

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DAS CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**FABIANA TESSARI**

**ANÁLISE ENTRE O SISTEMA DE LAJE *BUBBLEDECK* E LAJE NERVURADA EM  
UM EDIFÍCIO COM GRANDES VÃOS, COMPARANDO ASPECTOS TÉCNICOS E  
DE CUSTOS**

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**FABIANA TESSARI**

**ANÁLISE ENTRE O SISTEMA DE LAJE *BUBBLEDECK* E LAJE NERVURADA EM  
UM EDIFÍCIO COM GRANDES VÃOS, COMPARANDO ASPECTOS TÉCNICOS E  
DE CUSTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso II desenvolvido no curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Luciano Zatti

**CAXIAS DO SUL**

**2019**

**FABIANA TESSARI**

**ANÁLISE ENTRE O SISTEMA DE LAJE *BUBBLEDECK* E LAJE NERVURADA EM  
UM EDIFÍCIO COM GRANDES VÃOS, COMPARANDO ASPECTOS TÉCNICOS E  
DE CUSTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso II desenvolvido no curso de Engenharia Civil da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Aprovado (a) em 29/06/2019**

**Banca Examinadora**

---

Prof. Me. Luciano Zatti

Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Me. Gustavo Ribeiro da Silva

Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof.<sup>a</sup> Ma. Bianca Funk Weimer

Centro Universitário Ritter dos Reis - UNIRITTER

## RESUMO

A construção civil está sempre em busca de tecnologias que proporcionem soluções construtivas mais eficientes, com melhor custo benefício, maior durabilidade e praticidade, assim como menor tempo de execução, priorizando sempre a segurança e o conforto dos usuários. Além disso, o cuidado em fazer uso de materiais sustentáveis está cada dia mais presente no âmbito. Nesse contexto, surge o sistema construtivo de lajes *Bubbledeck*, caracterizada por ser uma tecnologia que utiliza esferas de material plástico reciclado, uniformemente distribuídas nas lajes, para criar espaços vazios na zona tracionada do concreto. Nesse trabalho são apresentadas informações sobre concreto armado e suas estruturas, bem como características, comportamento e parâmetros de dimensionamento dos sistemas de lajes *Bubbledeck* e nervurada. Também, é apresentado um estudo de caso comparando o dimensionamento de dois modelos de um edifício garagem localizado na cidade de Caxias do Sul/RS. Para um modelo utilizou-se o sistema de laje nervurada e para o outro modelo, o sistema de laje *Bubbledeck*, ambos dimensionados a partir do *Software Eberick*. O estudo tem como principal objetivo realizar uma análise técnica e de custos, comparando a redução do carregamento total, a seção dos pilares, o pé direito dos pavimentos, assim como a quantidade e os custos de concreto, aço, fôrmas, cubetas e esferas plásticas entre os dois modelos. Para isso, foi realizada a determinação dos parâmetros de projeto, o pré-dimensionamento, dimensionamento e otimização do Modelo Nervurada e do Modelo *Bubbledeck*. Com os resultados obtidos e uma análise entre os critérios realizada, foi possível concluir que o Modelo *Bubbledeck* se apresentou mais econômico em aspectos de custos, exibiu redução no carregamento total da estrutura e nas seções dos pilares, que proporcionam maior aproveitamento de espaço útil, assim como diminuição da quantidade de concreto e aço. Entretanto, esse modelo também apresentou maior consumo de fôrmas e uma pequena redução no pé direito da edificação. Isso posto, constata-se que o uso de lajes *Bubbledeck* em edifícios semelhantes ao utilizado para o dimensionamento dos modelos em questão pode trazer benefícios à construção civil.

**Palavras-chave:** Lajes *Bubbledeck*. Lajes Nervurada. Concreto armado. Tecnologia. Comparativo.

## ABSTRACT

The construction industry is always searching for new technologies that provide more efficient constructive solutions, with a better cost-effectiveness, bigger durability and practicality, as well as less time of execution, prioritizing safety and comfort for the users. Therewithal, the use of sustainable materials is daily increasingly in this field. In this context, the Bubbledeck slab system was developed, characterized by a technology that uses recycled plastic spheres evenly distributed within slab, with the propose to create void spaces in the traction zone of the concrete. This paper introduces information about reinforced concrete and structures, such as characteristics, behavior and desing parameters of the Bubbledeck and ribbed slabs systems. It also presents a case study comparing the design of two models of a garage building located in the city of Caxias do Sul/RS. For one model the ribbed slab system and for the other model, the Bubbledeck slab system was used, both sized from the Eberick Software. The main objective of this study is performing a technical and costs analysis, comparing the reduction of the total load, the sections of the pillars, the ceiling height and the quantity and costs of concrete, steel and formwork between the two models analyzed. For this, was performed the determination of the design parameters, the pre-dimensioning, dimensioning and optimization of the Ribbed Model and the Bubbledeck Model. With the results and an analysis among the parameters performed, it was possible to conclude that the Bubbledeck Model was more economical in aspects of total costs. It also showed reduction in the total load of the structure and in the sections of the columns, which provide greater use of space, as a decrease in the amount of concrete and steel. However, this model also presented higher consumption of forms and a small reduction in the ceiling height of the building. That said, it is verified that the use of Bubbledeck slabs in buildings similar to the one used for the sizing of the models analyzed can bring benefits to the civil construction.

**Keywords:** Bubbledeck Slab. Ribbed Slab. Reinforced concrete. Technology. Comparative.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Laje cogumelo.....	23
Figura 2 - Laje lisa.....	23
Figura 3 - Laje nervurada .....	30
Figura 4 - Laje nervurada moldada in loco dupla.....	33
Figura 5 - Laje nervurada moldada in loco invertida .....	33
Figura 6 - Laje nervurada moldada in loco direta .....	33
Figura 7 - Laje nervurada pré-fabricada com vigota tipo trilha e vigota treliçada.....	34
Figura 8 - Laje nervurada em painel treliçado e painel protendido.....	34
Figura 9 - Vão efetivo.....	36
Figura 10 - Dimensões das lajes nervuradas .....	37
Figura 11 - Laje Bubbledeck .....	41
Figura 12 - Pré-laje (vista lateral).....	44
Figura 13 - Pré-laje (vista 3D).....	44
Figura 14 - Módulo reforçado (vista lateral) .....	44
Figura 15 - Módulo reforçado (vista 3D) .....	44
Figura 16 - Painel acabado (vista lateral) .....	45
Figura 17 - Painel acabado (vista 3D) .....	45
Figura 18 - Pórtico 3D - Modelo Nervurada .....	58
Figura 19 - Carregamento total dos pilares (tf) - Modelo Nervurada.....	59
Figura 20 - Localização pilares P12 e P20 .....	59
Figura 21 - Seção dos pilares (cm <sup>2</sup> ) - Modelo Nervurada .....	60
Figura 22 - Pé direito - Modelo Nervurada .....	60
Figura 23 - Especificações de dimensões das cubetas.....	62
Figura 24 - Pórtico 3D - Modelo Bubbledeck.....	63
Figura 25 - Carregamento total dos pilares (tf) - Modelo Bubbledeck .....	64
Figura 26 - Seção dos pilares (cm <sup>2</sup> ) - Modelo Bubbledeck.....	65
Figura 27 - Pé direito - Modelo Bubbledeck .....	65
Figura 28 - Análise comparativa dos carregamentos totais dos pilares (tf).....	68
Figura 29 - Análise comparativa das seções dos pilares (cm <sup>2</sup> ).....	69
Figura 30 - Porcentagem de redução das seções dos pilares do Modelo Nervurada para o Modelo Bubbledeck .....	70

Figura 31 - Seção do pilar P12 no Modelo Nervurada e Modelo Bubbledeck.....	71
Figura 32 - Pé direito Modelo Nervurada.....	71
Figura 33 - Pé direito Modelo Bubbledeck .....	71
Figura 34 - Análise comparativa do volume de concreto (m <sup>3</sup> ).....	72
Figura 35 - Análise comparativa do peso de aço + 10 % (kg) .....	73
Figura 36 - Análise comparativa da área de fôrmas (m <sup>2</sup> ) .....	74
Figura 37 - Custo de insumos - Modelo Nervurada .....	75
Figura 38 - Custo de Insumos - Modelo Bubbledeck.....	75
Figura 39 - Custo total de insumos.....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de resistência de concretos estruturais.....	21
Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto .....	26
Tabela 3 - Correspondência entre a CAA e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm.....	26
Tabela 4 - Especificações técnicas .....	46
Tabela 5 - Vãos usuais e carga permanente equivalente .....	46
Tabela 6 - Cobrimento nominal dos elementos .....	52
Tabela 7 - Parâmetros de concreto e aço .....	52
Tabela 8 - Parâmetros do vento .....	53
Tabela 9 - Pesos específicos .....	53
Tabela 10 - Cargas acidentais.....	54
Tabela 11 - Quantitativo de materiais – Modelo Nervurada .....	61
Tabela 12 - Quantitativo de cubetas .....	61
Tabela 13 - Dimensões da cubeta B40/80/80 .....	61
Tabela 14 - Custos totais de insumos - Modelo Nervurada.....	62
Tabela 15 - Quantitativo de materiais.....	66
Tabela 16 - Quantitativo de esferas .....	66
Tabela 17 - Custos totais de insumos - Modelo Bubbledeck .....	67
Tabela 18 - Orçamento por insumo .....	74



## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Classe de agressividade ambiental (CAA) .....	25
--	----

## LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAA	Classe de Agressividade Ambiental
CA	Concreto Armado
cm	Centímetro
cm <sup>2</sup>	Centímetro quadrado
CP	Concreto Protendido
CUB	Custo Unitário Básico
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão para Normatização)
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
EPS	<i>Expanded PolyStyrene</i>
kg	Quilograma
kN	Quilo Newton
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a1$	menor valor entre $t1/2$ e $0,3hf$
$a2$	menor valor entre $t2/2$ e $0,3hf$
$\beta$	coeficiente de majoração da força normal
$a/c$	relação água cimento
$A$	área de influência do pilar
$Ac$	área de concreto da seção transversal
$bf$	largura da mesa
$c$	carga por unidade de área
$b_w$	espessura das nervuras
$f_c$	resistência à compressão do concreto
$f_{ck}$	resistência característica à compressão do concreto
$h_l$	altura da laje nervurada
$h_v$	altura da viga
$h_f$	espessura da mesa
$L$	comprimento do vão
$l_o$	distância entre as faces das nervuras
$l_{ef}$	vão efetivo
$n$	número de pavimentos acima do nível analisado
$N$	carga do pilar
$N_d$	carga de cálculo atuante no pilar
$S1$	fator topográfico
$S2$	fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno

$S3$	fator estatístico
$t1$	espessura da nervura lateral;
$t2$	espessura da nervura lateral oposta;
$Vd$	força cortante
$v_0$	velocidade básica do vento
$\Delta c$	tolerância de execução para o cobrimento
$\gamma_c$	coeficiente de ponderação da resistência do concreto
$\gamma_f$	coeficiente de ponderação das ações
$\gamma_{f1}$	parte de $\gamma_f$ que considera a variabilidade das ações
$\gamma_{f2}$	parte de $\gamma_f$ , que considera a simultaneidade de atuação das ações
$\gamma_{f3}$	parte de $\gamma_f$ , que considera os desvios gerados nas construções e as aproximações feitas em projeto do ponto de vista das solicitações
$\gamma_m$	coeficiente de ponderação das resistências
$\gamma_{m1}$	parte de $\gamma_m$ , que considera a variabilidade da resistência dos materiais envolvidos
$\gamma_{m2}$	parte de $\gamma_m$ , que considera a diferença entre a resistência do material no corpo de prova e na estrutura
$\gamma_{m3}$	parte de $\gamma_m$ , que considera os desvios gerados na construção e as aproximações feitas em projeto do ponto de vista das resistências
$\gamma_p$	coeficiente de ponderação das cargas oriundas da protensão
$\gamma_s$	coeficiente de ponderação da resistência do aço

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	QUESTÃO DE PESQUISA.....	17
1.2	OBJETIVO PRINCIPAL.....	17
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>17</b>
1.3	HIPÓTESE .....	18
1.4	PREMISSAS / DELIMITAÇÕES .....	18
1.5	LIMITAÇÕES .....	18
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>20</b>
2.1	CONCRETO ARMADO .....	20
<b>2.1.1</b>	<b>Materiais constituintes .....</b>	<b>20</b>
2.1.1.1	Concreto simples .....	20
2.1.1.2	Aço.....	21
<b>2.1.2</b>	<b>Fôrmas e Cimbramentos.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Elementos estruturais.....</b>	<b>22</b>
2.1.3.1	Lajes.....	23
2.1.3.2	Vigas .....	23
2.1.3.3	Pilares .....	24
2.1.3.4	Fundação.....	24
<b>2.1.4</b>	<b>Especificações normativas.....</b>	<b>24</b>
2.1.4.1	Valores limites .....	24
2.1.4.2	Durabilidade .....	24
2.1.4.3	Ações .....	27
2.1.4.3.1	<i>Ações Permanentes.....</i>	<i>27</i>
2.1.4.3.2	<i>Ações Variáveis .....</i>	<i>27</i>
2.1.4.3.3	<i>Ações Excepcionais .....</i>	<i>28</i>
2.1.4.4	Coeficientes de ponderação .....	28
2.1.4.5	Carregamentos .....	29
2.1.4.6	Estados limites.....	29
2.2	LAJES NERVURADAS.....	30

<b>2.2.1</b>	<b>Conceito .....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Histórico.....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Características.....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Sistemas construtivos .....</b>	<b>33</b>
2.2.4.1	Laje moldada <i>in loco</i> .....	33
2.2.4.2	Laje com nervura pré-moldada .....	34
2.2.4.3	Laje nervurada unidirecional .....	35
2.2.4.4	Laje nervurada bidirecional .....	35
<b>2.2.5</b>	<b>Dimensionamento .....</b>	<b>35</b>
2.2.5.1	Vinculação .....	35
2.2.5.2	Vão efetivo.....	36
2.2.5.3	Especificações normativas.....	37
2.2.5.4	Ações e esforços solicitantes .....	38
2.2.5.5	Estado limite último.....	38
2.2.5.5.1	<i>Verificação de flexão nas nervuras</i> .....	38
2.2.5.5.2	<i>Verificação de cisalhamento nas nervuras</i> .....	39
2.2.5.5.3	<i>Verificação de flexão na mesa</i> .....	39
2.2.5.5.4	<i>Verificação de cisalhamento na mesa</i> .....	40
2.2.5.5.5	<i>Verificação de cisalhamento na ligação mesa-nervura com mesa comprimida</i> ...	40
2.2.5.6	Estado limite de serviço.....	40
2.3	LAJES BUBBLEDECK .....	41
<b>2.3.1</b>	<b>Conceito .....</b>	<b>41</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Histórico.....</b>	<b>42</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Características.....</b>	<b>42</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Sistemas Construtivos .....</b>	<b>43</b>
2.3.4.1	Pré lajes.....	43
2.3.4.2	Módulo reforçado .....	44
2.3.4.3	Painéis acabados .....	45
<b>2.3.5</b>	<b>Dimensionamento .....</b>	<b>45</b>
2.3.5.1	Vão.....	45
2.3.5.2	Pré-dimensionamento .....	46
2.3.5.3	Especificações normativas.....	47
<b>2.3.6</b>	<b>Testes com Lajes <i>Bubbledeck</i> .....</b>	<b>47</b>
<b>2.3.7</b>	<b>Punção.....</b>	<b>48</b>

2.4	ORÇAMENTAÇÃO .....	48
2.4.1	<b>Identificação e levantamento de quantidades .....</b>	<b>48</b>
2.4.2	<b>Orçamento Paramétrico.....</b>	<b>49</b>
2.4.3	<b>Orçamento pela NBR 12721 .....</b>	<b>49</b>
2.4.4	<b>Orçamento Discriminado.....</b>	<b>49</b>
3	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>51</b>
3.1	MODELOS .....	51
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO .....	51
3.2.1	<b>Caracterização do edifício.....</b>	<b>51</b>
3.2.2	<b>Parâmetros de projeto.....</b>	<b>52</b>
3.2.3	<b>Carregamentos.....</b>	<b>53</b>
3.3	SOFTWARE.....	54
3.4	DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA.....	54
3.4.1	<b>Pré-dimensionamento.....</b>	<b>54</b>
3.4.1.1	Lajes.....	54
3.4.1.2	Vigas .....	55
3.4.1.3	Pilares .....	55
3.4.2	<b>Dimensionamento dos modelos.....</b>	<b>56</b>
3.5	ORÇAMENTAÇÃO .....	57
3.6	APRECIÇÃO DOS RESULTADOS .....	57
4	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>58</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	58
4.2	MODELO NERVURADA .....	58
4.2.1	<b>Carregamentos totais dos pilares .....</b>	<b>58</b>
4.2.2	<b>Seções dos pilares.....</b>	<b>59</b>
4.2.3	<b>Pé direito.....</b>	<b>60</b>
4.2.4	<b>Quantitativos.....</b>	<b>61</b>
4.2.5	<b>Orçamentação .....</b>	<b>62</b>
4.3	MODELO BUBBLEDECK.....	63
4.3.1	<b>Carregamentos totais dos pilares .....</b>	<b>64</b>
4.3.2	<b>Seções dos pilares.....</b>	<b>64</b>
4.3.3	<b>Pé direito.....</b>	<b>65</b>
4.3.4	<b>Quantitativos.....</b>	<b>66</b>

<b>4.3.5</b>	<b>Orçamentação .....</b>	<b>66</b>
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>68</b>
5.1	CARREGAMENTOS TOTAIS DOS PILARES .....	68
5.2	SEÇÕES DOS PILARES.....	69
5.3	PÉ DIREITO .....	71
5.4	QUANTITATIVOS .....	72
5.5	ORÇAMENTAÇÃO .....	74
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE A – PLANTA BAIXA ARQUITETÔNICA.....</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE B – PLANTA DE FÔRMAS MODELO NERVURADA.....</b>	<b>85</b>
	<b>APÊNDICE C – PLANTA DE FÔRMAS MODELO <i>BUBBLEDECK</i>.....</b>	<b>87</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O componente predominantemente utilizado na construção civil é o concreto, que recebe denominação de concreto estrutural quando utilizado como um material estrutural. Ainda, é classificado como concreto armado quando recebe armaduras, onde ambos os materiais, concreto e aço, passam a trabalhar solidariamente, sendo utilizado na maioria dos elementos estruturais, como em lajes, vigas, pilares e fundações. É um material que possui grande facilidade de execução, acesso descomplicado aos componentes e desempenha um ótimo comportamento estrutural perante às ações exercidas em uma edificação (COUTO et al., 2013).

O atual mercado da construção civil exige cada vez mais estruturas com vãos maiores entre pilares, mais esbeltas e mais econômicas, que proporcionem liberdade de *layout*, assim como a maior utilização dos espaços úteis da edificação, como por exemplo estacionamentos, salas comerciais e escritórios. De acordo com Guedes e Andrade (2015), as espessuras de lajes de concreto armado são determinadas em função do vão a ser atendido, portanto, para lajes com elevados vãos, são exigidas espessuras bastante grandes, o que torna a solução não funcional e não econômica devido ao peso próprio da estrutura.

As inovações tecnológicas surgem com a finalidade de proporcionar e criar novas soluções capazes de atender melhor aos usuários em aspectos técnicos e de custos, como por exemplo proporcionando grandes vãos livres. Na construção civil, cada vez mais, faz-se busca por resultados que proporcionam a execução de estruturas mais leves, com menor quantidade de materiais, assim como menor tempo de execução.

Uma solução para essas estruturas é o uso de lajes com comportamento similar ao de lajes maciças, com o peso próprio reduzido devido a redução do concreto na zona tracionada, já que a capacidade de resistir aos esforços de tração do concreto é desprezada no dimensionamento estrutural. É então apresentado o sistema de lajes nervuradas, que vem sendo utilizada na construção civil há algum tempo e possui características de funcionamento como acima mencionado.

Em virtude desse avanço tecnológico no âmbito da engenharia civil, surgem soluções cada vez mais diferenciadas, buscando maior eficiência. Como alternativa, o sistema de lajes *Bubbledeck* foi criado, baseado na criação de espaços vazios nas lajes, substituindo uma parte do concreto que não desempenha função estrutural por esferas plásticas recicladas. Segundo Parcianello (2014), o sistema de lajes *Bubbledeck* trata-se de um método de construção que

insere esferas plásticas igualmente distribuídas entre telas de aço, eliminando parte do volume de concreto que não exerce resistência ao elemento, proporcionando redução do peso próprio da estrutura e redução de espessuras de lajes para o aumento de vão livre entre os pilares.

Esse trabalho aborda a utilização de estruturas em concreto armado com sistemas de lajes *BubbleDeck* e sistemas de lajes nervuradas. Também realiza uma análise comparativa no âmbito técnico e de custos entre os dois sistemas de lajes em um edifício garagem com grandes vãos livres.

## 1.1 *QUESTÃO DE PESQUISA*

A utilização do sistema construtivo de lajes *BubbleDeck* pode trazer benefícios técnicos e de custos na concepção de projetos em concreto armado quando comparado com o sistema de lajes nervuradas?

## 1.2 *OBJETIVO PRINCIPAL*

O objetivo principal desse trabalho é realizar uma análise técnica e de custos entre o sistema construtivo de lajes nervuradas e o sistema construtivo de lajes *BubbleDeck* na elaboração do projeto de um edifício garagem de oito pavimentos em concreto armado, onde se faz necessário a obtenção de grandes vãos livres.

### 1.2.1 **Objetivos específicos**

- a) projetar um edifício garagem com o sistema de lajes nervuradas utilizando o *Software Eberick*;
- b) projetar o mesmo edifício garagem com o sistema de lajes *BubbleDeck* também com a utilização do *Software Eberick*;
- c) verificar a diferença entre carregamentos totais na estrutura projetada pelos dois sistemas de lajes;
- d) realizar uma análise comparativa das seções dos pilares e o pé direito obtido;
- e) analisar quantitativamente os custos de concreto, aço, fôrmas, cubetas e esferas plásticas de ambas as obras e compará-los.

### 1.3 HIPÓTESE

Implementar o uso do sistema de lajes *BubbleDeck* em edifícios de concreto armado que necessitem de grandes vãos traz maiores vantagens relativas aos custos, provenientes da redução da quantidade de materiais devido a diminuição dos carregamentos da estrutura e seção de pilares, assim como a obtenção maior pé direito.

### 1.4 PREMISSAS / DELIMITAÇÕES

Como premissa tem-se o uso de lajes nervuradas do tipo bidirecional moldada *in loco*, sem material inerte para o dimensionamento da estrutura. Na análise comparativa será realizado o uso do mesmo valor de  $f_{ck}$  para o dimensionamento de ambos os sistemas de lajes.

### 1.5 LIMITAÇÕES

Nesse trabalho, foram realizadas algumas aproximações para a realização do lançamento da estrutura com o sistema de lajes *BubbleDeck* durante o cálculo no *Software Eberick*. Não se efetuou estudos tratando-se de edifícios com pequenos vãos, bem como comparação com outras tipologias de lajes. Elementos estruturais específicos como rampas, escadas e fundações não foram abordados.

