do fabricante quanto à espessura da laje e o vão das lajes.

Para trabalhos futuros, sugere-se analisar e dimensionar esses três sistemas construtivos com diferentes alturas, assim como dimensionar as lajes nervuradas com outros tamanhos de cubeta, analisando o dimensionamento desse sistema a partir dessa mudança.

Ainda, vê-se interesse no dimensionamento das lajes sem a utilização de vigas, verificando o comportamento destas quando submetidas à esforços de punção.

## REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro. 1980.

ARAÚJO, J. M. DE. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Duna, 2014. v. 1

ARAÚJO, J. M. DE. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Duna, 2014. v. 4

ATEX. **Formas para laje nervurada**. 2019. Disponível em: <<http://www.atex.com.br/pt/formas/laje-nervurada/>>. Acesso em 22 de março de 2019.

BITTENCOURT, T. N. **Exemplo de um Projeto Completo de um Edifício de Concreto Armado**. p. 37, 2001.

BUBBLEDECK INTERNATIONAL. 2018. Disponível em: <<http://www.bubbledeck.com/>>. Acesso em: 15 de agosto de 2018.

CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. B. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 2. ed. Pini, 2013. v. 2

FERNANDES, G. B. **Solicitações normais - cálculo no estado limite último**. São Paulo, 2006. (Apostila). Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/ec702/APOSTILA-EC702-v2006.pdf>>. Acesso em: 20 de setembro de 2018.

FREIRE, T. C. **Estudo Comparativo Para Lajes Cogumelo Utilizando As Tecnologias “Bubbledeck” E Atex**. p. 1–52, 2009.

LAI, T. **Structural Behavior of BubbleDeck Slabs And Their Application to Lightweight Bridge Decks**. 2009. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/4425176.pdf>>. Acesso em: 15 de abril de 2019.

LIMA, J. S. **Métodos Simplificados Para a Verificação**. p. 1–22, 2007.  
MOURA, W. M.; MARCELLINO, M. A. Avaliação da deformação em lajes bidirecionais de concreto armado. **V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**, n. 1, 12 p., 2003.

MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. Lajes maciças – capítulo 11. 2010. (Apostila). Disponível em: <[http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Lajes/Lajes\\_Macicas\\_EESC.pdf](http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Lajes/Lajes_Macicas_EESC.pdf)>.

Acesso em: 20 de setembro de 2018

RABELLO, F. T. **Estudo de lajes lisas de concreto com visão integrada e flexão e punção**. 2016.

SILVA, J.; CAMPI, B.; RAMIREZ, B. Estudo comparativo entre BubbleDeck e painel treliçado. **Congresso Brasileiro de Concreto**, v. 58, 13 p., 2016.

SILVA, M. A. F. da; Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado. 2005.

SILVA, M. A. F. DA; FILHO, J. R. D. F.; CARVALHO, R. C. A utilização da analogia de grelha para análise de pavimentos de edifícios em concreto armado. **V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**, n. 1, p. 16, 2003.

SILVA, Y. M. DE O. Estudo Comparativo Entre Lajes “Bubbledeck” E Lajes Lisas. p. 62, 2011.

USP. Exemplo de um projeto completo de edifício de concreto armado. São Paulo, 2001. (Apostila).

WERNER, B. V.; VARGAS, A. Análise comparativa entre diferentes métodos de cálculo para o dimensionamento de lajes maciças bidirecionais. **Revista Iniciação Científica**, v. 11, n. 1, p. 26, 2013.

## **ANEXOS**



ANEXO A – VALORES DE  $\alpha$ 

Tabela 2.5a									
FLECHAS EM LAJES COM CARGA UNIFORME – VALORES DE $\alpha$									
$\lambda = \frac{\ell_y}{\ell_x}$	Tipo de Laje								
	1	2A	2B	3	4A	4B	5A	5B	6
1,00	4,76	3,26	3,26	2,46	2,25	2,25	1,84	1,84	1,49
1,05	5,26	3,68	3,48	2,72	2,60	2,35	2,08	1,96	1,63
1,10	5,74	4,11	3,70	2,96	2,97	2,45	2,31	2,08	1,77
1,15	6,20	4,55	3,89	3,18	3,35	2,53	2,54	2,18	1,90
1,20	6,64	5,00	4,09	3,40	3,74	2,61	2,77	2,28	2,02
1,25	7,08	5,44	4,26	3,61	4,14	2,68	3,00	2,37	2,14
1,30	7,49	5,88	4,43	3,80	4,56	2,74	3,22	2,46	2,24
1,35	7,90	6,32	4,58	3,99	5,01	2,77	3,42	2,53	2,34
1,40	8,29	6,74	4,73	4,15	5,41	2,80	3,62	2,61	2,41
1,45	8,67	7,15	4,87	4,31	5,83	2,85	3,80	2,67	2,49
1,50	9,03	7,55	5,01	4,46	6,25	2,89	3,98	2,73	2,56
1,55	9,39	7,95	5,09	4,61	6,66	2,91	4,14	2,78	2,62
1,60	9,71	8,32	5,18	4,73	7,06	2,92	4,30	2,82	2,68
1,65	10,04	8,68	5,22	4,86	7,46	2,92	4,45	2,83	2,73
1,70	10,34	9,03	5,26	4,97	7,84	2,93	4,59	2,84	2,77
1,75	10,62	9,36	5,36	5,06	8,21	2,93	4,71	2,86	2,81
1,80	10,91	9,69	5,46	5,16	8,58	2,94	4,84	2,88	2,85
1,85	11,16	10,00	5,53	5,25	8,93	2,94	4,96	2,90	2,88
1,90	11,41	10,29	5,60	5,33	9,25	2,95	5,07	2,92	2,90
1,95	11,65	10,58	5,68	5,41	9,58	2,95	5,17	2,94	2,93
2,00	11,89	10,87	5,76	5,49	9,90	2,96	5,28	2,96	2,96
$\infty$	15,63	15,63	6,50	6,50	15,63	3,13	6,50	3,13	3,13

Valores extraídos de BARES (1972) e adaptados por L.M. Pinheiro.

$$a_i = \frac{\alpha}{100} \cdot \frac{b}{12} \cdot \frac{p}{E_c} \cdot \frac{\ell_x^4}{I}$$

b = largura da seção       $\ell_x$  = menor vão       $E_c$  = módulo de elasticidade  
p = carga uniforme       $\ell_y$  = maior vão      I = momento de inércia