

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

HÉLIO YUDI PIRES KAWAMOTO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE LAJES “*BUBBLEDECK*” E LAJES
NERVURADAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2020

HÉLIO YUDI PIRES KAWAMOTO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE LAJES “*BUBBLEDECK*” E LAJES
NERVURADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Rodnny Jesus Mendoza
Fakhye

TOLEDO
2020



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 246

Estudo comparativo entre lajes “Bubbledeck” e lajes Nervuradas

por

Hélio Yudi Pires Kawamoto

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 13:50h do dia **08 de Agosto de 2020** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Dr. Gustavo Savaris
(UTFPR – TD)

Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim
(UTFPR – TD)

Prof. Dr. Rodnny Jesus Mendoza Fakhye
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da coordenação
Prof. Dr. Gustavo Savaris
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho de pesquisa à minha mãe, que ao longo de toda a minha vida, mesmo nos momentos mais difíceis, nunca faltou com força, incentivo, carinho e afeto.

Eu te amo mais que tudo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus grandes amigos, Samuel, Lucas, Raynier, Willian, Mario e Kevin, que sempre me auxiliaram a ultrapassar os mais árduos obstáculos que enfrentamos juntos. O tempo que vivemos, foi um dos melhores da minha vida.

Ao meu orientador, pelas valiosas contribuições dadas a este trabalho e por sempre indicar o caminho a se seguir.

Ao professor Maurício, por ser um exemplo de profissional que pretendo me espelhar o resto da vida.

E por fim, aos meus pais, Solange e Hélio, e aos meus irmãos, Igor e Renan, que nunca faltaram com confiança e apoio, atuando como meu alicerce no decorrer dessa caminhada.

RESUMO

KAWAMOTO, Hélio Yudi Pires. **Estudo comparativo entre lajes “bubbledeck” e lajes nervuradas.** 2020. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2020.

Devido a necessidade de minimizar custos e otimizar processos construtivos diversos modelos de laje foram desenvolvidos ao longo do tempo de forma a atender a demanda atual dos projetos, que são cada vez mais sofisticados. A necessidade de vencer grandes vãos leva a lajes de maior espessura, e conseqüentemente mais pesadas, o que ocasiona em um grande consumo de concreto não só na laje em si, como também nos outros elementos estruturais do edifício, tornando a solução tradicional de laje maciça antieconômica. Nesse cenário, sistemas de lajes com vazios, como as lajes nervuradas e as lajes Bubbledeck apresentam uma solução para esse gasto elevado de material, oferecendo uma laje com menor consumo de concreto e aço, mantendo uma eficiência satisfatória. O presente trabalho apresenta um estudo comparativo entre o sistema de lajes nervuradas e o sistema de lajes bubbledeck, mostrando suas principais características, vantagens e desvantagens, além de um estudo de caso, dimensionando uma laje nervurada e uma laje bubbledeck, comparando o consumo de materiais e esforços característicos.

Palavras-chave: Lajes Nervuradas, Lajes Bubbledeck, Esforço, Concreto Armado.

ABSTRACT

KAWAMOTO. Hélio Yudi Pires. **Comparative study between bubbledeck slabs and ribbed slabs**. 2020. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2020.

Due to the need to minimize costs and optimize construction processes, several slab models have been developed over time in order to meet the current demand for project, which are increasingly sophisticated. The need to overcome large spans leads to thicker and heavier slabs, which causes a large consumption of concrete not only in the slab itself, but also in the other structural elements of the building, making the traditional solid slab solution uneconomic. In this scenario, slab systems with voids, such as ribbed and bubbledeck slabs present a solution to this high material expense, offering a slab with a lower concrete and steel consumption, maintaining satisfactory efficiency. This paper presents a comparative study between the ribbed and bubbledeck slab systems, showing its main characteristics, advantages and disadvantages, in addition to a case study, dimensioning a ribbed and a bubbledeck slab, comparing the consumption of materials and characteristic efforts.