A falta de material normativo referente ao uso de lajes do tipo *BubbleDeck* é vista como uma limitação. Parte do material utilizado como referência para a elaboração desse trabalho, quando relativo a esse sistema de lajes, foi disponibilizado pelo fabricante.

### 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O segundo capítulo aborda a fundamentação teórica, onde a revisão bibliográfica sobre estruturas de concreto armado, lajes nervuradas e lajes *Bubbledeck* é apresentada. São citados os fundamentos básicos para compreensão sobre dimensionamento estrutural em concreto armado, assim como as principais características, histórico, tipologia e especificações técnicas sobre dimensionamento de ambos sistemas de lajes. As principais formas de orçamentação e seus mecanismos são apresentados, de forma a fundamentar a análise comparativa das quantidades e custos de concreto, aço e fôrmas para cada um dos sistemas.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia empregada para o dimensionamento dos modelos e posterior análise comparativa. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos a

partir do dimensionamento dos modelos propostos, assim como o quinto apresenta a análise desses resultados. Por fim, o sexto capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir das análises comparativas e fundamentação teórica atingida.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CONCRETO ARMADO

Concreto armado é a união entre concreto simples e armaduras de aço. Caracterizado pela alta resistência à compressão, o concreto simples não desempenha um bom nível de resistência à tração. Essa deficiência é contornada com o emprego de armaduras de aço ao longo das peças estruturais, que garantem a segurança da edificação, por tornarem-se dois materiais solidários entre si até o momento de sua ruptura (FUSCO; ONISHI, 2017).

Conforme Fusco (2012), a utilização do concreto armado possui vantagens quando comparado com outros materiais de construção, como a economia nos custos dos insumos, resistência a agressões químicas e físicas do meio ambiente e adaptabilidade a qualquer forma de construção. Ainda, segundo Fusco (2012), essas características dependem da circunstância em que a obra é desenvolvida, assim como o meio em que a mesma se encontra.

Para Araújo (2014a), o concreto armado possui vantagens como a fácil execução da edificação independente da forma do edifício, economia, resistência ao fogo e aos agentes agressivos do meio ambiente e baixa demanda de manutenção. Por outro lado, o mesmo autor descreve que o elevado peso das construções, a dificuldade de reformas ou demolições e a baixa proteção térmica são desvantagens características desse material de construção.

A NBR 6120 estabelece o peso específico do concreto armado em  $25 \text{ kN/m}^3$ , sendo esse valor utilizado para o cálculo do peso próprio da estrutura, assim como para a determinação dos esforços atuantes (ABNT, 1980). Da mesma forma, a NBR 6118 estabelece que se a massa específica real do concreto armado não for conhecida, adota-se esse valor recomendado (ABNT, 2014).

#### 2.1.1 Materiais constituintes

##### 2.1.1.1 Concreto simples

Concreto é um material obtido a partir da mistura de água, agregados inertes e cimento. Em situações onde há a necessidade de melhorar as características do concreto na fase fresca ou endurecida, pode ser acrescentado aditivos químicos capazes de acelerar ou retardar a pega, ou até mesmo melhorar a plasticidade da mistura e adições minerais, com a função de melhorar

a resistência do concreto. Isto posto, o concreto tem a função de absorver os esforços de compressão e proteger as armaduras contra a corrosão (ARAÚJO, 2014a).

Uma qualidade muito específica do concreto, segundo Azeredo (1997), é que devido a reação de hidratação do cimento, com o passar do tempo seu endurecimento continua elevando-se mesmo após ter adquirido a resistência esperada para a mistura, tornando esse material vantajoso para a construção civil. Conforme Lima et al. (2014), o concreto possui como características que o diferencia dos demais materiais, a resistência à água e a grande disponibilidade de seus componentes por um preço acessível.

A NBR 8953 classifica os concretos para fins estruturais em grupo I e grupo II de acordo com suas resistências características à compressão ( $f_{ck}$ ), como apresentado na Tabela 1, e ainda afirma que os concretos com classe de resistência inferior a C20 não são classificados como estruturais (ABNT, 2015).

Tabela 1 - Classes de resistência de concretos estruturais

<b>Classe de resistência Grupo I</b>	<b>Resistência característica à compressão MPa</b>	<b>Classe de resistência Grupo II</b>	<b>Resistência característica à compressão MPa</b>
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 8953:2015.

#### 2.1.1.2 Aço

A associação do concreto simples com o aço para a construção de estruturas em concreto armado só é viável devido ao fato de esses dois materiais possuírem uma boa aderência entre si, seus coeficientes de dilatação térmica possuírem valores semelhantes e alto desempenho de proteção contra corrosão (AZEREDO, 1997).

Segundo Pinheiro, Muzardo e Santos (2003), o limite elástico, a resistência e o alongamento na ruptura são as características mecânicas mais importantes no momento da definição do aço a ser usado nas estruturas de concreto armado. Além disso, deve ser observada

a aderência mecânica entre aço e concreto, que pode ser quantificada através do coeficiente de deformação superficial das barras, com valores mínimos obtidos na NBR 7480 (ABNT, 2007).

Explica Araújo (2014a) que as armaduras utilizadas nas estruturas de concreto armado, com função de absorver os esforços de tração podem ser classificadas em barras ou fios. Ainda de acordo com Araújo (2014a), as armaduras em barra são as produzidas por laminação a quente e que possuem diâmetro maior ou igual a 6,3 mm, já as armaduras em fios são produzidas por trefilação ou laminação a frio, e possuem diâmetros de até 10 mm.

### **2.1.2 Fôrmas e Cimbramentos**

Com exceção das estruturas com grandes vãos e alturas, que exigem projeto, as fôrmas são no geral executadas em obra, na sua maioria de madeira, e devem possuir suas dimensões internas correspondente às dimensões do elemento de concreto armado que está sendo produzido. As fôrmas devem atender as prescrições normativas da NBR 15696 (ABNT, 2009), e além disso possuir resistência satisfatória para suportar o peso do concreto fresco até que ele adquira resistência suficiente para suportar os carregamentos da estrutura. Também, as fôrmas devem ser estanques, evitando vazamento de concreto, produzidas de forma a permitirem fácil retirada e o maior número de utilizações (AZEREDO, 1997).

Giongo (2007) explica que as estruturas moldadas *in loco*, além de fôrmas, necessitam de cimbramento, que pode ser em madeira ou metal, que devem ser projetadas para o máximo de reaproveitamento possível. Os cimbramentos, ou também denominados escoramentos, para Azeredo (1997) possuem a função de manter aprumada a fôrma, trabalhando à compressão para impedir os deslocamentos, assim como manter unida a estrutura de concreto armado e a fôrma, até que o concreto atinja sua resistência de suporte, e ainda seguir as recomendações da NBR 15696 (ABNT, 2009).

### **2.1.3 Elementos estruturais**

O sistema estrutural dos edifícios regulares de concreto armado é constituído por lajes, vigas e pilares, ou a união desses elementos, como as escadas. Os pilares presentes no nível do terreno ou abaixo dele são apoiados em fundações, que distribuem os carregamentos da edificação para o solo. Cada elemento tem uma função, de acordo com os esforços solicitantes, e deve possuir segurança com relação aos Estados Limites Últimos e de Serviço (GIONGO, 2007).

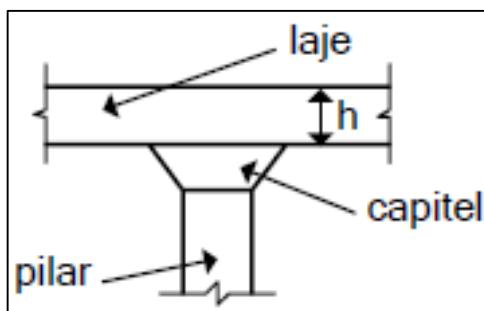
### 2.1.3.1 Lajes

Para Araújo (2014b) as lajes são elementos estruturais capazes de absorver as cargas do uso da edificação que são aplicadas nos pisos e transmiti-las até as vigas, assim como possuem função de distribuir as ações horizontais entre os contraventamentos. Afirma Araújo (2014b) que existem diversos tipos de lajes, como as maciças, nervuradas, cogumelos e pré-moldadas e a escolha entre elas deve levar em consideração questões econômicas e a segurança da edificação.

Também, para Pinheiro, Muzardo e Santos (2004), são elementos planos, onde apresentam duas dimensões muito maiores do que a terceira. Apresenta como principal função receber os carregamentos atuantes naquele pavimento e transferi-los para seus apoios.

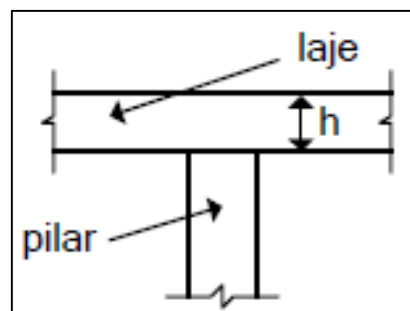
As lajes do tipo cogumelo, conforme apresenta Araújo (2014c), são as que se apoiam diretamente sobre os pilares da estrutura, sem existência de vigas e contendo capitéis, conforme demonstrado na Figura 1. Há ainda as lajes lisas, que além de não possuírem vigas, também não possuem capitéis como apresentado na Figura 2. Consoante as ideias do mesmo autor, a capacidade de resistência dessas lajes é determinada pela punção no entorno dos pilares.

Figura 1 - Laje cogumelo



Fonte: Araújo (2014c).

Figura 2 - Laje lisa



Fonte: Araújo (2014c).

### 2.1.3.2 Vigas

Explicam Pinheiro, Muzardo e Santos (2004), que os elementos denominados vigas se caracterizam por serem barras na posição horizontal, com função de delimitar as dimensões das lajes, suportar o peso das paredes, receber as ações provenientes das lajes ou até mesmo de outras vigas e transmitir todo esse carregamento até seus apoios, usualmente os pilares.



### 2.1.3.3 Pilares

São barras mantidas na posição vertical, com função de receber as ações das vigas ou até mesmo diretamente das lajes, assim como de todos os pavimentos superiores da edificação, e transmitir esses carregamentos para os elementos inferiores ou até a fundação (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2004).

### 2.1.3.4 Fundação

Para Pinheiro, Muzardo e Santos (2004), as fundações tratam-se de elementos que transferem todos os esforços da edificação para o solo, sendo só então esses esforços absorvidos. Consoante as ideias de Araújo (2014c), a escolha do tipo de fundação a ser projetada leva em consideração as características, deformações e resistências do solo em que será distribuído o carregamento do edifício, além de uma escolha adequada para o tipo de superestrutura e carregamentos atuantes. Ainda, afirma Araújo (2014c) que as fundações devem estar em profundidade adequada, ser segura perante as rupturas do solo e atender aos recalques máximos da edificação.

## 2.1.4 Especificações normativas

### 2.1.4.1 Valores limites

A NBR 6118 estabelece valores limites mínimos para as dimensões de todos os elementos estruturais de concreto, com a finalidade de proporcionar um satisfatório desempenho da estrutura, assim como para proporcionar condições de execução apropriadas (ABNT, 2014).

### 2.1.4.2 Durabilidade

Segundo as ideias de Araújo (2014a), um dos aspectos mais relevantes para as estruturas de concreto armado é a durabilidade, devido ao fato de que as exigências normativas para esses aspectos estão cada vez mais rígidas, tanto no projeto quanto na execução. Essas exigências garantem a conservação das principais características da estrutura ao longo de sua vida útil, onde não devem ocorrer medidas extraordinárias de manutenção ou reparo. Portanto, ainda, para o mesmo autor, a vida útil de uma edificação é caracterizada pelo período de tempo em que a estrutura desempenha sua função com excelência sem necessidade de reparos, e o

tempo de vida útil total, é aquele até onde ocorrer a ruptura parcial ou até mesmo total da estrutura.

As ações físicas e químicas que agem sobre as estruturas de concreto armado, sem relação com as ações mecânicas, variações térmicas volumétricas e retrações hidráulicas, caracterizam a classe de agressividade ambiental (CAA) da região onde a edificação será construída. A NBR 6118 determina que a CAA deve ser classificada de acordo com a Quadro 1 (ABNT, 2014).

Quadro 1 - Classe de agressividade ambiental (CAA)

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

a - Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe 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.

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

c - Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, industriais químicas.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118:2014.

Como apresentado pela NBR 6118, caracteriza a relação água/cimento (a/c) e a classe do concreto, de acordo com a classe de agressividade do ambiente em que se encontra a edificação, como apresentado na Tabela 2 (ABNT, 2014).

Ainda, conforme a NBR 6118, a durabilidade das estruturas está diretamente relacionada às características do concreto, como espessura, qualidade e cobrimento da armadura. Os cobrimentos para cada elemento estrutural, de acordo com a classe de agressividade em que a edificação está inserida, são especificados pela Norma de acordo com a Tabela 3 (ABNT, 2014).

Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto

Concreto (a)	Tipo (b)(c)	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação a/c em massa	CA	≤0,65	≤0,60	≤0,55	≤0,45
	CP	≤0,60	≤0,55	≤0,50	≤0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥C20	≥C25	≥C30	≥C40
	CP	≥C25	≥C30	≥C35	≥C40

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

b - CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

c - CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118:2014.

Tabela 3 - Correspondência entre a CAA e o cobrimento nominal para  $\Delta c = 10$  mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV (c)
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje (b)	20	25	35	45
	Viga / Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo (d)	30	30	40	50
Concreto protendido	Laje	25	30	40	50
	Viga / Pilar	30	35	45	55

a - Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

b - Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete a madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências dessa tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitando um cobrimento nominal  $\geq 15$  mm.

c - Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

d - No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45$  mm.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118:2014.

### 2.1.4.3 Ações

Segundo Pinheiro, Muzardo e Santos. (2003), o edifício deve ser projetado de modo a resistir as ações verticais e também às horizontais. Além disso, conforme o mesmo autor, o trajeto das ações verticais se inicia nas lajes, que transmitem para as vigas por meio de reações de apoio, após para os pilares, dos pavimentos superiores até os inferiores, e que por fim são transmitidas ao solo por meio da fundação.

De acordo com a NBR 8681 as ações provocam esforço ou até mesmo deformações nas estruturas e podem ser diretas ou indiretas. As ações diretas são as forças, já as indiretas são as deformações impostas. Essas podem ser classificadas de acordo com sua variabilidade no tempo, em ações permanentes, variáveis e excepcionais (ABNT, 2003). A NBR 6118 explica que as ações devem ser majoradas pelo coeficiente  $\gamma_f$ , cujos valores são estabelecidos por essa Norma, de modo a garantir a segurança da estrutura a ser dimensionada (ABNT, 2014).

#### 2.1.4.3.1 Ações Permanentes

Conforme Pinheiro, Muzardo e Santos. (2003) são ações com valores constantes ou de pouca variação durante toda vida útil da edificação e podem ser divididas em permanentes direta, tratando-se do peso próprio da estrutura e elementos construtivos, peso de equipamentos fixos e ações da terra, ou em permanentes indiretas, referindo-se as ações de recalque dos apoios, retração dos materiais ou protensão.

#### 2.1.4.3.2 Ações Variáveis

As ações variáveis, conforme classifica a NBR 8681, são as cargas acidentais assim como seus efeitos na edificação, como forças de frenação, impactos e centrífugas, vento, variações térmicas, pressões hidrostáticas, hidrodinâmicas e atrito. Ainda, essas ações são classificadas de acordo com a possibilidade de ocorrerem durante a vida útil da edificação, em ações variáveis normal e ações variáveis especiais, onde a primeira tem probabilidade de ocorrer suficiente para ser considerada no projeto, e a segunda ocorre em situações específicas e deve ser definida para cada edificação (ABNT, 2003).

Explicam Pinheiro, Muzardo e Santos. (2003) que as ações variáveis possuem alterações de seus valores ao longo do uso e vida útil da edificação, além de que podem ser variáveis ou muito variáveis, fixas ou móveis, estáticas ou dinâmicas. Também, podem ser consideradas ações variáveis as cargas de uso, estipuladas pela ABNT NBR 6120 (1980), vento,

calculado pela ABNT NBR 6123 (1988), empuxos de água e abalos sísmicos quando conveniente.

Conforme indica a ABNT NBR 6118 (2014) é obrigatória a consideração do vento no dimensionamento das estruturas, e recomendado as determinações da NBR 6123 (ABNT, 1988), que prescreve que as forças atuantes em uma edificação devem ser calculadas de modo separado para elementos de vedação, partes da estrutura, assim como a estrutura como um todo.

#### 2.1.4.3.3 Ações Excepcionais

São ações com um curto espaço de tempo de duração, segundo Pinheiro, Muzardo e Santos (2003), e apesar de possuírem baixa possibilidade de ocorrerem ao longo da vida útil da edificação, devem ser levadas em consideração no cálculo do dimensionamento das estruturas. Essas ações são incêndios, enchentes, sismos atípicos, explosões e choques de veículos. Segundo a NBR 6118 as excepcionais são as quais os efeitos não podem ser controlados por outros meios (ABNT, 2014).

#### 2.1.4.4 Coeficientes de ponderação

De acordo com a NBR 6118 as ações devem ser majoradas pelo coeficiente  $\gamma_f$ , com valores fixados em tabelas próprias. Assim, esse valor é obtido a partir da Equação 1 (ABNT, 2014).

$$\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f2} \cdot \gamma_{f3} \quad (1)$$

Onde:  $\gamma_{f1}$  depende da variabilidade das ações,  $\gamma_{f2}$  considera a simultaneidade das ações e  $\gamma_{f3}$  está relacionado a possíveis erros que possam ocorrer, como aproximações.

Também apresenta a NBR 6118 que as resistências dos materiais devem ser minoradas pelo coeficiente  $\gamma_m$ , a partir da Equação 2, com valores encontrados em tabelas da mesma Norma (ABNT, 2014).

$$\gamma_m = \gamma_{m1} \cdot \gamma_{m2} \cdot \gamma_{m3} \quad (2)$$

Onde:  $\gamma_{m1}$  = depende da variabilidade da resistência dos materiais envolvidos,  $\gamma_{m2}$  considera a diferença entre a resistência do material no corpo de prova e na estrutura e  $\gamma_{m3}$  considera os desvios gerados na construção e possíveis erros devido às aproximações de resistências.

#### 2.1.4.5 Carregamentos

A NBR 6118, apresenta que carregamentos são considerados combinações de ações em que há a possibilidade de ocorrerem de forma simultânea sobre a estrutura, em um período de tempo, podendo ser transitório ou de longa duração. Para que o dimensionamento seja realizado determinando os efeitos mais desfavoráveis, as ações devem ser combinadas de diversas maneiras, tantas quanto forem necessárias para garantir a segurança nos estados limites (ABNT, 2014). Portanto, são classificados em últimas e de serviço:

As combinações últimas usuais são apresentadas em tabelas no item 11.8.2.4 da ABNT NBR 6118 (2014) e são divididas em:

- a) normal: deve possuir ações permanentes e ação variável principal com valores totais, e as demais ações variáveis são ditas como secundárias possuindo seus valores reduzidos;
- b) especial ou de construção: deve possuir ações permanentes e ação variável especial se houver, com valores totais, e demais ações variáveis com pouca probabilidade de existir, de ocorrência simultânea devem ter seus valores reduzidos;
- c) excepcionais: deve possuir ações permanentes e ação variável excepcional quando houver, com seus valores totais, e as outras ações variáveis com pouca probabilidade de ocorrer de forma simultânea deve ter seus valores reduzidos.

As combinações de serviço usuais são apresentadas em tabelas no item 11.8.3.2 da ABNT NBR 6118 (2014) e são divididas em:

- a) quase permanentes: usualmente atuam durante a maior parte da vida útil da estrutura e são consideradas na verificação do estado limite de deformações excessivas;
- b) frequentes: ocorrem muitas vezes durante o período de vida útil da estrutura e é levado em conta na verificação dos estados limites de fissuração e vibração, assim como das deformações decorrentes de vento ou temperatura;
- c) raras: são presentes apenas algumas vezes durante o período de vida útil da estrutura e é considerada na verificação do estado limite de formação de fissuras.

#### 2.1.4.6 Estados limites

Uma edificação deve ser projetada de modo a atender os requisitos de segurança, bom desempenho de serviço e durabilidade. O estado limite último (ELU) de ruína trata-se, de acordo com Araújo (2014a), do estado de colapso ou ruína que torne a estrutura parcial ou

totalmente inapta ao uso, já o estado limite de serviço ou utilização (ELS), corresponde ao estado em que a estrutura apresenta deformações excessivas, vibrações, fissurações, entre outros, que prejudiquem a utilização da edificação e comprometam a durabilidade dessa. Portanto, relacionado ao ELU está a segurança, e relacionado ao ELS está a durabilidade, conforto e aparência da edificação.

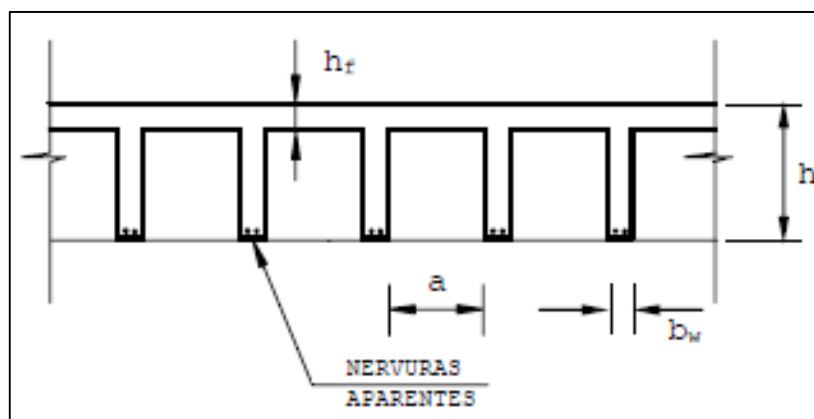
## 2.2 LAJES NERVURADAS

### 2.2.1 Conceito

Como caracteriza Bocchi Júnior e Giongo (2007) lajes nervuradas são formadas por diversas vigas denominadas nervuras, unidas por uma mesa de concreto, conforme apresentado na Figura 3, no qual a mesa tem a função de resistir aos esforços de compressão, e as barras localizadas nas nervuras aos esforços de tração. O comportamento desse conjunto pode ser considerado uma viga de seção T.

Fusco (2013) acrescenta que lajes nervuradas são as que em sua zona de tração há nervuras com ou sem o emprego de material inerte que possui a função de tornar sua superfície inferior lisa e, ainda, podem ser calculadas como lajes maciças. Também conforme caracteriza Bocchi Júnior (1995), essa tipologia de lajes são as que possuem nervuras com função de realizar uma união entre mesa e armadura, sendo a mesa capaz resistir a esforços de compressão, e as armaduras das nervuras com a competência de resistir a esforços de tração.

Figura 3 - Laje nervurada



Fonte: Bocchi Júnior e Giongo (2007).