Keywords: Ribbed Slabs, Bubbledeck Slabs, Stress, Reinforced Concrete.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições de projeto para lajes nervuradas.....	29
Tabela 2 - Especificações padrões de lajes <i>Bubbledeck</i>	31
Tabela 3 - Especificações Técnicas	32
Tabela 4 - Cobrimento nominal em função do tempo de resistência a fogo em caso de incêndio.....	33
Tabela 5 - Momentos calculados.....	39
Tabela 6 - Momentos compatibilizados de acordo com a NBR 6118 (2014).....	39
Tabela 7 - Valores mínimos para armaduras	40
Tabela 8 - Taxa mínima de armação.....	41
Tabela 9 - Armaduras positivas na direção X.....	42
Tabela 10 - Armaduras positivas na direção Y.....	42
Tabela 11 - Armaduras negativas na direção X	43
Tabela 12 - Armaduras negativas na direção Y	43
Tabela 13 - Resultados da verificação ao cisalhamento	44
Tabela 14 - Deslocamentos limites	45
Tabela 15 - Deslocamentos verticais nas lajes bubbledeck	45
Tabela 16 - Tabela resumo dos momentos máximos atuantes no pavimento.....	48
Tabela 17 - Tabela resumo das forças cortantes máximas atuantes no pavimento..	48
Tabela 18 - Armaduras positivas na direção X.....	49
Tabela 19 - Armaduras positivas na direção Y.....	50
Tabela 20 - Armaduras negativas na direção X	50
Tabela 21 - Armaduras negativas na direção Y	50
Tabela 22 - Armaduras negativas na continuidade das lajes	50
Tabela 23 - Armaduras transversais nas nervuras da direção X.....	51
Tabela 24 - Armaduras transversais nas nervuras da direção Y.....	51
Tabela 25 - Deslocamentos verticais calculados pelo software	51
Tabela 26 - Quantitativo de concreto e aço utilizados nas lajes bubbledeck	53
Tabela 27 - Quantitativo de concreto e aço utilizados nas lajes nervuradas.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Laje nervurada bidirecional	16
Figura 2 - Cubetas plásticas pré-fabricadas	17
Figura 3 - Seções transversais de lajes nervuradas com materiais inertes: a) isopor; b) blocos de concreto comum; c) blocos de concreto celular; d) tijolos cerâmicos furados.	18
Figura 4 - Millenium Tower (Rotterdam, Holanda).....	18
Figura 5 - Centro Administrativo do Distrito Federal (Brasília, DF).....	19
Figura 6 - Reforma da Arena da Baixada (Curitiba, PR)	19
Figura 7 - Aeroporto Internacional Tom Jobim (Rio de Janeiro, RJ)	20
Figura 8 - Diagrama de tensões usuais em uma seção de concreto armado	21
Figura 9 - Tipos construtivos de lajes <i>BubbleDeck</i>	22
Figura 10 - Região sem esferas nas proximidades do pilar	22
Figura 11 - Casos de vinculação para as tabelas de Czerny	24
Figura 12 – Croqui do edifício	26
Figura 13 - Caso de vinculação da Laje 1	37
Figura 14 - Caso de vinculação da Laje 2	37
Figura 15 - Caso de vinculação da Laje 3	38
Figura 16 - Caso de vinculação da Laje 4	38
Figura 17 - Cadastro do bloco de EPS.....	46
Figura 18 - Lançamento da laje 1.....	47
Figura 19 - Configuração de bitolas das lajes	49
Figura 20 - Grelha deformada	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVO GERAL	13
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2	REVISÃO TEÓRICA.....	15
2.1	LAJE.....	15
2.2	CLASSIFICAÇÃO QUANTO A ARMAÇÃO.....	15
2.3	LAJE NERVURADA	15
2.3.1	Métodos construtivos de lajes nervuradas.....	16
2.4	LAJES <i>BUBBLEDECK</i> ®.....	18
2.5	CONSIDERAÇÕES ESPECIAIS DAS LAJES <i>BUBBLEDECK</i>	21
2.5.1	Aspectos Construtivos de Lajes <i>BubbleDeck</i> ®.....	21
2.5.2	Esferas de PEAD.....	23
2.6	MÉTODO DA ANALOGIA DE GRELHA EQUIVALENTE.....	23
2.7	MÉTODO DE CZERNY.....	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	CONDIÇÕES DE CONTORNO DO TRABALHO	26
3.2	AÇÕES CONSIDERADAS	27
3.2.1	Peso próprio	27
3.2.2	Contrapiso	27
3.2.3	Revestimento do teto.....	28
3.2.4	Piso.....	28
3.2.5	Paredes	28
3.2.6	Ações variáveis.....	29
3.3	ESPECIFICAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO DA LAJE NERVURADA 29	
3.4	SOFTWARE ALTOQI EBERICK	30
3.5	ESPECIFICAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO DA LAJE <i>BUBBLEDECK</i>	30
3.5.1	Peso próprio	31
3.5.2	Deflexão (flechas).....	32
3.5.3	Resistência ao cisalhamento	32
3.5.4	Pré-dimensionamento.....	32