As lajes nervuradas, de acordo com a NBR 6118 caracterizam-se por suas nervuras estarem localizadas na região de tração para os momentos positivos. Podem ser moldadas *in loco* ou possuírem nervuras pré-moldadas, ser uni ou bidirecionais, assim como necessitam atender as diretrizes das Normas Brasileiras (ABNT, 2014).

### **2.2.2 Histórico**

As lajes nervuradas tiveram origem no ano de 1854, quando na Inglaterra, um fabricante de gesso chamado Wilkinson, patenteou um sistema de lajes que possuía uma série de nervuras preenchidas por gesso, onde as armaduras se estendiam seguindo ao longo das zonas tracionadas (LIMA et al., 20--?)

Afirmam Franca e Fusco (1997) que as lajes nervuradas se tratam de uma evolução das convencionais lajes maciças, a fim de reduzir uma grande parte do concreto devido aos vazios obtidos de forma padronizada e regular, proporcionando diminuição no peso próprio da estrutura e economia em razão do melhor aproveitamento de concreto e aço.

Devido ao fato de o concreto ter baixa resistência à esforços de tração, nos métodos de dimensionamento de estruturas de concreto armado, sua contribuição não é considerada, tornando-o dispensável nessas regiões. Surgiram então as lajes nervuradas, provenientes da necessidade de diminuir o peso próprio das estruturas e, ainda, apresentar um melhor aproveitamento do concreto, reduzindo assim os custos de construção (SCHWETZ, 2011).

### **2.2.3 Características**

De acordo com Pinheiro e Rezente (2003), uma das principais vantagens do sistema de lajes nervuradas é a redução da quantidade de concreto e por sua consequência, a redução do peso total da estrutura. Desse modo, o material inerte de enchimento deve ser leve, apenas com resistência capaz de suportar a execução, e não deve ser considerado no cálculo da laje. Da mesma forma, segundo Botelho e Marchetti (2010), as nervuras podem ser preenchidas por diversos materiais inertes para que a superfície visível se torne lisa, através de múltiplas técnicas, entretanto, não há como levar em consideração as suas resistências.

Para Souza (2007), buscando soluções adequadas à evolução dos projetos arquitetônicos que cada vez mais buscam flexibilidade de *layout* e vãos maiores, tem-se como alternativa bastante vantajosa a utilização das lajes nervuradas. Também afirma Bocchi Júnior (1995) que a possibilidade de liberdade arquitetônica, as estruturas de concreto armado mais econômicas e eficientes, assim como a fácil execução das obras, são características



convenientes que favoreceram o aumento do uso de sistemas estruturais com lajes nervuradas moldadas *in loco*, pré-moldadas e protendidas.

Além da possibilidade de obtenção de maiores vãos entre pilares na estrutura, Schwetz (2011) fundamenta que o fato de a disposição das paredes de alvenaria não estarem dependentes do posicionamento das vigas, há possibilidade de enriquecimento arquitetônico quanto aos *layouts*. Schwetz (2011) também cita a possibilidade de distribuição de cargas de uma forma plural, podendo ser adaptado para diversas ocupações nos espaços.

Conforme apresenta Souza (2007) as lajes nervuradas possuem a desvantagem de usualmente aumentarem a altura total da edificação, e necessitarem indispensavelmente de grandes cuidados no momento de sua execução para impedir a formação de vazios nas nervuras durante a concretagem. Também conforme Souza (2007), além da possibilidade de ruptura por cisalhamento nas nervuras próximo a região maciça ou por punção, quando se tratam de lajes nervuradas lisas há um acréscimo dos deslocamentos verticais, que por sua vez diminuem a estabilidade global da estrutura com relação às ações horizontais.

Para as lajes nervuradas constituídas por vigotas pré-fabricadas, uma grande inconveniência são os altos valores de deslocamentos transversais, quando comparado com lajes maciças e lajes nervuradas moldadas no local. Ainda, por se tratarem de lajes unidirecionais, um aspecto desfavorável é a distribuição de cargas apenas em uma direção, aumentando assim os esforços solicitantes (SILVA, 2005).

Citam os autores Pinheiro e Rezente (2003) os enchimentos de maior utilização no mercado:

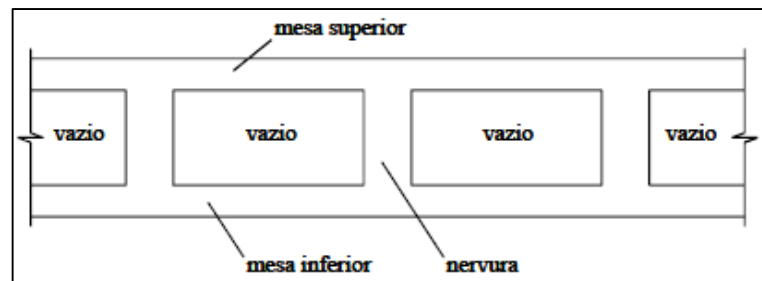
- a) blocos cerâmicos ou blocos de concreto: ambos são usualmente utilizados em lajes com vigotas pré-moldadas, possuindo um peso específico elevado quando comparado com outros materiais de enchimento;
- b) blocos de EPS: esse material de enchimento é geralmente utilizado em conjunto com as vigotas pré-moldadas, com facilidade de execução, alto desempenho térmico, acústico e de acabamento;
- c) caixotes reaproveitáveis: constitui-se de fôrmas de polipropileno ou metal contendo caixotes que formam as nervuras, são reaproveitáveis e dispensam a utilização de tabuleiro tradicional, empregando-se apenas pranchas alocadas nas regiões das nervuras.

## 2.2.4 Sistemas construtivos

### 2.2.4.1 Laje moldada *in loco*

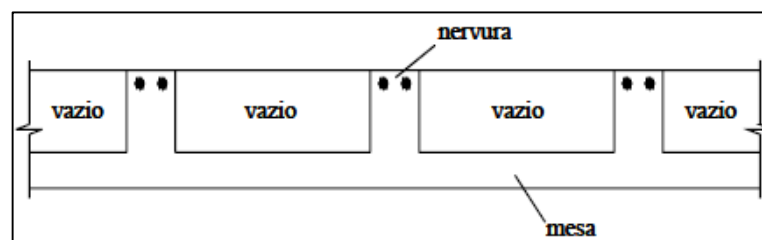
Para Silva (2005) são as lajes construídas totalmente na própria obra em que será implantada, com as nervuras e mesas consolidadas em sua posição inalterável em que serão utilizadas. Silva (2005) ainda afirma que as nervuras podem ser posicionadas em uma ou duas direções e que essas lajes ainda podem ser classificadas como dupla, invertida ou direta, conforme apresentado nas Figura 4, Figura 5 e Figura 6.

Figura 4 - Laje nervurada moldada *in loco* dupla



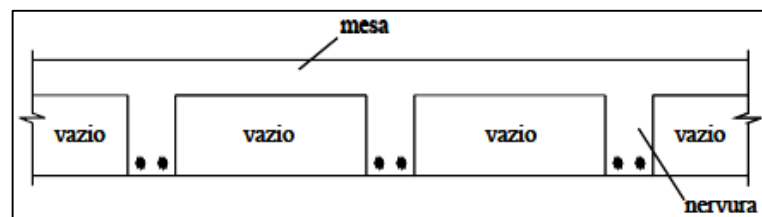
Fonte: Silva (2005).

Figura 5 - Laje nervurada moldada *in loco* invertida



Fonte: Silva (2005).

Figura 6 - Laje nervurada moldada *in loco* direta



Fonte: Silva (2005).

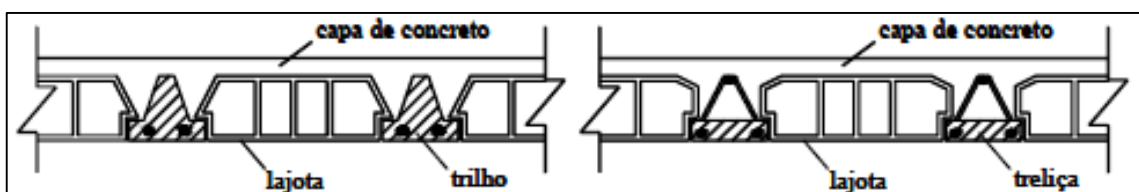
#### 2.2.4.2 Laje com nervura pré-moldada

Caracteriza-se por lajes nervuradas pré-moldadas as que alguma parte é executada fora de seu local definitivo da obra, de acordo com Bocchi Júnior (1995), e somente na obra sua estrutura é montada e concretada com o restante da edificação.

Como afirma Bocchi Júnior e Giongo (2007), com a possibilidade de facilitar o processo construtivo, as partes inferiores das nervuras podem ser pré-moldadas antes de serem alocadas em seu local permanente na obra. Além disso, consideram a facilidade da dispensa de fôrmas inferiores, pois há a utilização de blocos entre as nervuras, que impede que o concreto lançado na laje alcance as nervuras pré-fabricadas. Cabe ainda mencionar que Franca e Fusco (1997) consideram as lajes nervuradas pré-fabricadas como um avanço para a construção civil, devido ao fato de contribuírem para as necessidades de redução de tempo de construção e custos com madeiras de fôrmas e escoras.

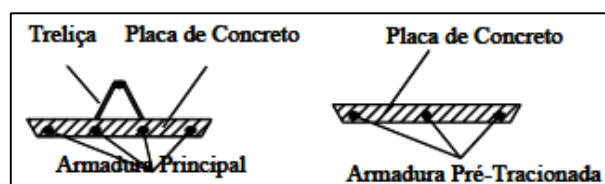
Para Silva (2005) as lajes nervuradas pré-fabricadas podem ser divididas em vigotas pré-fabricadas e em painéis. Onde na primeira faz-se o uso de vigotas pré-fabricadas unidirecionais tipo trilho ou tipo treliça conforme indicado na Figura 7, e entre elas um material de enchimento. Já na segunda, também chamada de pré laje, utiliza-se todo o painel pré-fabricado podendo ele ser treliçado ou protendido, como apresentado na Figura 8, podendo ou não apresentar material de enchimento, também ser entendidos como uma extensão das vigotas.

Figura 7 - Laje nervurada pré-fabricada com vigota tipo trilho e vigota treliçada



Fonte: Silva (2005).

Figura 8 - Laje nervurada em painel treliçado e painel protendido



Fonte: Silva (2005).

Há também os painéis de laje alveolar, que possuem furos circulares ou ovais, longitudinais ao longo de toda a extensão da laje, além de serem protendidas e produzidas em sua totalidade de forma pré-fabricada. Uma outra tipologia são os painéis de lajes nervuradas integralmente pré-fabricadas, podendo ser em seção T, duplo T e U. Essas duas tipologias de lajes são unidirecionais, usualmente consideradas simplesmente apoiadas (SILVA, 2005).

#### 2.2.4.3 Laje nervurada unidirecional

Quando as lajes nervuradas são projetadas de modo em que as nervuras são colocadas apenas em uma direção, que também será a direção onde o carregamento será distribuído, classifica-se como unidirecional ou armada em uma direção (SCHWETZ, 2005). Ainda, afirma Silva (2005) que essa tipologia de laje possui as armaduras arranjadas usualmente na direção do menor vão além de apresentar comportamento de um conjunto de vigas seção T simplesmente apoiadas que trabalham de forma independente. Além disso, há a possibilidade de empregar nervuras transversais com a função de travamento das nervuras principais e também de distribuição de ações concentradas ou parcialmente distribuídas.

#### 2.2.4.4 Laje nervurada bidirecional

As lajes nervuradas bidirecionais, também chamadas de armada em duas direções, possuem nervuras em ambas direções e proporcionam esforços menores devido a distribuição para ambos os sentidos. Além disso, quando comparadas com as lajes unidirecionais, inclinam-se a serem estruturas mais rígidas, com alturas de nervuras reduzidas, menores valores de deformações e consumo de materiais (SCHWETZ, 2005).

De acordo com Silva (2005), as lajes nervuradas bidirecionais devem ser utilizadas quando a relação entre o vão maior e o vão menor da laje for inferior a dois. Portanto, é ocasionando a diminuição das solicitações e deformações transversais.

### 2.2.5 Dimensionamento

#### 2.2.5.1 Vinculação

Estabelece Pinheiro e Rezente (2003) que sempre que possível engastes e balanços devem ser evitados, devido ao fato de nesses casos haver esforços de compressão na parte inferior da laje, exatamente onde há redução da quantidade de concreto e esforços de tração na parte superior da laje, onde predomina o concreto. Ainda, afirmam Pinheiro e Rezente (2003)

que em casos de necessidade de realizar engastes, deve-se limitar o valor do momento fletor à igual ao valor da resistência à compressão da nervura ou então utilizar laje do tipo dupla, ou até mesmo uma região maciça de dimensão suficiente.

De acordo com Bocchi Junior e Giongo (2007), é possível considerar as lajes nervuradas ligadas entre si como engastadas, desde que as rigidezes possuam um valor muito semelhante. Bocchi Junior e Giongo (2007) comentam que assim haverá nervuras perpendiculares a viga de borda, assim como momento fletor tracionando as fibras superiores e comprimindo as fibras inferiores das lajes.

#### 2.2.5.2 Vão efetivo

Bocchi Junior e Giongo (2007) consideram que as lajes nervuradas podem seguir os mesmos critérios de dimensionamento apresentados para as lajes maciças, e que também são adotados para as vigas, quando forem observadas as limitações. De acordo com a NBR 6118, o vão efetivo pode ser calculado a partir da Equação 3, conforme Figura 9 (ABNT, 2014):

$$l_{ef} = l_o + a_1 + a_2 \quad (3)$$

Onde,

$l_{ef}$  = vão efetivo;

$a_1$  = menor valor entre  $t_1/2$  e  $0,3h_f$ ;

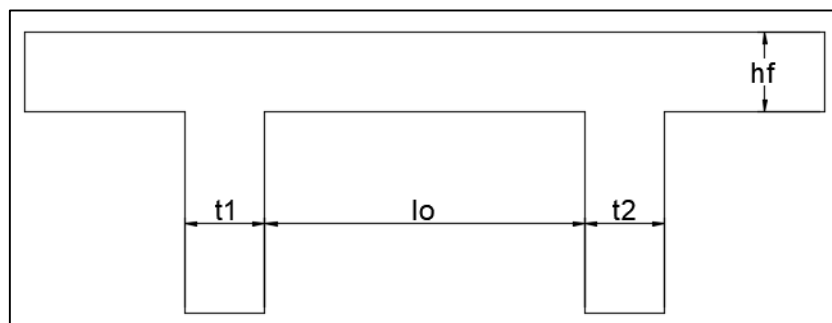
$a_2$  = menor valor entre  $t_2/2$  e  $0,3h_f$ ;

$l_o$  = espaçamento entre as nervuras (vão livre);

$t_1$  = espessura da nervura lateral;

$t_2$  = espessura da nervura lateral oposta.

Figura 9 - Vão efetivo



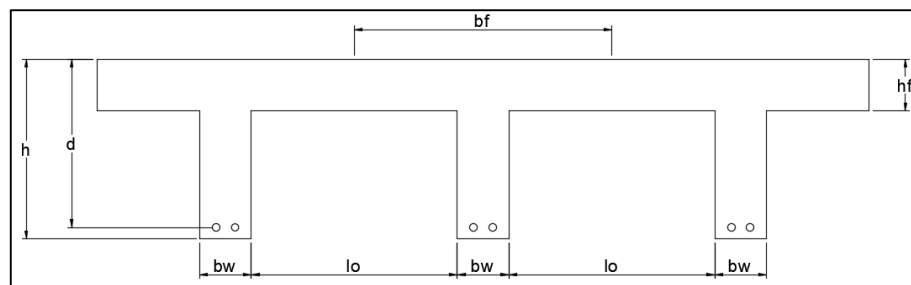
Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6118: 2014.

### 2.2.5.3 Especificações normativas

A NBR 6118 preconiza que as lajes nervuradas podem ser calculadas considerando-se todas as prescrições da mesma norma relativas a lajes maciças, desde que atendam as condições especificadas a seguir, com dimensões demonstradas na Figura 10 (ABNT, 2014):

- espessura da mesa ( $h_f$ ) quando não existirem tubulações horizontais embutidas: devem ser maiores ou igual a  $1/15$  da distância entre as faces das nervuras ( $l_o$ ) e também maiores que 4 cm;
- espessura da mesa ( $h_f$ ) quando existirem tubulações horizontais embutidas de diâmetro menor ou igual a 10 mm: deve ser maior ou igual a 5 cm;
- espessura da mesa ( $h_f$ ) quando existirem tubulações horizontais embutidas de diâmetro maior a 10 mm: deve ser maior ou igual a 4 cm acrescidos do diâmetro da tubulação;
- espessura da mesa ( $h_f$ ) quando existirem tubulações horizontais embutidas de diâmetro maior a 10 mm e quando há cruzamento dessas tubulações: deve ser maior ou igual a 4 cm acrescidos do dobro diâmetro da tubulação;
- espessura das nervuras ( $b_w$ ): deve ser maior ou igual a 5 cm;
- nervuras com espessura menor que 8 cm: não podem conter armaduras de compressão.

Figura 10 - Dimensões das lajes nervuradas



Fonte: Autora (2019).

Do mesmo modo, de acordo com a NBR 6118, as lajes nervuradas unidirecionais devem ser calculadas de acordo com as direções das nervuras, e devem ser desprezadas a rigidez transversal e à torção. Já as lajes nervuradas bidirecionais podem ser calculadas de igual forma às lajes maciças para efeito de esforços solicitantes (ABNT, 2014).

Por fim, é recomendação também da NBR 6118, que sejam cumpridos os seguintes requisitos de projeto para lajes nervuradas, levando em consideração o espaçamento entre eixo das nervuras (ABNT, 2014):

- a) quando menor ou igual a 65 cm: pode ser isentada a verificação da flexão da mesa. Também pode ser considerado os critérios de laje para a verificação do cisalhamento da região das nervuras;
- b) quando entre 65 cm e 110 cm: deve ser realizada a verificação à flexão da mesa, assim como verificação ao cisalhamento das nervuras como vigas. Se o espaçamento entre eixos das nervuras for menor que 90 cm e a largura média das nervuras for maior que 12 cm, essas nervuras podem ser verificadas como lajes;
- c) quando maior que 110 cm: é exigido que a mesa seja projetada como laje maciça apoiada em uma grelha de vigas, ainda respeitando os limites mínimos de espessuras.

#### 2.2.5.4 Ações e esforços solicitantes

As ações da estrutura devem seguir as prescrições da NBR 6120 de cargas para o cálculo de estruturas de edificação, assim como o cálculo dos esforços solicitantes devem ser realizados de tal forma como é realizado para lajes maciças (ABNT, 1980). Ainda, devem ser considerados a posição e localização das cargas, rigidez das nervuras, condições de apoio das lajes, posição dos pilares e deformação das vigas quando se tratar de lajes nervuradas com grandes medidas e com carregamentos concentrados de valores elevados (PINHEIRO E REZENTE, 2003).

#### 2.2.5.5 Estado limite último

##### 2.2.5.5.1 Verificação de flexão nas nervuras

Explicam Pinheiro e Rezente (2003) que a partir dos momentos fletores obtidos para cada nervura o cálculo da armadura necessária deve ser:

- a) para mesa tracionada: quando a laje não é dupla, a seção resistente é retangular e constituída apenas pela nervura, com altura (h) e largura (bw);
- b) para mesa comprimida: a linha neutra fica posicionada na mesa e a seção resistente é considerado um falso T, composto por uma seção retangular de altura (h) e largura (bf);

Além disso, Pinheiro e Rezente (2003) afirmam que as ancoragens nos apoios, os deslocamentos dos diagramas, a fissuração e armadura mínima devem ser considerados. A taxa mínima de armadura deve ser observada de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014).

#### 2.2.5.5.2 Verificação de cisalhamento nas nervuras

Consoante com Pinheiro e Rezente (2003), a verificação das lajes nervuradas com relação à força cortante leva em consideração o espaçamento entre eixo das nervuras:

- a) quando menor ou igual a 65 cm: a verificação é realizada de igual forma às lajes maciças, levando em consideração a força cortante que atua na nervura ( $V_d$ ) e seção transversal de largura  $b_w$  e altura  $h$ ;
- b) quando está entre 65 cm e 90 cm: nos casos em que a espessura médias das nervuras for maior que 12 cm, a verificação pode ser realizada com analogia a lajes maciças.
- c) quando está entre 65 cm e 110 cm: a verificação é realizada utilizando as prescrições normativas apresentadas na NBR 6118 para vigas. Deve ser adicionada armadura na mesa de área de aço mínima de  $1,5 \text{ cm}^2/\text{m}$ , de forma perpendicular à nervura e por toda sua largura útil (ABNT, 2014).

#### 2.2.5.5.3 Verificação de flexão na mesa

De acordo com a NBR 6118 quando a distância entre eixos das nervuras for menor ou igual a 65 cm, não é necessário realizar a verificação da resistência da mesa (ABNT, 2014). Explicam Bocchi Junior e Giongo (2007) que nesses casos, somente a resistência à tração do concreto da mesa é capaz de absorver todas as tensões de tração, devido momento fletor considerado como laje maciça de espessura  $h_f$ .

Exige-se a verificação de segurança em relação ao momento fletor atuante na mesa para lajes com espaçamento entre eixos das nervuras entre 65 cm e 110 cm, isto é, deve ser realizado o cálculo de armadura em duas direções para absorber as tensões dos momentos fletores atuantes na mesa. A mesma verificação deve ser realizada quando há cargas concentradas aplicadas ou linearmente distribuídas entre as nervuras. Para esses casos, o cálculo é realizado como lajes de vãos igual as distâncias entre eixos das nervuras, exposta a ação uniformemente distribuída na mesa (PINHEIRO; REZENTE, 2003).

Consideram Bocchi Junior e Giongo (2007) que a mesa da laje nervurada pode ser considerada como um painel de lajes maciças contínuas apoiadas nas nervuras, acarretando nesses apoios valores de momentos negativos, fazendo-se necessário a utilização de armaduras



para absorver as tensões de tração do momento fletor. Pode ser desprezada a continuidade nos painéis, ocasionando riscos de fissuração nas ligações das mesas, sobre as nervuras, as quais não são prejudiciais em aspectos de utilização e durabilidade.

Para lajes que possuam eixos entre nervuras maior que 110 cm, a mesa deve ser projetada como laje maciça apoiada em uma grelha de vigas, conforme estabelece a NBR 6118, sendo então utilizadas as hipóteses e prescrições para lajes maciças (ABNT, 2014).

#### *2.2.5.5.4 Verificação de cisalhamento na mesa*

Conforme defendido por Bocchi Junior e Giongo (2007), o efeito da força cortante na mesa das lajes nervuradas é desprezado na maioria dos casos, não havendo necessidade de verificação, excluindo-se os casos em que existirem ações concentradas aplicadas nos trechos entre nervuras. Portanto, é recomendado que caso seja viável, as ações concentradas devem atuar diretamente sobre as nervuras. Ainda, para Pinheiro e Rezente (2003), o efeito de cisalhamento nos painéis, quando necessário que sejam verificados, devem seguir a mesma rotina empregada nas lajes maciças.

#### *2.2.5.5.5 Verificação de cisalhamento na ligação mesa-nervura com mesa comprimida*

Deve ser verificado os planos de união entre nervuras e mesas, com relação aos efeitos tangenciais que são causados pelas variações de tensões normais que ocorrem ao longo do comprimento da viga. A resistência do concreto e a quantidade de aço necessária devem ser examinadas (BOCCHI JUNIOR; GIONGO, 2007).

#### *2.2.5.6 Estado limite de serviço*

Definido pela NBR 6118, a verificação de flecha nas lajes deve ser conforme o item 17.3.2, e devem atender as prescrições de limites de deslocamentos da Tabela 13.3 da norma referida. Também é afirmado que não há grande precisão na estimativa de deslocamentos calculados pelos processos analíticos impostos, devido ao fato de que esses deslocamentos dependem do processo construtivo e das propriedades dos materiais (ABNT, 2014).

De acordo com Pinheiro e Rezente (2003) o cálculo da flecha se divide em flecha imediata e flecha diferida. Na primeira situação, é calculado o deslocamento imediatamente após o carregamento, já na segunda situação, o deslocamento é subsequente as cargas de longa

duração. Igualmente, de acordo com os mesmos autores, em casos de deslocamentos em excesso, esses podem ser em partes, compensados por contraflechas.

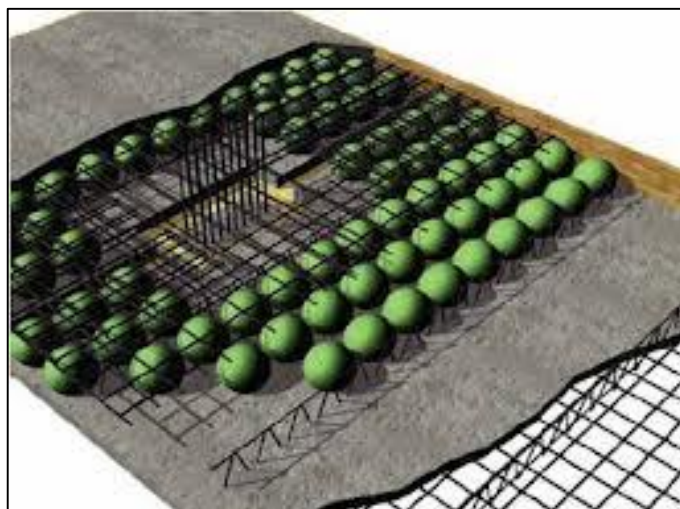
## 2.3 LAJES BUBBLEDECK

### 2.3.1 Conceito

De acordo com Guedes e Andrade (2015), o sistema construtivo de lajes *Bubbledeck* é formado por esferas plásticas, concreto, malhas de aço superiores e inferiores, podendo ou não possuir reforços para momentos fletores. Ainda afirmam Guedes e Andrade (2015) que, as esferas incorporadas possuem a função de substituir o concreto que se existisse não desempenharia função estrutural.

Também, conforme Lai (2010), a tecnologia de lajes *Bubbledeck* utiliza esferas de material plástico reciclado para criar espaços vazios enquanto fornece resistência através das seções em forma de arco para lajes de concreto e aço, proporcionando uma redução do peso próprio em 35 %, assim como aumento de capacidade de carga em praticamente 100 % com a mesma espessura de laje, quando comparado com as lajes maciças. Na Figura 11 pode ser observado esquematicamente a composição das lajes dessa tipologia.

Figura 11 - Laje *Bubbledeck*



Fonte: *Bubbledeck* (2003).

De acordo com Barberato e Frota (2014) as lajes *Bubbledeck* são classificadas como cogumelos e bidirecionais. Ainda, essas lajes podem ser pré-moldadas, pré-fabricadas ou construída totalmente em seu local definitivo. Também, Guedes e Andrade (2015) explicam

que as dimensões e o espaçamento interfere nas esferas é variável, característica essa que garante a fácil adaptação em diferentes formas de pisos, assim como a possibilidade de incorporar as instalações em seu interior e a possibilidade de realizar aberturas nas lajes mesmo após sua conclusão.

### 2.3.2 Histórico

Guedes e Andrade (2015) explicam que, com o propósito de desenvolver uma solução ecológica e econômica para construções, de forma flexível e de produção em grandes escalas, as lajes *Bubbledeck* foram desenvolvidas na Dinamarca, por volta do ano de 1980 pelo engenheiro Jorgen Breuning.

Em Rotterdam, na Holanda, foi realizada a primeira obra utilizando o sistema construtivo *Bubbledeck*, o prédio *Millennium Tower*. Notou-se economia de tempo e custos, assim como redução do pé direito devido à não utilização de vigas, possibilitando a construção de dois andares adicionais em relação ao projeto inicial. Após isso, começaram a surgir outras obras como o *Citty Hall and Office* na Dinamarca e o *Le Coie Hotel* no Reino Unido (GUEDES; ANDRADE, 2015).

No Brasil, a primeira obra utilizando essa tecnologia foi realizada em Salvador, Bahia, tratando-se de uma ampliação da construtora Norberto Odebrecht. Algumas outras obras como o Centro Administrativo do Distrito Federal e o Edifício garagem do aeroporto Galeão no Rio de Janeiro também foram concebidos com esse sistema de lajes (GUEDES; ANDRADE, 2015).

### 2.3.3 Características

Harding (2004), afirma que os benefícios da utilização de lajes *Bubbledeck* são diversos, como por exemplo, a liberdade de *designs*, a menor dependência das condições climáticas para execução, eliminação de vigas, redução das estruturas da fundação devido à redução de cargas, eliminação de contraventamento transversal, redução da utilização de concreto e possibilidade de transpasse de tubulações nas lajes. Também Harding (2004), que o resultado geral da utilização dessa tipologia de laje traz uma economia de 2,5 % a 10 % no custo total da construção, em confrontação com as lajes maciças.

O sistema de lajes *Bubbledeck*, conforme Parcianello (2014), trata-se de uma solução de engenharia que pode ser adotada em qualquer estrutura que possa se utilizar lajes maciças. A tecnologia traz melhoria no desempenho da obra com relação aos custos de material e mão de obra, assim como tempo de execução da edificação. Da mesma forma, afirma Parcianello

(2014) que a redução da quantidade de pilares, a não necessidade do uso de vigas, assim como as instalações embutidas nas lajes, proporcionam um significativo ganho de pé direito. De acordo com Guedes e Andrade (2015), as lajes *Bubbledeck* apresentam grandes liberdades de projetos, redução do peso próprio ocasionando redução do carregamento das fundações, embutimento das instalações, eliminação de vigas proporcionando aumento de pé direito, além do isolamento acústico e térmico devido ao material inerte presente entre pavimentos.

Freire (2009) apresenta a ideia de que a utilização desse sistema construtivo, combinando a incorporação das esferas com o conceito de lajes cogumelo, permite um aumento em 50 % da distância entre pilares nas duas direções, quando comparado com o uso de lajes do tipo maciça. Entretanto, Lima (2015) traz como desvantagem com relação ao uso do sistema de lajes *Bubbledeck* a necessidade de mão de obra especializada, a falta de normativa específica, transporte com necessidade de cuidados especiais e problemas de vinculação laje-pilar.

As lajes *Bubbledeck* são compostas por três principais materiais, sendo eles esferas plásticas, concreto e aço. As esferas de plástico são ocas e fabricadas de polietileno de alta densidade, o concreto é constituído de cimento Portland sem necessidade de adições plastificantes na mistura e o aço é utilizado como uma camada de malha lateral para apoio e vigas diagonais para suporte vertical das esferas plásticas (LAI, 2010).

Conforme apresenta Lima (2015), o sistema construtivo de lajes *Bubbledeck* se comporta de igual modo à uma laje lisa armada em duas direções e dispensa o uso de vigas, proporcionando liberdade de projeto. Entretanto, afirma o mesmo autor, há uma redução na rigidez do edifício quanto aos esforços horizontais e deve haver um cuidado especial na verificação das flechas, assim como na verificação de punção na ligação laje-pilar, sendo esse o ponto mais crítico para a segurança estrutural desse sistema construtivo.

## **2.3.4 Sistemas Construtivos**

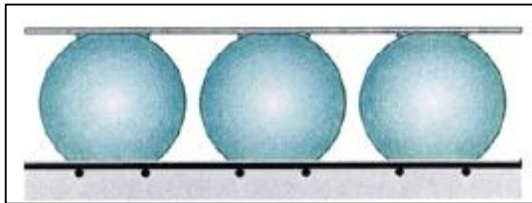
### **2.3.4.1 Pré lajes**

É constituída por uma camada inferior de concreto pré-fabricado, fazendo com que o uso de fôrmas de assoalho seja desprezado, devido ao fato de essa camada realizar essa função e ser apoiada em escoras provisórias, como apresentado nas Figura 12 e Figura 13. O uso de guindastes ou gruas para a elevação e posicionamento dessas lajes é inevitável (LIMA, 2017).

Para Palla (2017), são adicionadas as armaduras de reforço assim como as barras de ligação entre as placas logo após o término da montagem dos painéis. A finalização é realizada

com a concretagem sobre a pré-laje. Esse método é o mais utilizado em razão da incorporação de instalações nas lajes, industrialização na produção dos painéis e fácil adaptação para diferentes categorias de pisos.

Figura 12 - Pré-laje (vista lateral)



Fonte: *Bubbledeck* (2003).

Figura 13 - Pré-laje (vista 3D)



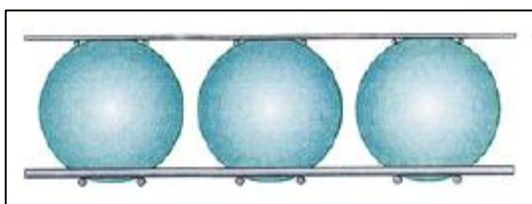
Fonte: Silva (2011).

#### 2.3.4.2 Módulo reforçado

Essa tipologia de laje, de acordo com Lima (2017), é formada por tela de aço inferior, esferas plásticas e tela de aço superior, demonstrado nas Figura 14 e Figura 15. Há necessidade de execução de fôrmas e escoramentos convencionais, e a concretagem deve ser realizada primeiramente sobre a malha de aço inferior, e posteriormente à colocação das armaduras complementares deve ser realizado o restante da concretagem, até atingir a espessura especificada em projeto.

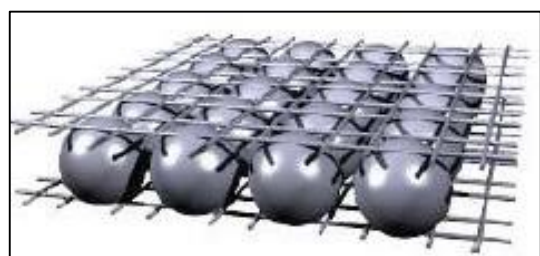
Consoante as ideias de Palla (2017), o método construtivo com módulos trata-se de englobar as esferas plásticas em malhas de aço, sobre fôrmas e escoras convencionais e com concretagem em duas etapas. Na primeira etapa, 6 cm de espessura são concretados com a finalidade de evitar a flutuação das esferas, e na segunda o restante da espessura da laje é preenchida pelo concreto. Ainda, ambos autores citam a melhor utilização desse sistema em pavimentos térreos e locais de difícil acesso.

Figura 14 - Módulo reforçado (vista lateral)



Fonte: *Bubbledeck* (2003).

Figura 15 - Módulo reforçado (vista 3D)



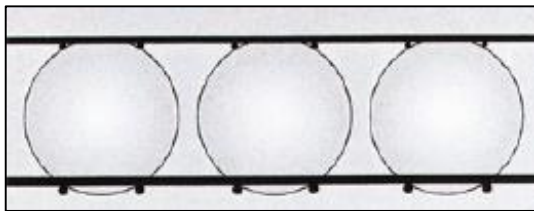
Fonte: Silva (2011).

### 2.3.4.3 Painéis acabados

Os painéis acabados são a tipologia menos empregada, devido ao fato de que as peças são entregues pré-fabricadas em sua totalidade no canteiro de obras, como demonstrado nas Figura 16 e Figura 17. As lajes são necessariamente unidirecionais e possuem vigas ou paredes de suporte internas (LIMA, 2017).

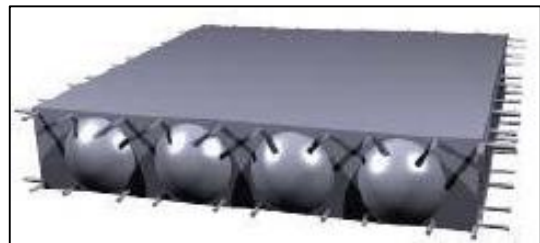
Segundo Palla (2017), para esse método de construção da laje *Bubbledeck*, é necessário realizar apenas o içamento e posicionamento do painel acabado, que é produzido em fábrica. Além disso, as armaduras de flexão são conectadas e as barras de ligação entre painéis posicionadas, garantindo então um vínculo impecável entre elas.

Figura 16 - Painel acabado (vista lateral)



Fonte: *Bubbledeck* (2003).

Figura 17 - Painel acabado (vista 3D)



Fonte: Silva (2011).

## 2.3.5 Dimensionamento

A *Bubbledeck* Internacional recomenda que o dimensionamento deve ser realizado como lajes de concreto maciça, obedecendo, entretanto, os parâmetros de redução de rigidez a flexão, redução de resistência ao cisalhamento, assim como peso próprio. Do mesmo modo, o menor valor de rigidez é compensada pela redução de cerca de um terço do peso próprio da laje, quando comparada com as lajes maciças, ocasionando menores deflexões (PALLA, 2017).

### 2.3.5.1 Vão

De acordo com Silva (2011), o dimensionamento dos vãos das lajes *Bubbledeck* são determinados pela flecha máxima, de acordo com a razão entre o menor comprimento do vão ( $L$ ) e a espessura da laje ( $h$ ), sendo:

- a)  $L/h \leq 30$ : vãos simples;

- b)  $L/h \leq 39$ : vãos contínuos;  
 c)  $L/h \leq 10,5$ : balanço.

### 2.3.5.2 Pré-dimensionamento

As esferas plásticas possuem diâmetros padronizados assim como valores de especificações técnicas relacionados a cada um deles. Os intereixos das esferas e a capacidade de redução de cargas pode variar de acordo com o número de esferas projetadas por metro quadrado de laje. Esses valores são apresentados pelo fabricante *Bubbledeck* Internacional, conforme apresentado na Tabela 4. Além disso, as lajes possuem espessuras padronizadas, que são associadas à sua carga permanente equivalente e pré-dimensionadas de acordo com o vão entre pilares a ser atendido, conforme apresentado na Tabela 5 (FREIRE, 2009).

Tabela 4 - Especificações técnicas

Diâmetro da esfera (cm)	18,00	22,50	27,00	31,50	36,00	40,50	45,00
Mínimo intereixo das esferas (cm)	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00
Mínimo número de esferas (1/m <sup>2</sup> )	25,00	16,00	11,11	8,16	6,25	4,94	4,00
Espessura mínima da laje (cm)	23,00	28,00	34,00	40,00	45,00	52,00	58,00
Redução da carga por esfera (kN)	0,08	0,15	0,26	0,41	0,61	0,87	1,19
Redução máxima de carga/m <sup>2</sup> (kN/m <sup>2</sup> )	1,91	2,39	2,86	3,34	3,82	4,29	4,77
Fator para a Rigidez (-)	0,88	0,87	0,87	0,88	0,87	0,88	0,88
Fator para o Cortante (-)	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60

Fonte: Adaptado de *BubbleDeck Design Guide* (20--?).

Tabela 5 - Vãos usuais e carga permanente equivalente

<b>Tipo</b>	<b>Espessura da Laje (mm)</b>	<b>Diâmetro das esferas (mm)</b>	<b>Vão (m)</b>	<b>Peso próprio (kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Concreto (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b>
BD230	230	180	7 a 10	370	0,10
BD280	280	225	8 a 12	460	0,14
BD340	340	270	9 a 14	550	0,18
BD390	390	315	10 a 16	640	0,20
BD450	450	360	11 a 18	730	0,25

Fonte: Adaptado de *BubbleDeck International* (20--?).

### 2.3.5.3 Especificações normativas

Devido a tecnologia de lajes *Bubbledeck* biaxiais estar presente no Brasil há pouco tempo, conforme apresentado por Lima (2017), não há normativa específica aplicada a esse sistema, entretanto podem ser aplicadas as especificações normativas da NBR 6118, podendo as lajes serem dimensionadas como maciças, levando-se em consideração a redução de carga ocasionada pelas esferas plásticas (ABNT, 2014).

Diversos estudos e testes foram realizados pela empresa fabricante, e demonstraram que as lajes *Bubbledeck* podem ser dimensionadas como lajes maciças, levando em consideração algumas pequenas diferenças em termo de cisalhamento e deflexão, de acordo com a *Bubbledeck International* (20--?):

- a) o peso próprio da laje é menor, portanto a deflexão é menor, quando confrontado com as lajes maciças;
- b) a rigidez à flexão é 10 % menor quando comparada a uma laje maciça de mesma espessura, aspecto esse que é compensado pela redução de peso em termos de deflexão;
- c) é recomendado a utilização de um momento de fissura igual a 80 % do utilizado para lajes maciças de mesma espessura;
- d) a resistência ao cisalhamento na zona sólida é considerada como 60 % do valor de uma laje maciça de mesma espessura.

### 2.3.6 Testes com Lajes *Bubbledeck*

Freire (2009) apresenta que diversos testes com relação as lajes *Bubbledeck* que foram realizadas na Dinamarca, Holanda e Alemanha demonstram que esse sistema de lajes possui uma melhor distribuição de tensões quando comparada com outras lajes com vazios. Também, esse sistema apresentou a não ocorrência de perda de capacidade de carga devido às esferas embutidas nas lajes.

Ainda, afirma Freire (2009) que a resistência ao esforço cortante obtida nos ensaios foi maior do que a esperada, apontando que as esferas interveem de forma positiva na resistência, aumentando seu valor devido sua forma de arco. Essas esferas também acabam gerando um efeito similar à adição de aditivos plastificantes na mistura do processo de concretagem, pois sua forma circular facilita a concretagem dos espaços.



### **2.3.7 Punção**

Os elevados esforços de cisalhamento, atuantes sobre a ligação entre lajes e pilares pode ocasionar a separação completa entre os elementos, denominada ruptura por punção (LIMA, 2015). As lajes *Bubbledeck* são classificadas como lajes do tipo cogumelo lisa, por serem apoiadas diretamente sobre os pilares, sendo bidirecionais e sem vigas. Portanto é preciso que se tenha um cuidado especial com relação à punção para esse tipo de laje na ligação entre os elementos laje e pilar, onde atuam esforços de cisalhamento concentrados. Também foram demonstrados em estudos que o padrão de fissuração é semelhante ao de laje maciça, entretanto a resistência à perfuração é menor (SILVA et al., 2016).

## **2.4 ORÇAMENTAÇÃO**

Na esfera da engenharia, há uma área denominada Engenharia de Custos, onde as normas e critérios são utilizados para realizar avaliações econômicas, planejamento de empreendimentos, controle e gerência de obras e estimativas de custos. A elaboração precisa de um orçamento é de extrema importância dentro do mercado competitivo da engenharia civil (DIAS, 2011). Mattos (2006) afirma que o lucro e sucesso de um construtor está diretamente ligado a uma orçamentação eficiente. Também conforme Mattos (2006), para todo tipo de obra e cliente, o aspecto de custo tem grande relevância, pois estabelece o preço da obra e o preço de venda.

Consoante as ideias de Avila, Librelotto e Lopes (2003), o orçamento na construção civil tem como finalidade estabelecer o custo da obra, levando em consideração a quantificação de insumos, mão de obra e equipamentos necessários para empreender uma obra ou serviço. Conforme apresenta González (2008) existem diversas tipologias de orçamentos, e a escolha entre eles é de acordo com o objetivo da estimativa e informações disponíveis para sua realização. González (2008) ainda apresenta as principais categorias de orçamentos como o orçamento paramétrico, o orçamento para registro da incorporação em condomínio pela NBR 12721 e o orçamento discriminado (ABNT, 2006).

### **2.4.1 Identificação e levantamento de quantidades**

Dias (2011) explica que embasado nos projetos e especificações da edificação, é necessário definir os serviços necessários assim como suas respectivas quantidades. Mattos

(2006) reforça que a identificação dos serviços é a origem da quantificação, e que o levantamento de quantitativos é um dos principais aspectos do orçamento, que inclui cálculos com base nos projetos.

#### **2.4.2 Orçamento Paramétrico**

Caracteriza González (2008), orçamento paramétrico como um orçamento aproximado, ideal para análises iniciais de viabilidade de construção e consulta para clientes. Sem projetos definidos, esse tipo de orçamento é baseado apenas na concepção inicial da edificação e serve como estimativa do custo total. Os valores unitários são obtidos por obras anteriormente realizadas ou também por órgãos indicadores, como o Custo Unitário Básico (CUB) e o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI).

#### **2.4.3 Orçamento pela NBR 12721**

Considerando as disposições e exigências da Lei Federal 4.591/64, a NBR 12721 estabelece critérios para avaliação de custos unitários, cálculo do rateio de construção, assim como outras disposições necessárias. Explica também a Norma que sua aplicação se dá aos edifícios com unidades autônomas em pavimentos, conjunto de residências unifamiliares isoladas ou geminadas, edificações de incorporação imobiliária e edificações que possuem forma condominial (ABNT, 2006).

Segundo González (2008), para esse tipo de orçamento o CUB é utilizado por meio de ponderações conforme as características da edificação, e sua função é um detalhamento para registro em cartório de modo que exista um parâmetro de controle da obra tanto para os condôminos quando para os construtores.

#### **2.4.4 Orçamento Discriminado**

Trata-se de um orçamento extremamente detalhado, contendo uma relação completa de serviços e atividades necessários para a execução da edificação, conforme explica González (2008). As quantidades são determinadas por meio do projeto, geralmente são subdivididos em tipos de serviços e os preços unitários são obtidos por meio de composição de custos, que relaciona quantidade e custo unitário de cada material, mão de obra ou equipamento.

A melhor forma de obter dados para a composição de custos é realizando levantamentos em obras, de modo a obter o consumo de acordo com a mão de obra local e

condições em que são produzidas, porém afirma González (2008) que geralmente essas composições são realizadas por meio de materiais de publicações. A composição é formada por cada material necessário para a produção de algum item da obra, sua respectiva quantidade, custo unitário e custo parcial.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia apresentada a seguir tem como finalidade demonstrar os métodos aplicados para o desenvolvimento do estudo de caso desse trabalho. A partir do projeto arquitetônico, foi realizado o dimensionamento de dois modelos que foram analisados, um utilizando o sistema de lajes nervuradas e o outro o sistema de lajes *Bubbledeck*.