3.6	COBRIMENTO	33
3.7	ALTURA DA LAJE.....	34
3.8	MOMENTOS FLETORES	34
3.9	FLECHAS.....	34
3.9.1	Flecha imediata	34
3.9.2	Flecha por fluência	34
3.10	VERIFICAÇÃO DO CISALHAMENTO	34
3.11	ARMADURAS	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1	DIMENSIONAMENTO DA LAJE BUBBLEDECK	36
4.1.1	Carregamentos considerados	36
4.1.2	Cálculo dos esforços utilizando o método de Czerny	36
4.1.3	Armaduras	39
4.1.4	Verificação do cisalhamento	43
4.1.5	Flechas	44
4.2	DIMENSIONAMENTO DA LAJE NERVURADA.....	46
4.2.1	Carregamentos considerados	46
4.2.2	Modelagem da laje no software AltoQI Eberick	46
4.2.3	Cadastro de blocos de enchimento.....	46
4.2.4	Armaduras	48
4.2.5	Flechas	51
4.3	COMPARATIVO DE GASTO DE MATERIAIS	52
5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
	ANEXOS	57

1 INTRODUÇÃO

Devido ao grande crescimento da indústria de construção civil, é notável o aumento na competitividade no mercado. Além disso, com a crescente preocupação com o meio ambiente, buscam-se tecnologias sustentáveis e menos danosas ao planeta. Dessa forma, faz-se necessária a busca por soluções mais rápidas, econômicas e sustentáveis que as convencionais.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), o concreto é o material industrializado mais utilizado no mundo inteiro, sendo consumido no ano de 2010 cerca de 33 bilhões de toneladas. Dessa quantidade, 3,7 bilhões de toneladas são de clínquer de cimento Portland, 27 bilhões são de toneladas de agregados, além de 2,7 bilhões de toneladas de água e outra parcela de aditivos químicos. Contudo, apesar desse material apresentar um excelente desempenho estrutural, causa enormes impactos ao meio ambiente, devido a extração, processamento e transportes dos materiais necessários para a confecção do concreto, a queima de combustíveis fósseis para a produção de clínquer do cimento Portland, a considerável emissão de CO₂ (cerca de 1 tonelada por tonelada de concreto produzido), o grande consumo de água e a alteração na paisagem devido à mineração de agregados.

Reduzindo a quantidade de concreto empregada é possível minimizar esses impactos. No caso de lajes de concreto armado, a diminuição de um único centímetro em sua espessura reduz consideravelmente o volume de concreto utilizado.

Sistemas estruturais como o de lajes maciças, apesar de mais comuns e fáceis de se executar, exigem espessuras maiores, conforme o vão a ser vencido aumenta, o que faz com que seu peso próprio solicite uma grande parte de sua capacidade. Dessa forma, é imprescindível considerar outras alternativas que diminuam gasto de material e apresentem comportamento semelhante. Uma opção para reduzir a quantidade de concreto a ser utilizada e, conseqüentemente seu peso, é remover uma parte do material na zona tracionada, visto que o mesmo tem baixa resistência à tração e que se despreza a capacidade resistente do material no dimensionamento estrutural.