Após, foram estabelecidos os valores de cargas permanentes e variáveis, características dos materiais e parâmetros de projeto, para então realizar o pré-dimensionamento e dimensionamento da estrutura de cada um dos modelos. O desenvolvimento contou com o auxílio de um *software* de dimensionamento para estruturas de concreto armado. Por fim, foi realizada uma análise comparativa técnica e de custos entre os modelos desenvolvidos, com a finalidade de verificar a diferença entre os carregamentos totais, comparar as seções dos pilares obtidas, confrontar o pé direito adquirido, assim como os quantitativos e custos de concreto, aço, fôrmas, cubetas e esferas plásticas necessários para a execução da estrutura.

#### 3.1 *MODELOS*

O mesmo projeto arquitetônico foi dimensionado com dois sistemas diferentes de lajes. O primeiro, composto pelo sistema de lajes nervuradas, denominado Modelo Nervurada, e o outro composto pelo sistema de lajes *Bubbledeck*, denominado então Modelo *Bubbledeck*. Salienta-se que ambos os modelos foram dimensionados utilizando-se da mesma concepção estrutural, respeitando para cada um, suas características, peculiaridades, pré-dimensionamento, dimensionamento e otimização. Foi utilizada junta de dilatação em ambos modelos devido ao fato do edifício possuir geometria com um de seus lados maior de 30 m. Os maiores vãos livres necessários para a edificação são de aproximadamente 12 m. É importante lembrar que as fundações da edificação não foram consideradas. Ainda, ressalta-se que os lances de escadas e rampas foram desconsiderados do projeto, sendo no local, lançados apenas lajes, conforme o sistema da cada um dos modelos.

#### 3.2 *CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO*

##### 3.2.1 **Caracterização do edifício**

O projeto arquitetônico, estudo de caso do presente trabalho, foi elaborado por um engenheiro civil, que solicitou não ser identificado. Esse projeto consiste em um edifício

garagem de oito pavimentos, localizado da região central da cidade de Caxias do Sul, estado do Rio Grande do Sul. Com 11.873,90 m<sup>2</sup> de área a ser construída a altura total de 23,6 m, o edifício será localizado em um terreno com 44.550,00 m<sup>2</sup>. O projeto em questão passou por uma adaptação arquitetônica, para que a mesma não influenciasse nas análises dos modelos analisados. A planta baixa arquitetônica do pavimento tipo está presente no Apêndice A.

### 3.2.2 Parâmetros de projeto

Seguindo as especificações da NBR 6118 e considerando o ambiente urbano de agressividade moderada em que a edificação será inserida, foi empregada a CAA II para a determinação dos parâmetros de projeto. Portanto, como pode ser verificado na Tabela 6, o valor de cobrimento nominal para as lajes foi de 25 mm, para vigas, pilares e elementos em contato com o solo de 30 mm (ABNT, 2014).

Tabela 6 - Cobrimento nominal dos elementos

lajes	25 mm
vigas e pilares	30 mm

Fonte: Autora (2019).

Para ambos os modelos, o concreto adotado inicialmente foi o C30, cujo  $f_{ck}$  é 30 MPa, e após o primeiro dimensionamento esse valor foi aumentado até que as estruturas estivessem otimizadas e com todos os esforços resistidos, obtendo-se então a utilização do concreto C40, cujo  $f_{ck}$  é 40 MPa. Ainda, o aço utilizado em ambos os modelos foi do tipo CA50 e CA60 com barras nervuradas. Esses valores podem ser observados na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 - Parâmetros de concreto e aço

CAA	II
$f_{ck}$	40 MPa
aço	CA50 e CA60

Fonte: Autora (2019).

Para a determinação da velocidade característica do vento na região que compreende a edificação, levou-se em consideração os parâmetros da NBR 6123 (ABNT, 1988). Foi adotado

para a velocidade básica do vento ( $v_0$ ) o valor de 45 m/s, de acordo o mapa de isopletas. Para fator topográfico S1 foi adotado o valor de 1, relativo à terrenos planos ou fracamente acidentados. Já o fator S2 de rugosidade do terreno, dimensões e altura da edificação, foi calculado para cada altura da edificação levando em consideração que a edificação se enquadra na Categoria V e Classe B. O fator estatístico S3 foi considerado com valor 1, relativo às edificações para garagem. A Tabela 8 apresenta de forma sintética os parâmetros de vento que foram considerados no dimensionamento do Modelo Nervurada e do Modelo *Bubbledeck*.

Tabela 8 - Parâmetros do vento

$v_0$	45 m/s
S1	1
S2	determinado para cada altura
S3	1

Fonte: Autora (2019).

### 3.2.3 Carregamentos

Para a determinação das cargas permanentes, relativas ao peso específico de cada material apontado pela NBR 6120 foram utilizados os valores conforme Tabela 9 (ABNT, 1980). Já para o carregamento proveniente do telhado, composto por telha de fibrocimento ondulada e estrutura de madeira, incluindo tesoura, terças, caibros e ripas, considerou-se o valor de 0,5 kN por m<sup>2</sup> de telhado na superfície horizontal, sendo esse o valor de carregamento para terraço inacessível a pessoas, conforme especificado pela NBR 6120 (ABNT, 1980). Ainda, as aberturas foram desconsideradas do cálculo das cargas da edificação, por questões de simplificação, mantendo somente o peso da alvenaria, valor esse que compensa o peso das esquadrias. Para as cargas acidentais do edifício, também determinadas pela NBR 6120, que são de acordo com o uso da edificação, adotou-se os valores conforme Tabela 10 (ABNT, 1980).

Tabela 9 - Pesos específicos

Alvenaria	13 kN/m <sup>3</sup>
Concreto armado	25 kN/m <sup>3</sup>

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6120:1980.

Tabela 10 - Cargas acidentais

Ocupação	Carga (kN/m <sup>2</sup> )
Garagens e estacionamentos	3
Escadas com acesso ao público	3
Casa de máquinas	7,5

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 6120:1980.

### 3.3 SOFTWARE

O *software* utilizado no estudo de caso do presente trabalho foi o *Eberick V9*, da empresa AltoQi. Trata-se de um programa de dimensionamento, detalhamento, modelagem e análise de estruturas de concreto armado, que realiza verificações de acordo com as normas brasileiras em vigor, conferindo o ELU e ELS. O *software* também gera memorial de cálculo e critérios de projeto, pranchas de detalhamentos e resumo de materiais.

O *Software Eberick* dimensiona as vigas e os pilares da estrutura de um pórtico espacial considerando esses elementos como barras. Já para as lajes o dimensionamento é realizado pelo método de analogia as grelhas, onde elas são desmembradas em diversas vigas ortogonais e o painel como um todo é analisado trabalhando de forma integrada, alcançando valores bastante aproximados ao método dos elementos finitos.

Esse *software* considera análise de segunda ordem através do processo P-delta, um método iterativo que utiliza esforços horizontais para simular o momento fletor provocado pelo deslocamento da estrutura, ocasionado pelos esforços horizontais. Também, o *software* fornece valores do coeficiente Gama-Z, que define se a estrutura se comporta como nós fixos ou móveis, e determina o quão significativo são os esforços de segunda ordem para determinar se seus efeitos devem ou não ser desprezados.

### 3.4 DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA

#### 3.4.1 Pré-dimensionamento

##### 3.4.1.1 Lajes

Para o pré-dimensionamento de lajes nervuradas, Alva (2014) recomenda a utilização da Equação 4, conforme especificado a seguir, onde  $hl$  é a altura total da laje e  $L$  é o seu menor vão efetivo.

$$hl \approx \frac{L}{30} \text{ (cm)} \quad (4)$$

Já, o pré-dimensionamento de lajes *Bubledeck*, é realizado conforme a Tabela 5 desse trabalho, de acordo com o vão efetivo, conforme recomendações do fabricante.

#### 3.4.1.2 Vigas

Alva (2014) sugere que para o pré-dimensionamento de vigas de concreto armado a Equação 5 seja utilizada, onde  $hv$  trata-se da altura da viga e  $L$  o vão efetivo da viga.

$$hv \approx \frac{L}{12} \text{ a } \frac{L}{10} \text{ (cm)} \quad (5)$$

#### 3.4.1.3 Pilares

De acordo com Baroni e Viero (2007), o pré-dimensionamento da área da seção de concreto dos pilares pode ser realizado a partir da Equação 6, onde  $A_c$  trata-se da área da seção de concreto ( $b \times h$ ),  $f_c$  é a resistência do concreto,  $\beta$  o coeficiente de majoração da força normal e  $N$  a carga do pilar.

$$A_c = \frac{\beta x N}{f_c} \text{ (cm}^2\text{)} \quad (6)$$

A resistência  $f_c$  do concreto deve ser a resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ) minorada, conforme apresentado na Equação 7 (BARONI; VIERO, 2007).

$$f_c = \frac{f_{ck}}{1,4} \text{ (kN/cm}^2\text{)} \quad (7)$$

A carga do pilar ( $N$ ) pode ser calculada por meio do processo de área de influência de cada um dos pilares conforme Equação 8, onde  $A$  é a área de influência do pilar,  $c$  é a carga por unidade de área ( $8 \text{ kN/m}^2$ ) e  $n$  é o número de pavimentos acima do nível em que está sendo realizado o pré-dimensionamento (BARONI; VIERO, 2007).



$$N = A x c x n \text{ (kN/cm}^2\text{)} \quad (8)$$

Ainda conforme Baroni e Viero (2007), o coeficiente  $\beta$  leva em consideração as determinações normativas relativas ao dimensionamento à flexo-compressão em pilares, onde:

- a)  $\beta = 1,3$  para pilar central ou de extremidade na direção da maior dimensão;
- b)  $\beta = 1,5$  para pilar de extremidade na direção da menor dimensão;
- c)  $\beta = 1,8$  para pilar de canto.

### 3.4.2 Dimensionamento dos modelos

Ambos os modelos foram dimensionados empregando o uso do *Software Eberick V9*. Foram definidos todos os parâmetros de projeto, estabelecidos conforme anteriormente mencionado. Também foram considerados os valores das cargas permanentes e cargas variáveis.

Para os dois modelos, primeiramente foram realizados os lançamentos das estruturas considerando-se apenas o uso de vigas de bordas e devido ao não atendimento dos deslocamentos máximos, optou-se por fazer uso também de vigas internas. Inicialmente, todos os elementos foram lançados no *software* de acordo com os pré-dimensionamentos realizados anteriormente e, após análises, esses elementos passaram pelo processo de otimização, para que as estruturas fossem as mais econômicas possíveis e, principalmente, resistissem a todos os esforços necessários.

Para otimizar automaticamente o detalhamento dos elementos o *software* possui um coeficiente de escolha de armaduras a ser definido de 1 a 6, onde quanto maior o valor do coeficiente, maior será a importância desse parâmetro relativo ao detalhamento dos elementos. Para ambos os modelos e ainda considerando para lajes, vigas e pilares, aplicou-se o valor de 6 para o coeficiente de área de aço, onde o programa seleciona a armadura com a bitola que proporcionar a área de aço mais próxima a área calculada e aplicou-se o valor de 2 para o coeficiente de quantidade e de diâmetro de barras, onde o programa seleciona a armadura com menor número de barras para proporcionar redução na mão de obra e a armadura com menor diâmetro para proporcionar facilidade de dobra, respectivamente.

Para o Modelo Nervurada, foi realizado o dimensionamento das lajes com diversas tipologias de cubetas, conforme apresentado pelo fabricante, até que se obtivesse um modelo

ótimo, atendendo todos os requisitos da estrutura. A cubeta utilizada por fim a B40/80/80, que possui altura de 40 cm.

As lajes do Modelo *Bubbledeck* foram consideradas e dimensionadas como lajes maciças, onde adotou-se uma redução do peso próprio do concreto que acaba por proporcionar também uma redução na resistência ao esforço cortante. Ainda, foi realizada uma redução da rigidez, diminuindo a espessura de lançamento da laje e adicionando carregamento extra referente a redução da espessura. Portanto, as lajes adotadas foram do tipo BD230, que possuem 23 cm de altura total, conforme Tabela 5. Essas lajes foram lançadas com espessura de 20 cm e com carregamento adicional de 75 kgf/m<sup>2</sup>, relativo ao peso dos 3 cm que foram reduzidos do lançamento com o objetivo de reduzir a rigidez e com a utilização de um concreto com 1610 kgf/m<sup>3</sup> de peso específico. Todos os valores de redução se deram de acordo com a espessura de laje adotada, conforme indicado na Tabela 4 e Tabela 5 do presente trabalho, que se tratam de recomendações fornecidas pelo fabricante.

### 3.5 ORÇAMENTAÇÃO

Com o auxílio de planilhas do *Excel* e dos relatórios emitidos pela *Software Eberick*, foram quantificados volume de concreto, área de aço e área de fôrmas, de vigas, lajes e pilares da edificação, assim como o número de cubetas para o Modelo Nervurada e o número de esferas plásticas para o Modelo *Bubbledeck*. A orçamentação foi realizada com o auxílio das planilhas do SINAPI da base de março de 2019 e referências bibliográficas, devido ao nível de exatidão necessário para a obtenção dos resultados.

### 3.6 APRECIÇÃO DOS RESULTADOS

Após o dimensionamento e obtenção dos resultados, foram analisados os dados de carregamentos totais da estrutura, as seções dos pilares e pé direito de ambos os modelos, assim como o orçamento de custo dos materiais mencionados, estimado para cada uma das estruturas, para ser apresentada a possível vantagem na utilização das lajes do tipo *Bubbledeck* para obtenção de grandes vãos livres, quando comparado com as lajes nervuradas, em edificações semelhantes à edificação do estudo de caso.

## 4 RESULTADOS

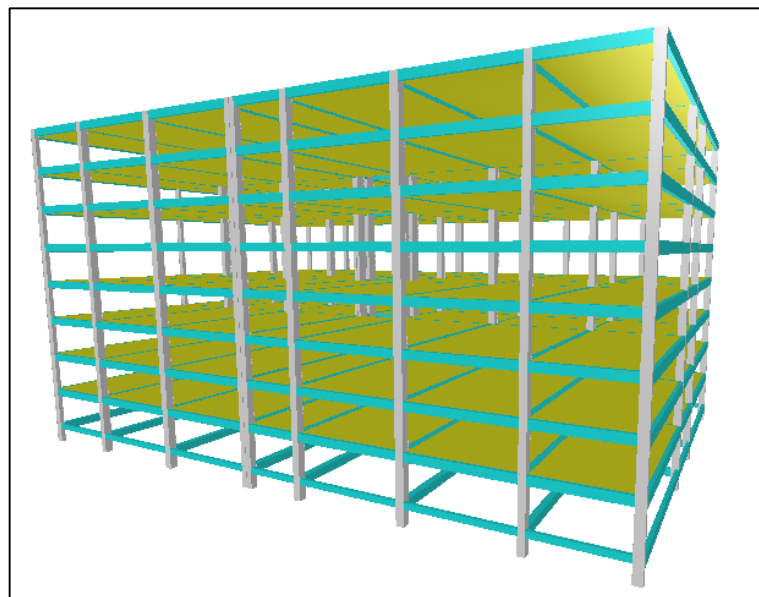
### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os resultados apresentados a seguir são provenientes dos relatórios emitidos após o dimensionamento das estruturas do Modelo Nervurada e do Modelo *Bubbledeck* pelo software *Eberick*. Os parâmetros apresentados para ambos os modelos são de carregamentos totais dos pilares na fundação, seções dos pilares, pé direito, quantitativos de concreto, aço, fôrmas, cubetas e esferas, assim como o orçamento para os materiais citados.

### 4.2 MODELO NERVURADA

Com o Modelo Nervurada dimensionado e otimizado obteve-se o pórtico 3D da estrutura, conforme apresentado da Figura 18. A planta de fôrmas do pavimento tipo desse modelo pode ser verificada no Apêndice B.

Figura 18 - Pórtico 3D - Modelo Nervurada



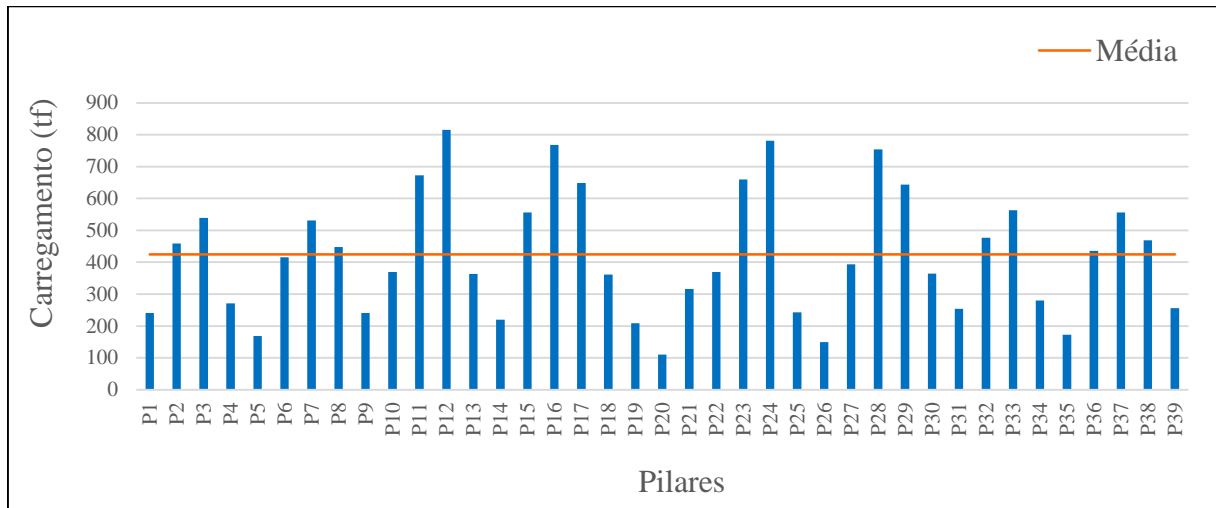
Fonte: Autora (2019).

#### 4.2.1 Carregamentos totais dos pilares

A Figura 19 apresenta os valores dos carregamentos de cada um dos 39 pilares na fundação. Observa-se que o carregamento máximo é de 815 tf e se encontra no pilar P12, que possui dimensões de 50 x 65 cm. Já o carregamento mínimo é de 110,43 tf e se refere ao pilar

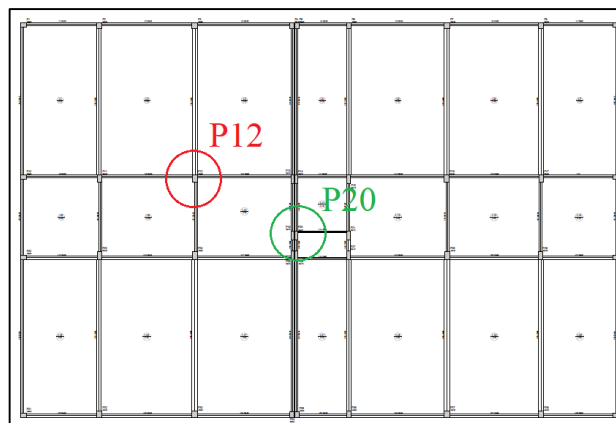
P20, de dimensões 25 x 90 cm. A localização desses pilares, pode ser verificada na Figura 20. Ainda é possível verificar a média de carregamento entre todos os pilares, que possui o valor de 424,04 tf.

Figura 19 - Carregamento total dos pilares (tf) - Modelo Nervurada



Fonte: Autora (2019).

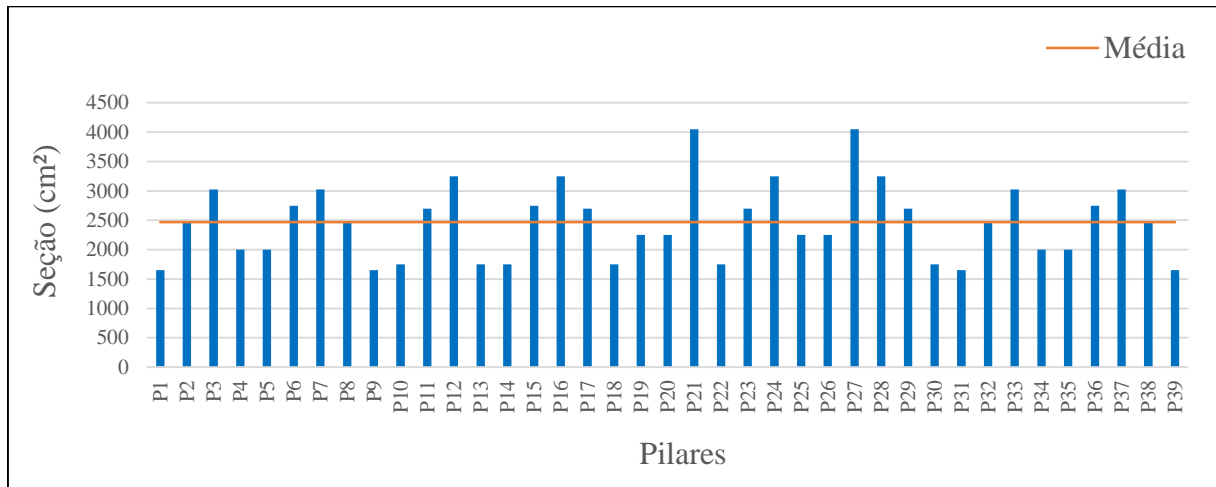
Figura 20 - Localização pilares P12 e P20



Fonte: Autora (2019).

#### 4.2.2 Seções dos pilares

Os valores das seções dos 39 pilares da edificação são exibidos na Figura 21. Nota-se que a média desses valores entre todos os pilares é de 2468 cm<sup>2</sup> e, ainda, que há alguns pilares com valores de picos máximos e mínimos, não havendo homogeneidade em suas seções.

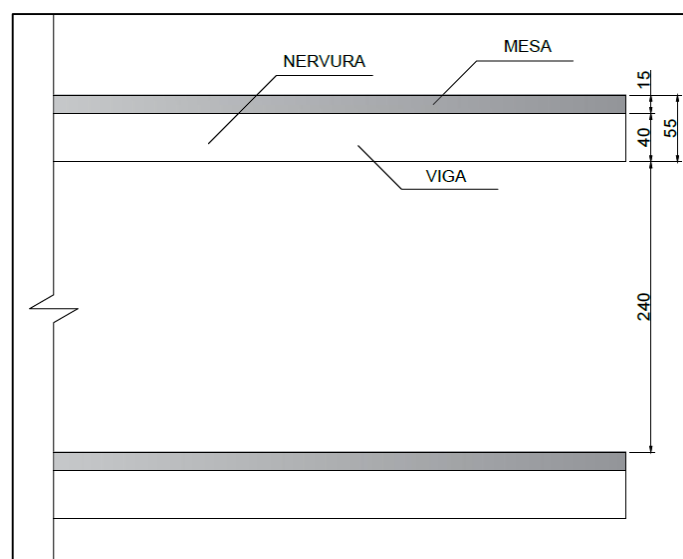
Figura 21 - Seção dos pilares (cm<sup>2</sup>) - Modelo Nervurada

Fonte: Autora (2019).

#### 4.2.3 Pé direito

Para esse modelo, o pé direito obtido foi de 2,40 m, conforme pode ser verificado na Figura 22. Esse valor leva em consideração 15 cm de espessura de mesa das lajes e 40 cm de altura das suas nervuras. Salienta-se ainda que todas as vigas relativas a esse modelo possuem 55 cm de altura, onde passam a ser embutidas nas lajes e não trazem alterações no pé direito da edificação.

Figura 22 - Pé direito - Modelo Nervurada



Fonte: Autora (2019).

#### 4.2.4 Quantitativos

Os quantitativos referentes ao volume de concreto, peso de aço e área de fôrmas totais da edificação para os elementos vigas, lajes e pilares, são apresentados conforme Tabela 11. Ressalta-se que não se faz necessário o uso de fôrmas para as lajes desse sistema construtivo, devido ao fato da concretagem ser realizada apenas com o auxílio de cubetas, que podem ser alugadas ou compradas pelo executor da obra.

Tabela 11 - Quantitativo de materiais – Modelo Nervurada

	<b>Viga</b>	<b>Pilar</b>	<b>Laje</b>
Concreto C40 (m <sup>3</sup> )	771,60	241,60	3396,40
Aço + 10% (kg)	84806,70	38109,90	182185,70
Fôrmas (m <sup>2</sup> )	6395,80	2005,50	0,00

Fonte: Autora (2019).

Os quantitativos totais de cubetas e de meias cubetas necessárias para esse modelo, são apresentados conforme Tabela 12. Essas cubetas são do tipo B40/80/80, com medidas especificadas pelo fabricante, conforme apresentado na Tabela 13, identificado pela Figura 23.

Tabela 12 - Quantitativo de cubetas

<b>Tipologia</b>	<b>Qntd. (unid.)</b>
Cubeta B40/80/80	14544
Cubeta B40/40/80	1170
Cubeta B40/80/40	808

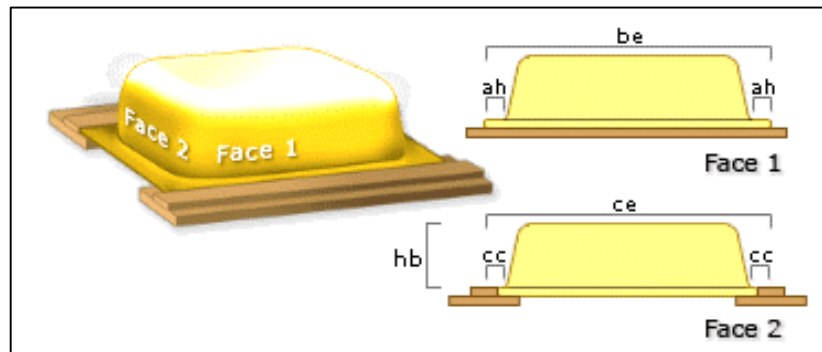
Fonte: Autora (2019).

Tabela 13 - Dimensões da cubeta B40/80/80

<b>B40/80/80</b>	
hb	40 cm
be	80 cm
ce	80 cm
cc	6,2 cm
ah	6,2 cm

Fonte: Autora (2019).

Figura 23 - Especificações de dimensões das cubetas



Fonte: Software Eberick (2019).

#### 4.2.5 Orçamentação

O orçamento desse modelo foi realizado utilizando os valores de referência das tabelas SINAPI do estado do Rio Grande do Sul, com base do mês de março de 2019. Ressalta-se que foram considerados somente os insumos, de valores desonerados, conforme apresentado na Tabela 14. O custo total dos insumos necessários para a execução do edifício, utilizando o sistema de lajes nervuradas, conforme apresentado no orçamento é de R\$ 3.245.437,30.

Tabela 14 - Custos totais de insumos - Modelo Nervurada

(continua)					
Referência SINAPI	Material	Unid.	Quant.	Preço Unitário (R\$)	Preço total (R\$)
00033	Aço CA50 $\phi$ 8 - Vergalhão	kg	98219	5,53	543151
00034	Aço CA50 $\phi$ 10 - Vergalhão	kg	40292,2	4,71	189776
00031	Aço CA50 $\phi$ 12,5 - Vergalhão	kg	84993,9	4,48	380773
00027	Aço CA50 $\phi$ 16 - Vergalhão	kg	54465,3	4,48	244005
00029	Aço CA50 $\phi$ 20 - Vergalhão	kg	25410,9	4,19	106472
00039	Aço CA60 $\phi$ 5 - Vergalhão	kg	1720,9	4,67	8036,6
	Concreto usinado bombeável -				
34496	C40, com brita 0 E 1, Slump 100 +/- 20 mm	m <sup>3</sup>	4409,6	328,6	1448995

(conclusão)

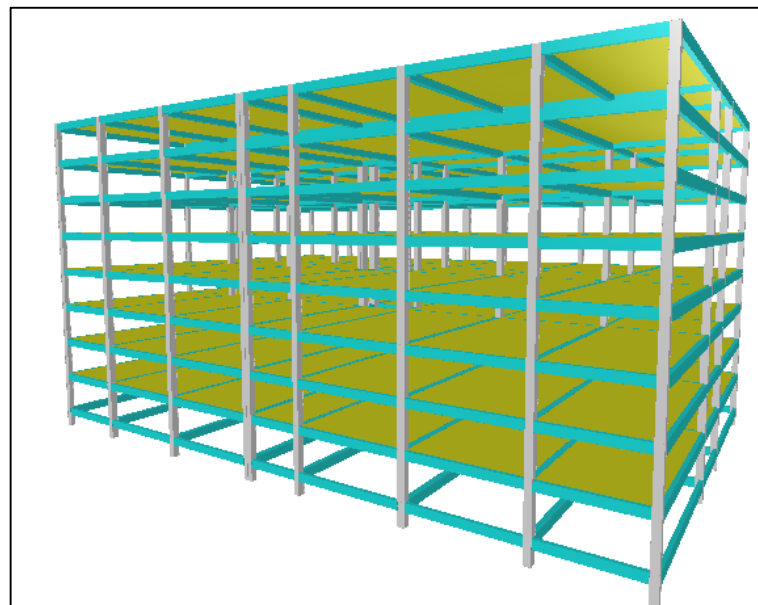
	Chapa de madeira compensada				
01358	resinada para fôrma de concreto e = 17 mm	m <sup>2</sup>	8401,3	26,21	220198
	Locação de fôrma plástica				
40290	para laje nervurada, dimensões 60x60x16 cm (2074 unid.)	mês	4	12,54	104032

Fonte: Autora (2019).

#### 4.3 *MODELO BUBBLEDECK*

Com o Modelo *Bubbledeck* dimensionado e otimizado obteve-se o pórtico 3D da estrutura, conforme apresentado da Figura 24. A planta de fôrmas desse modelo pode ser verificada no Anexo C desse trabalho. Ainda, é importante ressaltar que as lajes desse modelo foram lançadas com dimensão diferente de sua dimensão real, como indicado pelo fabricante e conforme especificado na metodologia, para que os parâmetros de reduções do sistema fossem atendidos.

Figura 24 - Pórtico 3D - Modelo *Bubbledeck*



Fonte: Autora (2019).

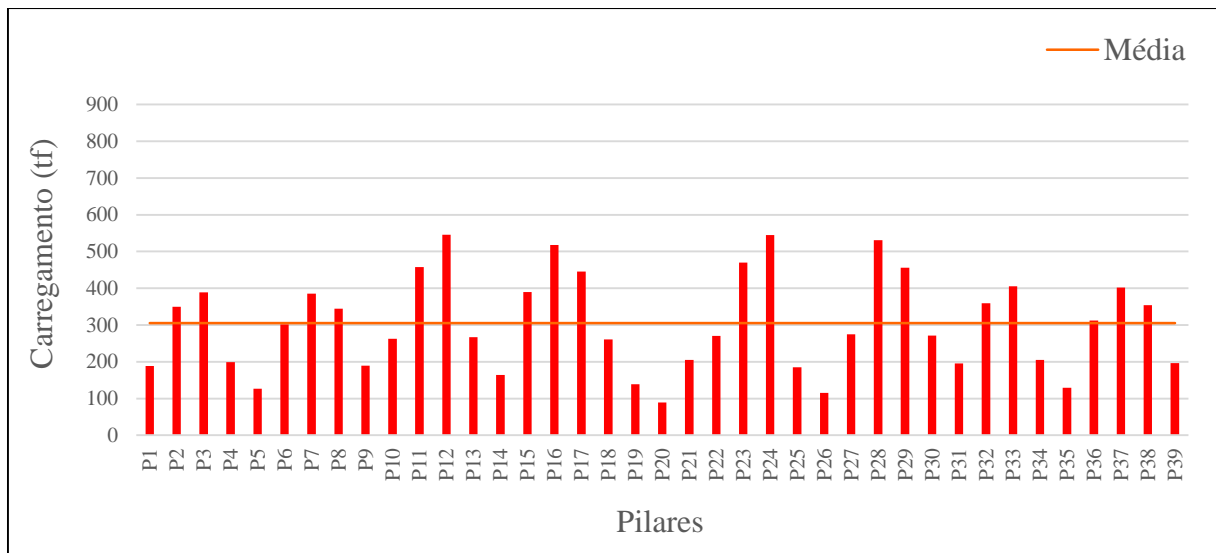


### 4.3.1 Carregamentos totais dos pilares

Na Figura 25 são apresentados os valores dos carregamentos dos 39 pilares na fundação. Nota-se que o carregamento máximo é de 545,15 tf no pilar P12 que possui dimensões 40 x 60 cm, e que o carregamento mínimo é de 89,34 tf no pilar P20, de dimensões 25 x 70 cm.

Ainda, é pertinente salientar que os pilares com carregamentos máximos e mínimos se mantiveram os mesmos em ambos os modelos, sua localização pode ser observada conforme Figura 20, apresentada anteriormente. Do mesmo modo foi verificado que a média de carregamento entre os pilares da edificação para esse modelo é de 304,87 tf.

Figura 25 - Carregamento total dos pilares (tf) - Modelo *Bubbledeck*

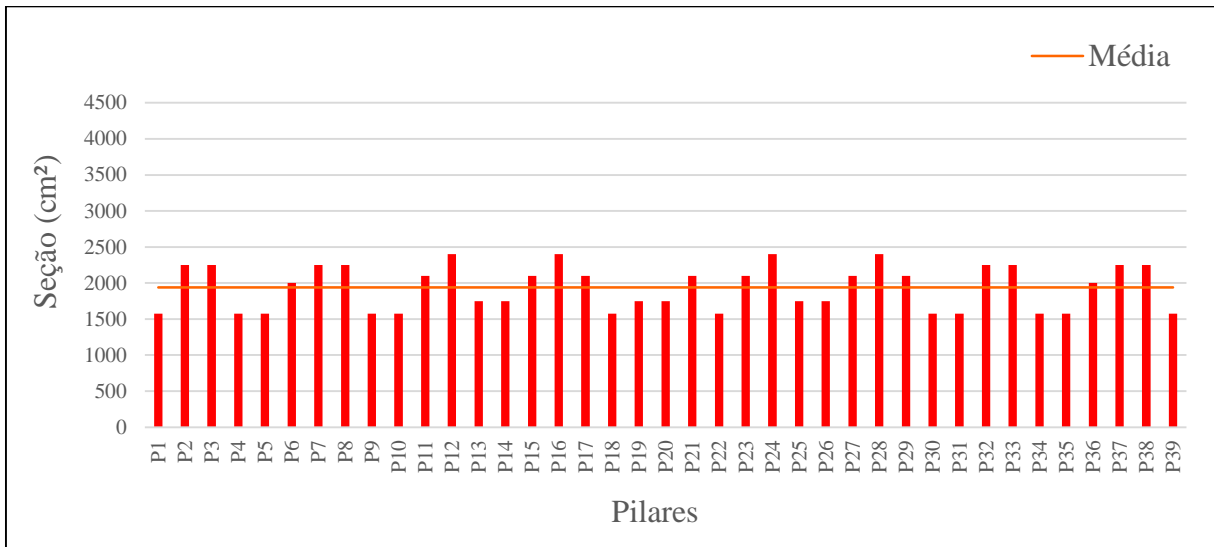


Fonte: Autora (2019).

### 4.3.2 Seções dos pilares

A Figura 26 apresenta os valores das seções dos 39 pilares presentes na edificação, podendo ser observado que a média entre esses valores é de 1941 cm<sup>2</sup>. Do mesmo modo é importante atentar que os pilares possuem valores de seção mais homogêneas que o modelo apresentado anteriormente, não havendo a presença de numerosos picos máximos e mínimos para esse parâmetro analisado.

Figura 26 - Seção dos pilares (cm<sup>2</sup>) - Modelo *Bubbledeck*

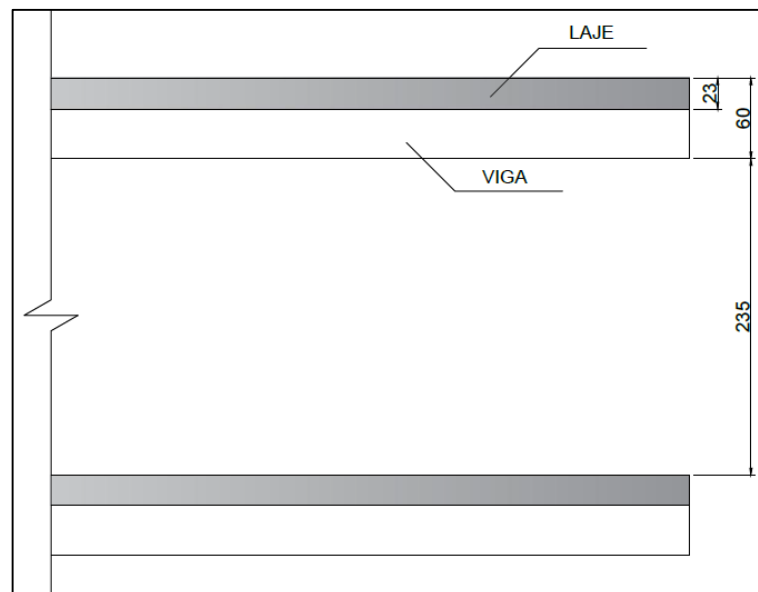


Fonte: Autora (2019).

### 4.3.3 Pé direito

Para o Modelo *Bubbledeck* utilizou-se a tipologia de laje B230, que possui altura de 23 cm. Além disso, deve-se considerar que as vigas mais altas desse modelo possuem 60 cm, não sendo embutidas nas lajes. Portanto, conforme apresentado na Figura 27, observa-se que o pé direito da edificação é de 2,35 m quando analisado embaixo das vigas.

Figura 27 - Pé direito - Modelo *Bubbledeck*



Fonte: Autora (2019).

#### 4.3.4 Quantitativos

Para esse modelo, são apresentados na Tabela 15 os quantitativos referentes ao volume de concreto, peso de aço e área de fôrmas totais da edificação para vigas, lajes e pilares. O volume de concreto ocupado pelas esferas plásticas a serem inseridas na laje foi abatido do volume total de concreto apresentado pelos relatórios emitidos do *software*. Igualmente, o volume de concreto referente aos 3 cm de espessura desprezado no lançamento, foi adicionado ao valor dos relatórios, para a obtenção dos valores apresentados quantitativo.

É pertinente destacar que para o sistema de lajes utilizado nesse modelo é necessário que se faça a compra dessas esferas plásticas a serem embutidas permanentemente na laje. A quantidade de esferas necessárias para a edificação é conforme apresentada na Tabela 16, e tiveram como seus valores de referência os parâmetros sugeridos pelo fabricante, em concordância com o apresentado na Tabela 5.

Tabela 15 - Quantitativo de materiais

	<b>Viga</b>	<b>Pilar</b>	<b>Laje</b>
Concreto C40 (m <sup>3</sup> )	756,30	190,00	1707,54
Aço + 10% (kg)	91282,00	36670,90	122201,60
Fôrmas (m <sup>2</sup> )	6482,00	1782,10	10751,70

Fonte: Autora (2019).

Tabela 16 - Quantitativo de esferas

<b>Tipologia</b>	<b>Qntd. (unid.)</b>
Esferas $\phi$ 18cm	250669

Fonte: Autora (2019).

#### 4.3.5 Orçamentação

Para a realização da orçamentação desse modelo, empregou-se os valores de referência das tabelas SINAPI do estado do Rio Grande do Sul, com base do mês de março de 2019. Foram considerados somente os insumos, de valores desonerados, conforme apresentado na Tabela 17.

Além disso, os valores das esferas plásticas incorporadas ao concreto, que caracterizam o sistema de lajes *Bubbledeck* teve como referência de precificação conforme indicado por Osbel (2018), devido à inexistência de retorno do fabricante. O custo total de aço,

concreto, fôrmas e esferas necessários para a execução do edifício, utilizando o sistema de lajes em questão, conforme apresentado no orçamento é de R\$ 2.807.702,32.

Tabela 17 - Custos totais de insumos - Modelo *Bubbledeck*

Referência SINAPI	Material	Unid.	Quant.	Preço Unitário (R\$)	Preço total (R\$)
00033	Aço CA50 $\phi$ 8 - Vergalhão	kg	52603	5,53	290895
00034	Aço CA50 $\phi$ 10 - Vergalhão	kg	80014,3	4,71	376867
00031	Aço CA50 $\phi$ 12,5 - Vergalhão	kg	61432,6	4,48	275218
00027	Aço CA50 $\phi$ 16 - Vergalhão	kg	26768,7	4,48	119924
00029	Aço CA50 $\phi$ 20 - Vergalhão	kg	27760,5	4,19	116316
00039	Aço CA60 $\phi$ 5 - Vergalhão	kg	1575,4	4,67	7357,12
	Concreto usinado bombeável				
34496	- C40, com brita 0 E 1, Slump 100 +/- 20 mm	m <sup>3</sup>	2653,84	328,60	872052
	Chapa de madeira				
01358	compensada resinada para fôrma de concreto e = 17 mm	m <sup>2</sup>	19015,8	26,21	498404
(OSBEL, 2018)	Esferas plásticas $\phi$ 18 cm	un.	250669	1,00	250669

Fonte: Autora (2019).

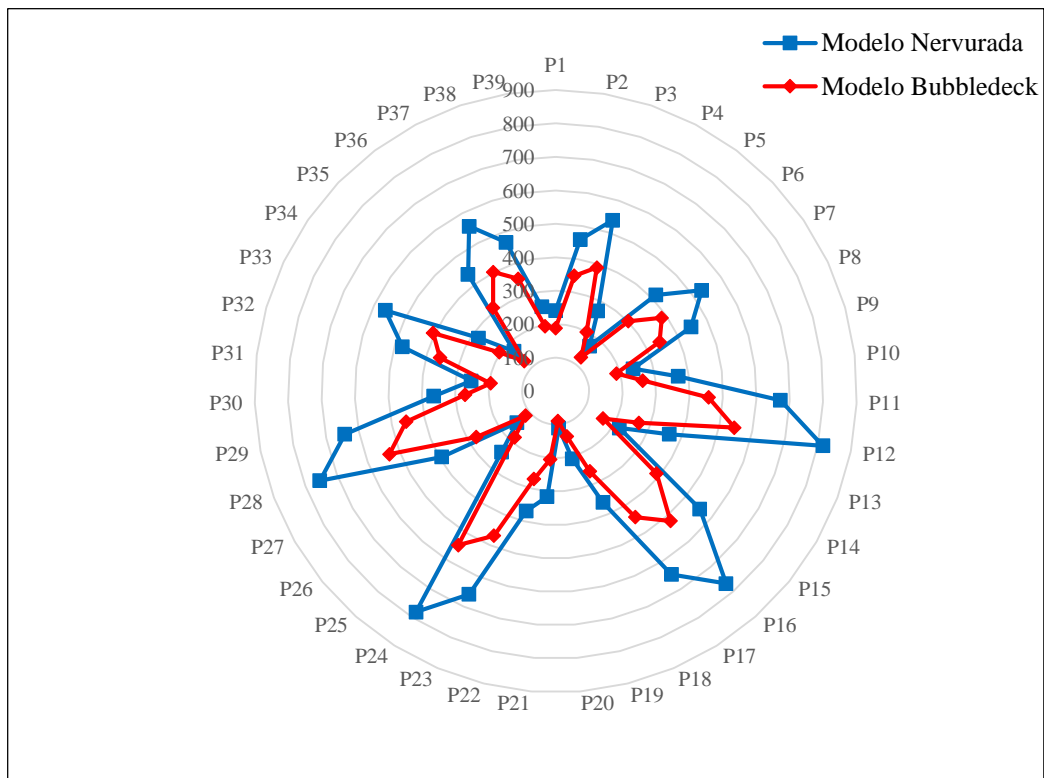
## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir é apresentada uma análise comparativa entre os sistemas de lajes propostos, a partir dos dois modelos desenvolvidos. Essa análise foi realizada baseada nos resultados obtidos, os quais foram apresentados anteriormente.

### 5.1 CARREGAMENTOS TOTAIS DOS PILARES

Foi possível observar que do Modelo Nervurada para o Modelo *Bubbledeck* todos os pilares apresentaram redução no carregamento total, conforme demonstrado na Figura 28. A média relativa aos carregamentos dos 39 pilares passou de 424,04 tf no modelo Nervurada para 304,87 tf no Modelo *Bubbledeck*, valor que corresponde a 28,10 % de redução.

Figura 28 - Análise comparativa dos carregamentos totais dos pilares (tf)



Fonte: Autora (2019).

O pilar P12, cujo possui carregamento máximo em ambos os modelos, passou de 815 tf para 545,15, reduzindo 269,85 tf em seu carregamento, valor que representa uma contração de 33,11 %. Do mesmo modo, o pilar P20, que em ambos os modelos se apresenta como o pilar

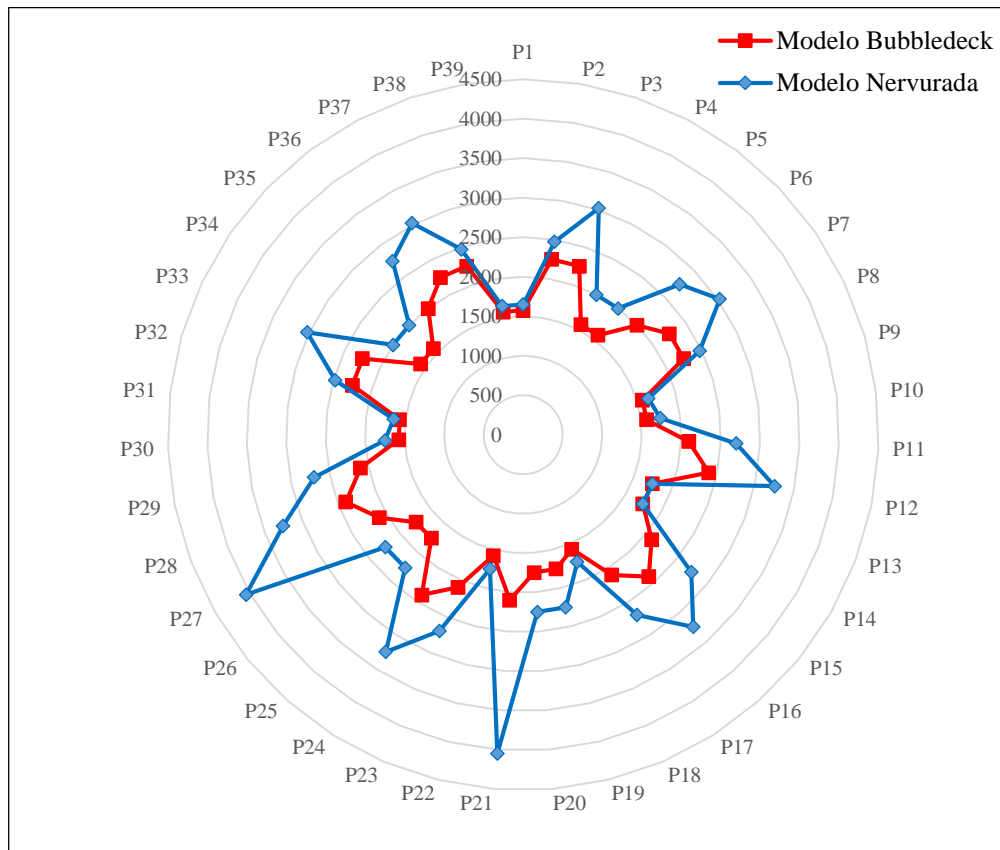
de carregamento mínimo, passou de 110,43 tf para 89,34 tf, diminuindo em 21,09 tf seu carregamento, que corresponde a uma redução de 19,10 %.

A expressiva redução de carregamento dos pilares na fundação, do Modelo Nervurada para o Modelo *Bubbledeck* está relacionada com o fato das lajes do sistema *Bubbledeck* apresentam menor peso específico em consequência da presença das esferas plásticas incorporadas, assim como a menor espessura dos elementos. Além disso, as reduções das seções dos pilares acabam por proporcionar redução no volume de concreto, que ocasionam também redução do peso próprio da estrutura.

## 5.2 SEÇÕES DOS PILARES

Concernente as seções dos pilares, como exposto na Figura 29, nota-se que o Modelo *Bubbledeck* apresentou redução quando comparado com o Modelo Nervurada. A média das seções passou de 2486 cm<sup>2</sup> para 1941 cm<sup>2</sup>, representando uma redução de 21,35 %.

Figura 29 - Análise comparativa das seções dos pilares (cm<sup>2</sup>)

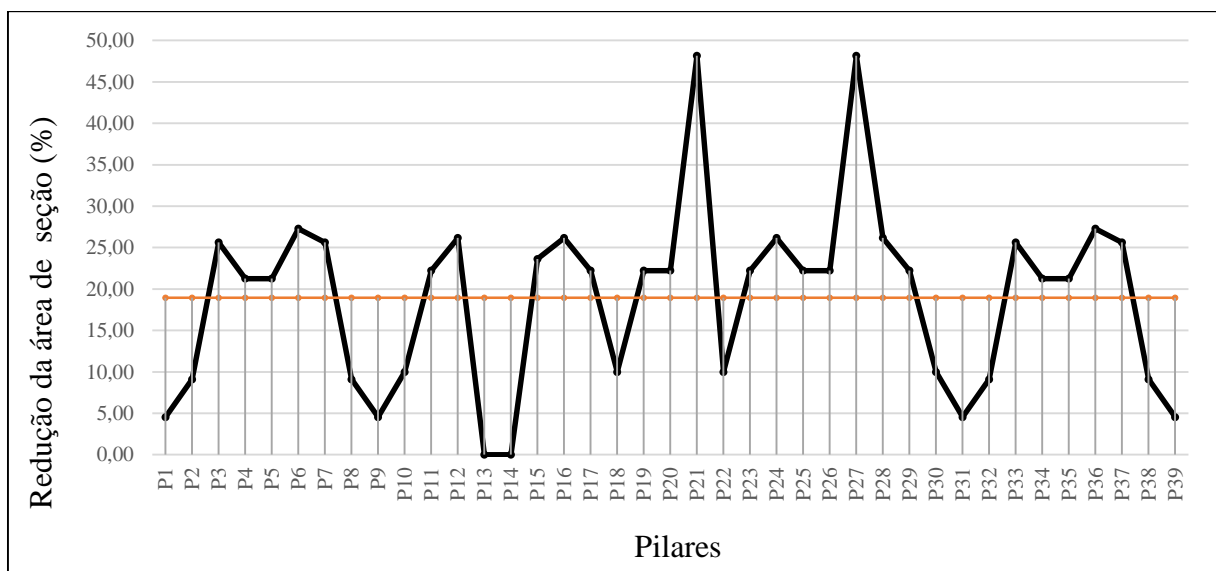


Fonte: Autora (2019).

Referente ao Modelo Nervurada, os pilares de maior seção são o P21 e P27, com 4050 cm<sup>2</sup>, e os de menor seção são os pilares P1, P9, P31 e P39, com 1650 cm<sup>2</sup>. Entretanto, no Modelo *Bubbledeck* os pilares de maior seção são o P12, P16, P24 e P28, com 2400 cm<sup>2</sup> e os de menor seção são o P1, P4, P5, P9, P10, P18, P22, P30, P31, P34, P35 e P39, com 1575 cm<sup>2</sup>. Com isso pode ser ressaltado que no Modelo *Bubbledeck* os pilares de seções muito elevadas tiveram as mesmas reduzidas, da mesma maneira que apresentaram seções mais homogêneas entre si, podendo ser caracterizada pela melhor distribuição de carregamentos na edificação desse modelo, quando em comparação com o Modelo Nervurada.

É possível notar de acordo com a Figura 30, a redução das seções dos pilares do Modelo Nervurada para o Modelo *Bubbledeck*, em porcentagem. A média de redução atingida foi de 18,95%. O pilar P21, assim como o pilar P27 foram os que apresentaram maior porcentagem de redução, dado que no Modelo Nervurada possuíam seção de 4050 cm<sup>2</sup>, de dimensões 45 x 90 cm, e passaram a ter no Modelo *Bubbledeck* seção de 2100 cm<sup>2</sup> e dimensões 30 x 70 cm. Esses valores representam uma redução equivalente a 48,15 % na área de suas seções.

Figura 30 - Porcentagem de redução das seções dos pilares do Modelo Nervurada para o Modelo *Bubbledeck*

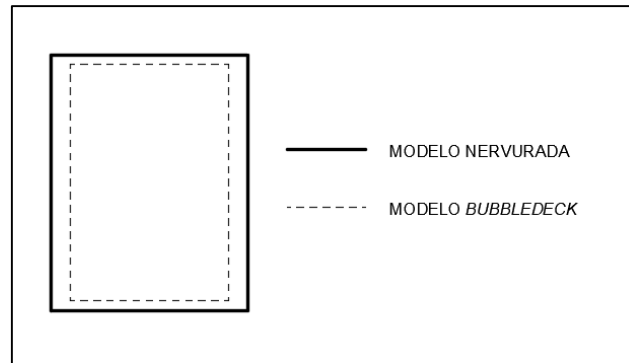


Fonte: Autora (2019).

Conforme apontado na Figura 31, o pilar P12, cujo apresentou-se para ambos os modelos como o pilar de maior carregamento na edificação, passou de uma seção medindo

50x65 cm, com área 3250,00 cm<sup>2</sup> para 40x60 cm, com área de 2400,00 cm<sup>2</sup>, representando uma redução de 26,16% do Modelo Nervurada para o Modelo *Bubbledeck*.

Figura 31 - Seção do pilar P12 no Modelo Nervurada e Modelo *Bubbledeck*

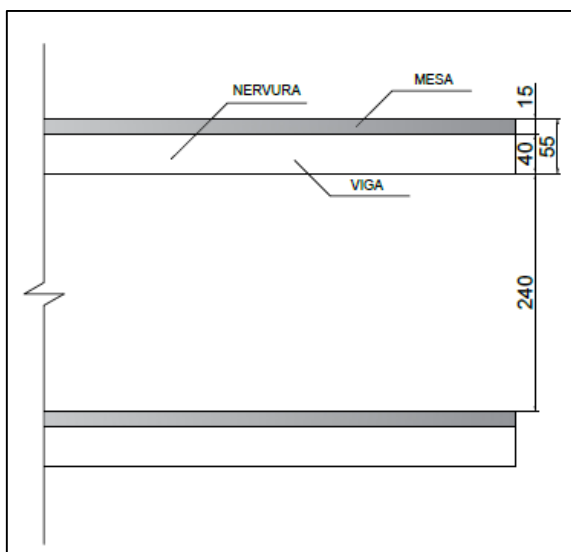


Fonte: Autora (2019).

### 5.3 PÉ DIREITO

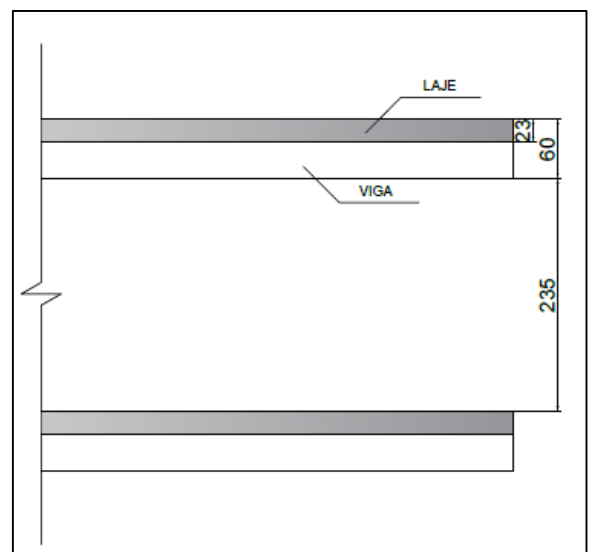
A partir da Figura 32 e da Figura 33, pode-se observar que para os dois modelos analisados há uma diferença de 5 cm no pé direito, quando considerando a análise embaixo da viga. Para o Modelo Nervurada, o valor do pé direito ficou em 2,40 m, e para o Modelo *Bubbledek* o valor do pé direito ficou em 2,35 m. Ambas as alturas são consideradas suficientes para o uso da edificação, não trazendo grandes consequência para a escolha do modelo a ser empregado.

Figura 32 - Pé direito Modelo Nervurada



Fonte: Autora (2019).

Figura 33 - Pé direito Modelo *Bubbledeck*



Fonte: Autora (2019).



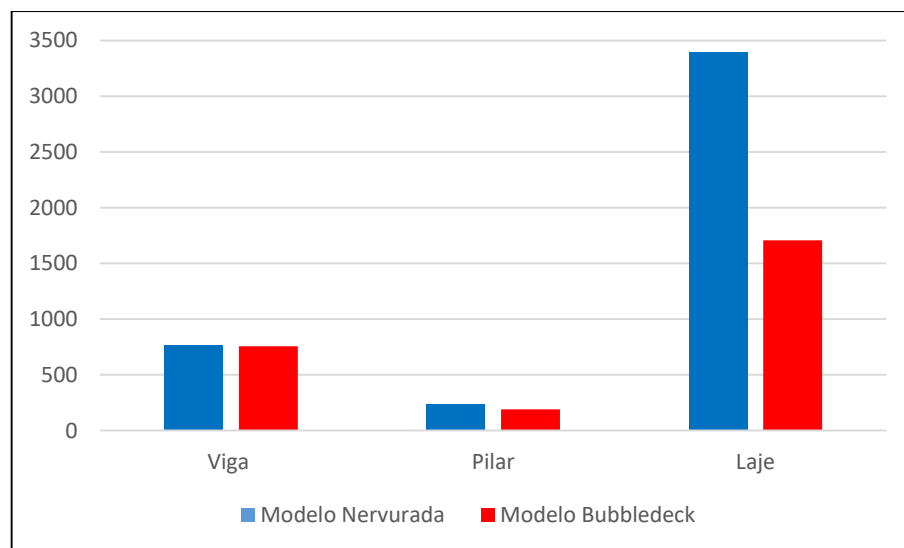
#### 5.4 QUANTITATIVOS

Na Figura 34 é possível observar o volume de concreto total da edificação, de vigas, pilares e lajes, para ambos os modelos. Verifica-se que esse volume de concreto para os elementos vigas e pilares permaneceu semelhante e que a grande distinção se encontra nas lajes.

Do Modelo Nervurada para o Modelo *Bubbledeck* houve uma redução de 1,98% no volume de concreto das vigas, 21,36 % no volume de concreto dos os pilares e 49,73% no volume de concreto para as lajes. Quando observado o volume total de concreto da edificação, no modelo nervurada tem-se 4409,6 m<sup>3</sup> e no modelo *Bubbledeck* esse valor é 2653,84 m<sup>3</sup>, diferença essa correspondente a uma redução de 39,82%.

A redução do volume de concreto do Modelo Nervurada para o Modelo *Bubbledeck* se deve a situação de redução de espessuras e seções dos elementos, que acaba por propiciar também diminuição do peso próprio da estrutura, e consecutivamente reduzindo as suas solicitações de resistência.

Figura 34 - Análise comparativa do volume de concreto (m<sup>3</sup>)

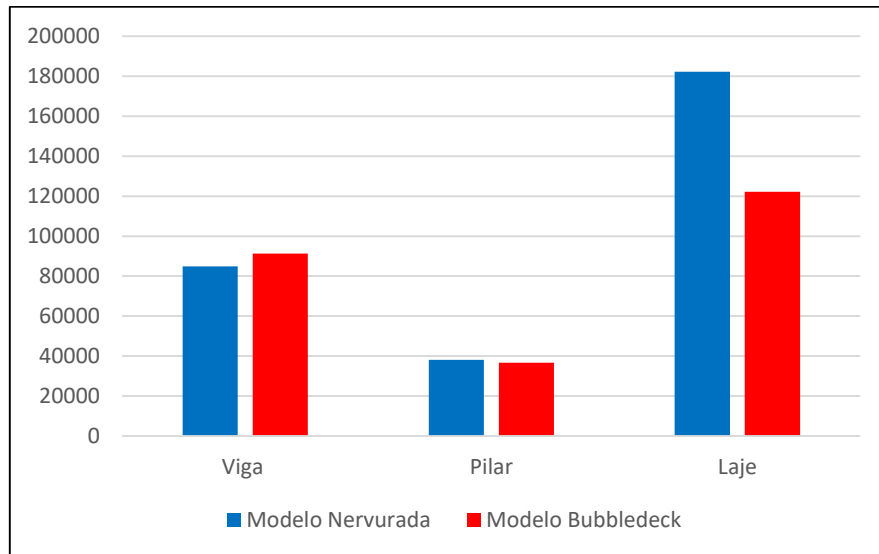


Fonte: Autora (2019).

O peso de aço total da edificação, acrescido em 10%, de vigas, pilares e lajes, para o Modelo Nervurada e para o Modelo *Bubbledeck* pode ser verificado na Figura 35. Assim como o volume de concreto, a maior diferença entre os modelos encontra-se no peso de aço das lajes, que do Modelo Nervurada para o modelo *Bubbledeck* sofre uma redução de 32,92%. Também, os pilares apresentam uma redução de 3,78 %, e as vigas um acréscimo de 7,64 %.

Quando examinado o peso total de aço da edificação de ambos os modelos, temos para o Modelo Nervurada 305.102,3 kg e para o modelo *Bubbledeck* 250.154,5 kg, representando, portanto, uma redução de 18,01% de um modelo para o outro. Para esse parâmetro analisado, assim como para o volume de concreto, também pode-se justificar devido à redução das seções e espessuras dos elementos de uma forma geral.

Figura 35 - Análise comparativa do peso de aço + 10 % (kg)

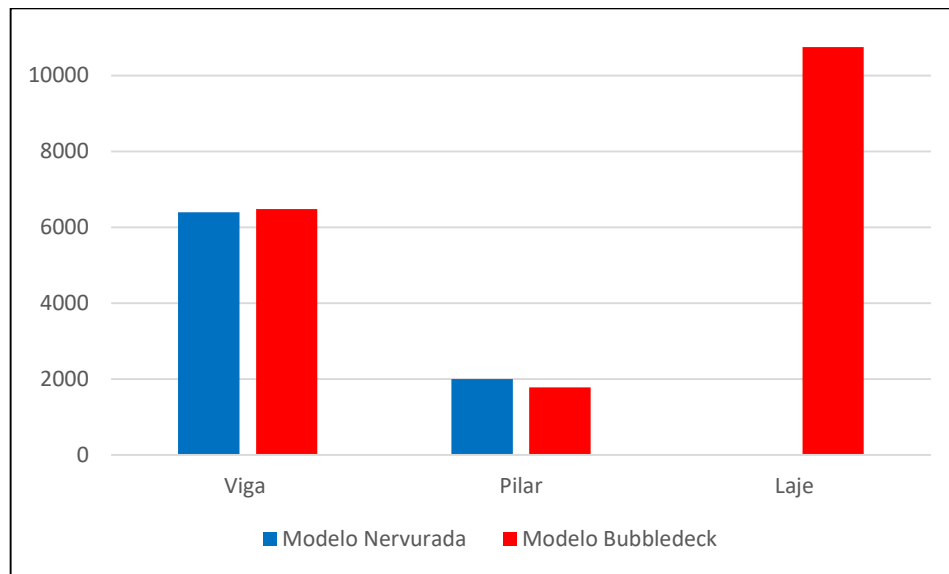


Fonte: Autora (2019).

A Figura 36 apresenta a área de fôrmas total das vigas, lajes e pilares, para ambos os modelos. Do Modelo Nervurada para o modelo *Bubbledeck*, as vigas apresentaram um aumento de 1,35 % e os pilares uma redução de 11,14 % desse parâmetro.

Pode-se relacionar o aumento na área de fôrmas para as vigas devido a ocorrência do aumento das dimensões desses elementos, e que ainda a redução da área de fôrmas dos pilares se deve às suas reduções de seção.

Ainda, ressalta-se que o uso de fôrmas para as lajes é necessário somente para o modelo *Bubbledeck*, a concretagem do modelo nervurada ser realizada com o auxílio de cubetas, que desempenham o papel de fôrma. Portanto, para o modelo nervurada são necessárias cubetas, que podem ser compradas ou alugadas, e para o modelo *Bubbledeck* são necessárias esferas plásticas para serem incorporadas no interior das lajes.

Figura 36 - Análise comparativa da área de fôrmas (m<sup>2</sup>)

Fonte: Autora (2019).

## 5.5 ORÇAMENTAÇÃO

A análise de custos relativa ao peso de aço, volume de concreto, área de fôrmas e cubetas para o Modelo Nervurada, ou esferas para o Modelo *Bubbledeck* são apresentadas a seguir. O valor orçado para cada um dos materiais é conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Orçamento por insumo

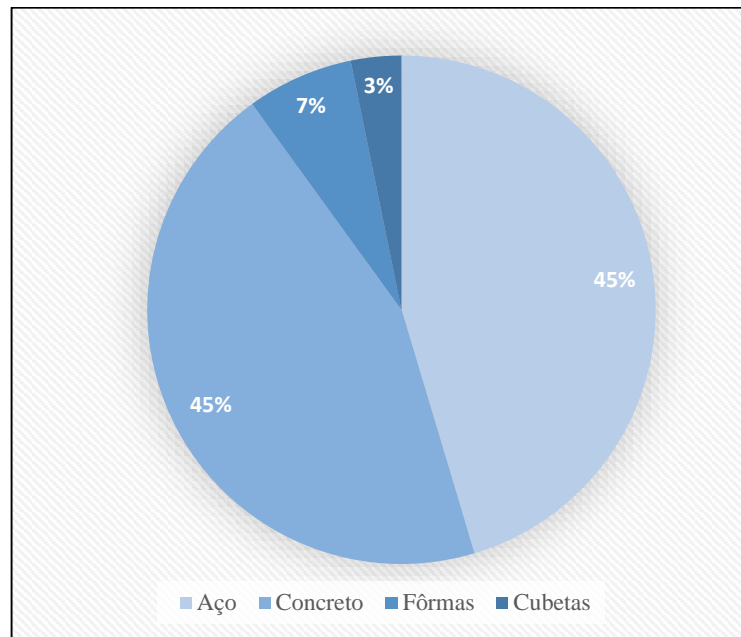
<b>Insumos</b>	<b>Modelo Nervurada</b>		<b>Modelo <i>Bubbledeck</i></b>	
Aço	R\$	1.472.212,82	R\$	1.186.577,38
Concreto	R\$	1.448.994,56	R\$	872.051,82
Fôrmas	R\$	220.198,07	R\$	498.404,12
Cubetas / Esferas	R\$	104.031,84	R\$	250.669,00

Fonte: Autora (2019).

A partir disso, pode-se observar que no quesito de custos, do Modelo Nervurada para o Modelo *Bubbledeck* sucedeu-se uma redução de 19,40 % referente ao aço, e de 39,81 % ao concreto. Ainda, relativo às fôrmas, ocorreu um aumento de 55,81 %, e às cubetas e esferas, esse aumento foi de 58,49 %.

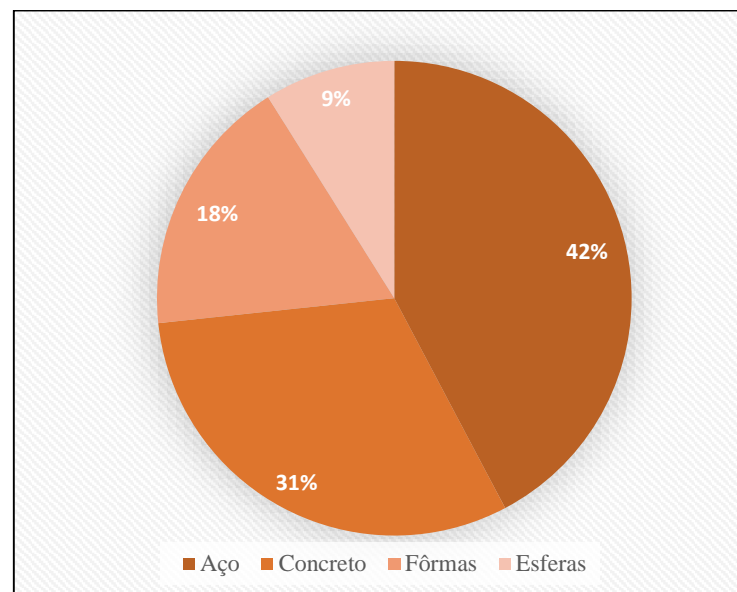
A porcentagem do custo de cada um dos materiais para os modelos, pode ser observado na Figura 37 para o Modelo Nervurada e na Figura 38 para o Modelo *Bubbledeck*. Esses valores são referentes ao custo total, e levam em consideração aço, concreto, fôrmas, cubetas para o Modelo Nervurada e esferas para o Modelo *Bubbledeck*.

Figura 37 - Custo de insumos - Modelo Nervurada



Fonte: Autora (2019).

Figura 38 - Custo de Insumos - Modelo *Bubbledeck*

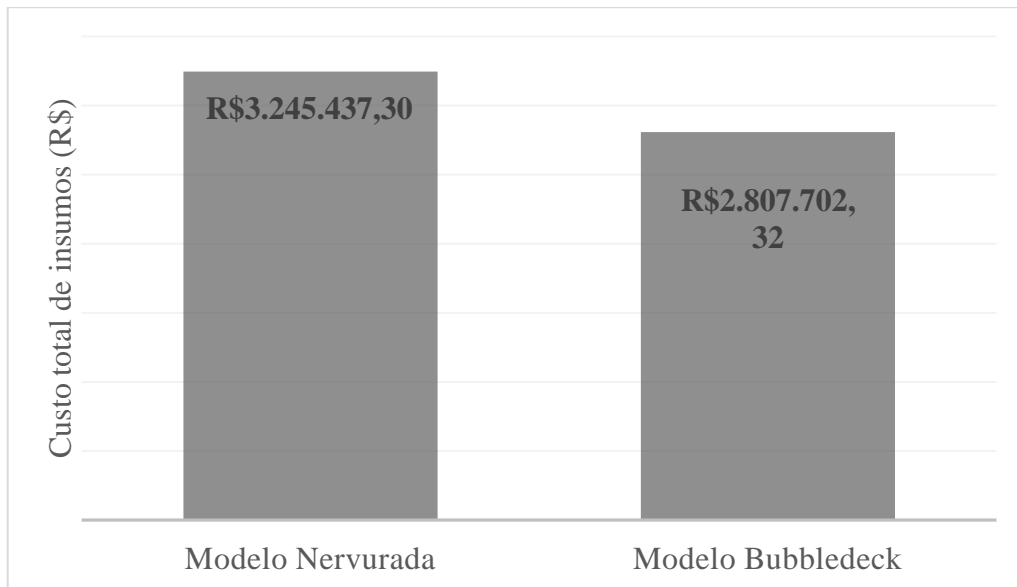


Fonte: Autora (2019).

Nota-se que, do Modelo Nervurada para o Modelo *Bubbledeck*, a porcentagem de custos de aço passou de 45 % para 42 %, de concreto passou de 45 % para 31 %, de fôrmas passou de 7 % para 18%, assim como de cubetas foi de 3 % e de esferas foi de 9 %, relativo ao custo total desses materiais para cada um dos modelos.

O custo total de concreto, aço, fôrmas e cubetas ou esferas para o Modelo Nervurada e para o Modelo *Bubbledeck* é conforme apresentado na Figura 39. A partir disso pode-se observar que o Modelo *Bubbledeck*, que obteve um custo de R\$ 2.807.702,32, se apresentou 13,48 % mais econômico do que o Modelo Nervurada, que obteve um custo de R\$ 3.245.437,30, no quesito dos insumos avaliados.

Figura 39 - Custo total de insumos



Fonte: Autora (2019).

Respaldado na análise comparativa dos resultados, serão discutidas as considerações finais de forma a expor o assunto de forma conclusiva, referente se há benefício na utilização do sistema de lajes *Bubbledeck* para edifícios onde se faz necessário o uso de grandes vãos livres, em comparação com o sistema de lajes nervuradas.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foram apresentados aspectos gerais sobre concreto armado e suas estruturas e também características, comportamentos e parâmetros de dimensionamento do sistema de lajes *Bubbledeck*, assim como do sistema de lajes nervuradas. Além disso, foi realizado um estudo de caso, onde dimensionou-se um edifício garagem de oito pavimentos, localizado na cidade de Caxias do Sul/RS, a partir de dois modelos, um deles com a utilização do sistema de lajes nervuradas e outro com o sistema de lajes *Bubbledeck*, ambos com o auxílio do *Software Eberick*. O Modelo Nervurada, assim como o Modelo *Bubbledeck* tiveram seus parâmetros determinados e passaram pelo pré-dimensionamento, dimensionamento e otimização de seus elementos. A partir disso, obteve-se os resultados para ambos e foi realizado uma análise comparativa entre eles.

A análise comparativa leva em consideração observar os parâmetros técnicos e de custos. Na apreciação dos critérios técnicos, comparou-se a redução do carregamento total, as seções dos pilares e o pé direito obtido embaixo das vigas entre os dois modelos. Também foram defrontados as quantidades e os custos de concreto, aço, fôrmas, cubetas e esferas, entre os dois modelos no objetivo de realizar a análise de custos.

Pode-se observar que do Modelo Nervurada para o Modelo *Bubbledeck*, todos os pilares obtiveram redução relativa aos carregamentos totais da estrutura. Também foi possível constatar que houve diminuição das áreas de seções dos pilares. Esses fatores estão diretamente interligados entre si e proporcionam para a edificação um melhor aproveitamento do espaço útil, assim como elementos mais esbeltos e mais econômicos em demanda de consumo de materiais. Para tanto, o Modelo *Bubbledeck* revela-se mais vantajoso referente aos parâmetros expostos.

Ainda, o Modelo *Bubbledeck* apresentou o pé direito da edificação medido em baixo da viga ligeiramente menor, quando comparado com o Modelo Nervurada. Analisando esse parâmetro, o Modelo *Bubbledeck* não apresentou vantagem. Entretanto, a diferença desse valor entre os dois modelos não proporciona nenhum tipo de interferência na escolha do sistema a ser utilizado, visto que ambas as alturas de pé direito obtidas são suficientes para o uso da edificação em questão.

Alusivo aos quantitativos e, por consequência, aos custos de concreto, aço, fôrmas, cubetas e esferas, constatou-se grande benefício na utilização do sistema de lajes *Bubbledeck*. Os custos dos insumos para esse sistema ficaram bastante reduzidos quando comparado com o

Modelo Nervurada, devido ao menor consumo de materiais como concreto e aço, que possuem bastante relevância na orçamentação de uma edificação.

É pertinente lembrar que cada vez mais, no âmbito da construção civil há uma busca por soluções construtivas que proporcionem conforto, segurança, economia financeira, agilidade construtiva e melhor aproveitamento de espaços para os usuários. Por isso, a busca por novas informações e inovações tecnológicas é de bastante relevância, para que cada vez mais o setor se desenvolva e crie soluções para atender as solicitações dos que utilizam esse serviço.

Portanto, é possível concluir que o uso do sistema de lajes *Bubbledeck* em um edifício onde se faz necessário grandes vãos livres devido a sua ocupação, pode ser vantajoso, quando comparado com o sistema de lajes nervuradas. Através desse trabalho pode-se constatar que o sistema de lajes *Bubbledeck* originou redução nos custos referentes aos insumos analisados, diminuição nos carregamentos totais e seções dos pilares, que acabam por proporcionar melhor aproveitamento interno da edificação e economia financeira.

## REFERÊNCIAS

- ALVA, Gerson Moacyr Sisniegas. **Pré-dimensionamento da estrutura**. Santa Maria: Estruturas de Concreto, 2014. Color.
- ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014a. 1 v.
- \_\_\_\_\_. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014b. 2 v.
- \_\_\_\_\_. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014c. 4 v.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1980.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - especificação. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12721**: Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15696**: Fôrmas e escoramentos para estruturas de concreto - Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- AVILA, Antonio Victorino; LIBRELOTTO, Liziane Ilha; LOPES, Oscar Ciro. **Orçamento de Obras**: Construção civil. Florianópolis: UNISUL, 2003.
- AZEREDO, Hélio Alves de. **O edifício até sua cobertura**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.
- BARBERATO, Thaume Chaves; FROTA, Wesley Novaes. **Estudo comparativo de lajes pré-moldadas, com estudo de caso em lajes Bubbledeck e comparação com método de pré-vigas**. 2014. - Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2014.
- BARONI, Henriette Justina Manfredini; VIERO, Édison Humberto. **Pré-dimensionamento de elementos estruturais de concreto armado**. Bento Gonçalves: 49º Congresso Brasileiro do Concreto - Ibracon, 2007.
- BOCCHI JÚNIOR, Carlos Fernando. **Lajes nervuradas de concreto armado: projeto e execução**. 1995. 204 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.



- BOCCHI JÚNIOR, Carlos Fernando; GIONGO, José Samuel. **Concreto armado: Projeto e construção de lajes nervuradas**. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, 2007.
- BOTELHO, Manoel Henrique Campos; MARCHETTI, Osvaldemar. **Concreto armado eu te amo**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 2 v.
- BUBBLEDECK. Two-hay Hollow Deck Manual: Introduction*, 2003.
- BUBBEDECK DESIGN GUIDE: The two-way hollow deck: The way to new solutions*, 20--?.
- BUBBLEDECK INTERNATIONAL. *Slab Parameters*. Disponível em: <<http://www.bubbledeck.com/>>. Acesso em: 09 out. 2018.
- COUTO, José Antônio Santos et al. **O concreto como material de construção**. Sergipe: Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnologias, 2013.
- DIAS, Paulo Roberto Vilela. **Engenharia de custos: Uma metodologia de orçamentação para obras civis**. 9. ed. Rio de Janeiro, 2011.
- FRANCA, Argemiro Brito Monteiro; FUSCO, Péricles Brasiliense. **As lajes nervuradas na moderna construção de edifícios**. São Paulo: Alfa e Abrapex, 1997.
- FREIRE, Tamara Carvalho. **Estudo comparativo para lajes cogumelo utilizando as tecnologias Bubbledeck e Atex**. 2009. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- FUSCO, Péricles Brasiliense. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2012.
- \_\_\_\_\_. **Técnicas de armar as estruturas de concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2013.
- FUSCO, Péricles Brasiliense; ONISHI, Minoru. **Introdução à engenharia de estruturas de concreto**. São Paulo: Cengage, 2017.
- GIONGO, José Samuel. **Concreto Armado: Projeto estrutural de edifícios**. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, 2007.
- GONZÁLEZ, Marco Aurélio Stumpf. **Orçamento e planejamento de obras: Notas de aula**. São Leopoldo: UNISINOS, 2008.
- GUEDES, Niara Dias; ANDRADE, Ramon Lauton. **Avaliação de desempenho de estruturas utilizando lajes do tipo Bubbledeck**. 2015. 106 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- HARDING, Paul. *BubbleDeck™ – Advanced Structure Engineering*. Jersey: New Construction Technology, 2004. Harding (2004)
- LAI, Tina. **Structural Behavior of BubbleDeck\* Slabs And Their Application to Lightweight Bridge Decks**. 2010. 42 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Massachusetts Institute Of Technology, Massachusetts, 2010.

- LIMA, Caio Ivson Vasconcelos et al. **Cadernos de Graduação: Concreto e suas inovações**. Maceió: Ciências Exatas e Tecnológicas, 2014.
- LIMA, Edgardo Luis et al. **Hormigón Armado: notas sobre su evolución y la de su teoría**. La Plata: Seminario Sobre Fundamentos de La Resistencia de Materiales, 20--?.
- LIMA, Henrique Jorge Nery de. **Análise experimental da punção de lajes lisas tipo Bubbledeck**. 2015. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- LIMA, Matheus Pereira de Sousa. **Tecnologia Bubbledeck: uma abordagem de sua execução e aplicabilidade quando comparada a laje SteelDeck**. 2017. 117 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- MATTOS, Aldo Dórea. **Como preparar orçamentos de obras**. São Paulo: Pini, 2006.
- OSBEL, Jones Felipe Dall. **Análise comparativa entre sistemas estruturais: Lajes maciças e lajes Bubbledeck**. 2018. 102 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Caxias do Sul, Bento Gonçalves, 2018.
- PALLA, Anna Elizabete Fenseca. **Referencial teórico e estudo comparativo do dimensionamento de lajes Bubbledeck**. 2017. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.
- PARCIANELLO, Alexandre Thiago. **Planejamento e execução de lajes Bubbledeck na obra: Estudo de caso**. 2014. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2014.
- PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P. **Estruturas de Concreto** (Cap. 3, Cap. 4 e Cap. 6), 2003.
- \_\_\_\_\_. **Estruturas de Concreto** (Cap. 1), 2004.
- PINHEIRO, Libânio M.; REZENTE, Julio A. **Estruturas de concreto: Lajes nervuradas**. (Cap. 17), 2003.
- SCHWETZ, Paulete Fridman. **Análise Numérico-Experimental de lajes nervuradas sujeitas a cargas estáticas de serviço**. 2011. 257 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- SCHWETZ, Paulete Fridman. **Análise teórico-experimental de uma laje nervurada em modelo reduzido sujeita a um carregamento linear**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- SILVA, Jessica dos Santos et al. **Estudo comparativo entre BubbleDeck e painel treliçado**. Belo Horizonte: 58º Congresso Brasileiro do Concreto - Ibracon, 2016.
- SILVA, Marcos Alverto Ferreira da. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 2005. 245 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

SILVA, Yuri Mariano de Oliveira. **Estudo comparativo entre lajes *Bubbledeck* e lajes lisas**. 2011. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SOUZA, Shirley do Socorro Melo de. **Análise experimental de lajes nervuradas de concreto armado com armadura de cisalhamento**. 2007. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

**APÊNDICE A – PLANTA BAIXA ARQUITETÔNICA**

31.30

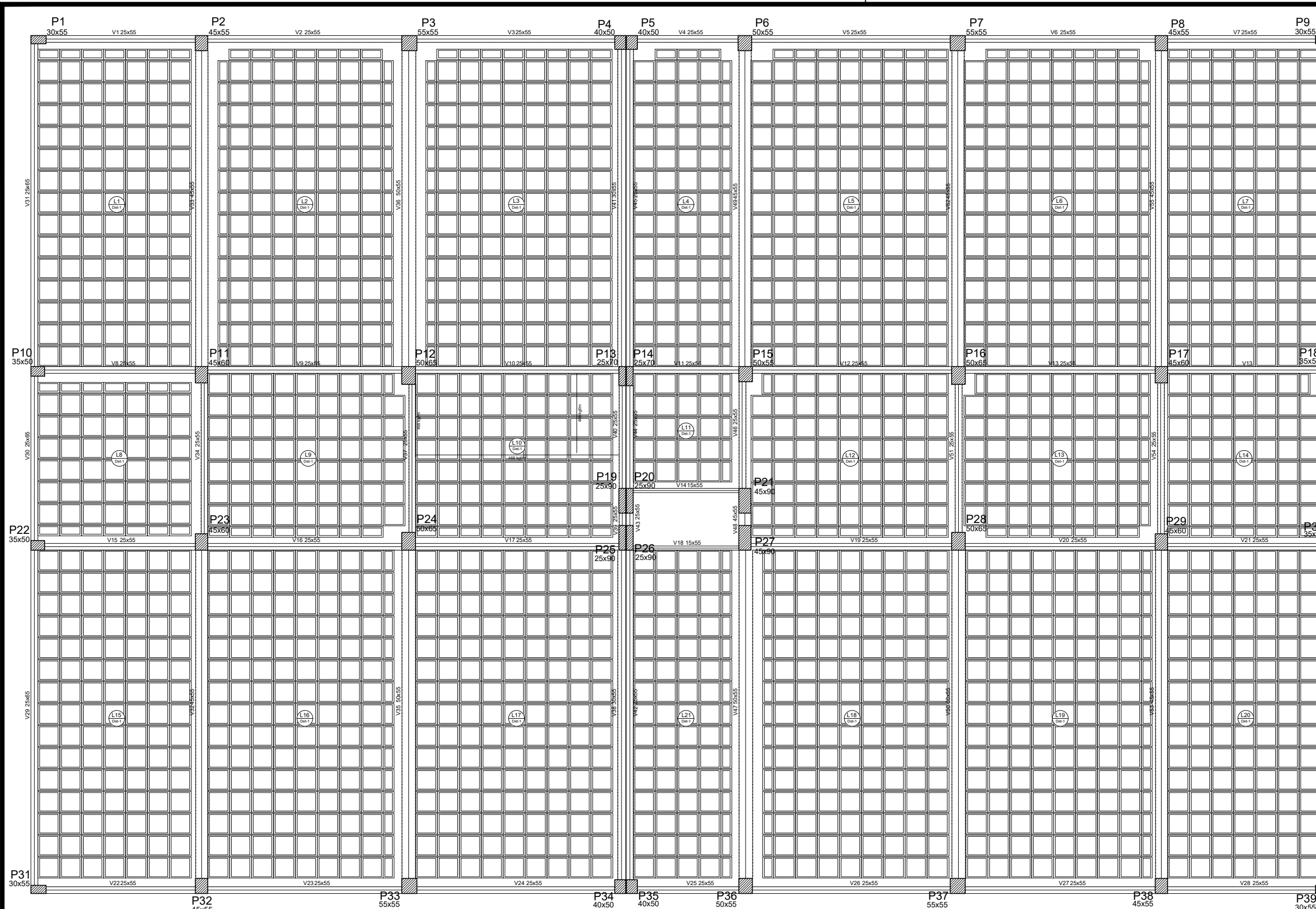
47.42



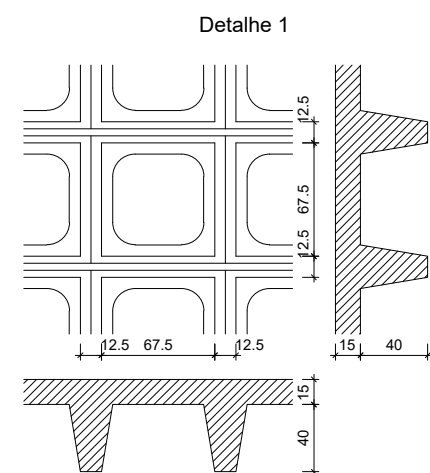
UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL - CURSO DE ENGENHARIA CIVIL  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

DISSCIPLINA: TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II	APÊNDICE A		
ACADÊMICA: FABIANA TESSARI	PROJETO: PLANTA BAIXA ARQUITETÔNICA - PAVIMENTO TIPO		
ORIENTADOR: PROF. ME. LUCIANO ZATTI	DATA: JUL/2019	ESCALA: 1/150	PRANCHA: 01/03

**APÊNDICE B – PLANTA DE FÔRMAS MODELO NERVURADA**




Forma do pavimento 3°



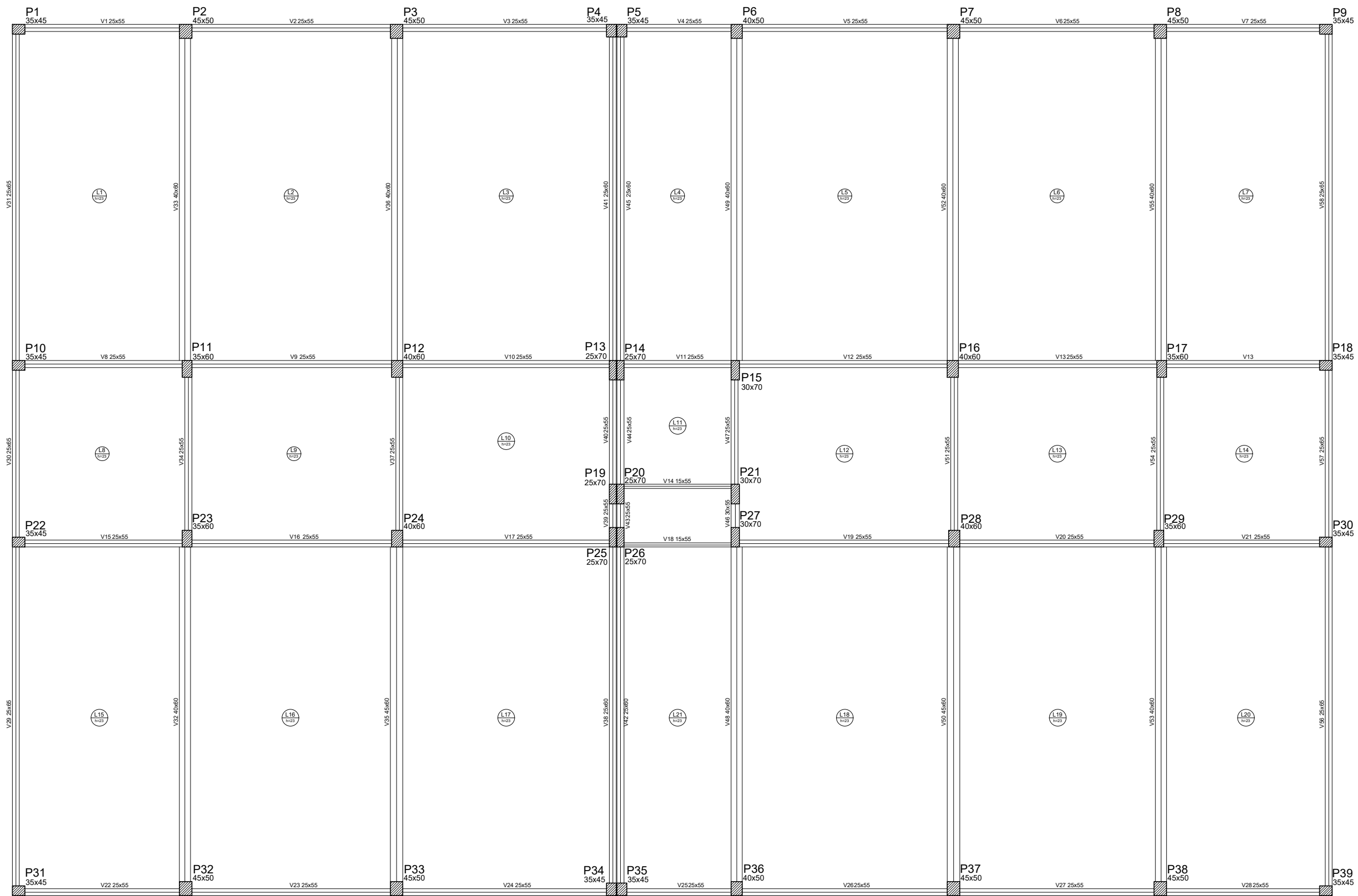
Legenda dos Placas

- Placa que morre
- ▨ Placa que passa
- Placa que nasce
- ▤ Placa com mudança de seção

 <b>UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL</b>	UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL - CURSO DE ENGENHARIA CIVIL <b>TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II</b>
DISSCIPLINA: <b>TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II</b>	<b>APÊNDICE B</b>
ACADÊMICA: <b>FABIANA TESSARI</b>	PROJETO: <b>PLANTA DE FÔRMAS - MODELO NERVURADA</b>
ORIENTADOR: <b>PROF. ME. LUCIANO ZATTI</b>	DATA: <b>JUL/2019</b> ESCALA: <b>1/150</b> PRANCHA: <b>02/03</b>

**APÊNDICE C – PLANTA DE FÔRMAS MODELO *BUBBLEDECK***





Forma do pavimento 3°



UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL - CURSO DE ENGENHARIA CIVIL  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

DISSCIPLINA: TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II	APÊNDICE C		
ACADÊMICA: FABIANA TESSARI	PROJETO: PLANTA DE FÔRMAS - MODELO <i>BUBBLEDECK</i>		
ORIENTADOR: PROF. ME. LUCIANO ZATTI	DATA: JUL/2019	ESCALA: 1/150	PRANCHA: 03/03