Lajes nervuradas utilizam da premissa de redução de material na zona tracionada, possuindo nervuras nessa área, onde se concentram as armaduras. Geralmente,

nessa região é adicionado algum material inerte, que não possui funções estruturais, para permitir um acabamento plano e cobrir as armaduras.

Lajes *BubbleDeck* também recorrem a vazios na zona tracionada, ocupando o lugar do concreto com esferas, ocas ou não, muitas vezes de material reciclável e de menor custo do que o concreto. As esferas são, na maioria dos casos, igualmente espaçadas entre si e fixadas entre as armaduras positiva e negativa da laje.

O presente trabalho realiza um estudo comparativo entre sistemas de lajes nervuradas e lajes *BubbleDeck*, desde suas considerações de projeto até sua execução, numa edificação comercial de 4 pavimentos, comparando suas características e identificando vantagens e desvantagens de cada método.

1.1 JUSTIFICATIVA

Devido ao elevado consumo de concreto e seus intrínsecos impactos ambientais, é extremamente necessário buscar soluções que empreguem menos material e conseqüentemente, diminuam a emissão de gases de efeito estufa. Propõe-se então, sistemas de lajes com vazios, que utilizam uma quantidade de concreto relativamente menor, quando comparada aos sistemas tradicionais, como o de lajes maciças. Devido à redução da quantidade de material utilizado, esses sistemas tendem a ser mais econômicos.

O sistema de lajes nervuradas é um método executivo consagrado e amplamente utilizado no mundo todo, diferentemente do sistema *BubbleDeck*, que é relativamente novo e pouco empregado. A presente proposta de estudo se concentra em conhecer detalhadamente este novo método, buscando suas vantagens perante outros procedimentos e suas dificuldades, desde sua análise até sua execução, de forma a compreender melhor seu funcionamento para otimizar sua aplicação e difusão.

1.2 OBJETIVO GERAL

Dimensionar uma laje nervurada através do software AltoQi Eberick e uma laje *BubbleDeck* de maneira manual, comparando as diferenças entre os dois métodos.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar diferenças no processo construtivo de cada um dos métodos;
- Calcular os esforços atuantes em ambos os métodos para lajes de mesmo uso;

- Comparar o consumo de materiais entre os dois sistemas;
- Indicar as vantagens e desvantagens de cada método;

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 LAJE

Borges (2007) define lajes como elementos planos de duas dimensões, comprimento e a largura, pois as mesmas possuem uma ordem de grandeza muito superior a terceira dimensão, a espessura. Sua principal função é receber e distribuir a maior parte das ações verticais aplicadas numa edificação, sendo elas permanentes ou variáveis.

Carvalho e Pinheiro (2009) evidenciam que de maneira geral, as lajes estão apoiadas em vigas, e estas em pilares. Dessa forma, os esforços aplicados diretamente na laje são transmitidos para as vigas, que os transmitem para os pilares, que por sua vez os descarregam nas fundações, e por fim, ao solo.

2.2 CLASSIFICAÇÃO QUANTO A ARMAÇÃO

Segundo Carvalho e Pinheiro (2009), podemos classificar as lajes quanto a sua armação. Lajes armadas em uma direção são bem retangulares, tendo a relação entre o lado maior e o lado menor superior a dois. O autor afirma que os esforços solicitantes de maior magnitude ocorrem na direção do menor vão, para a qual é calculada a armadura principal. Por outro lado, quando a relação entre o vão maior e o vão menor for inferior a dois, a laje é considerada armada em duas direções, pois nesse caso os momentos fletores em ambas as direções são significativos e devem ser calculados.

2.3 LAJE NERVURADA

De acordo com o item 14.7.7 da ABNT NBR 6118 (2014), “lajes nervuradas são as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte”. Carvalho e Pinheiro (2009) ressaltam que, para vãos de grandes dimensões, há muito concreto abaixo da linha neutra que está sendo tracionado e que não colabora para a resistência a flexão, visto a baixa resistência a tração do concreto.

Dessa forma, pensou-se em moldar com fôrmas uma região composta de nervuras na região onde a laje é tracionada, diminuindo assim a quantidade de concreto empregada e conseqüentemente, seu peso próprio. Os autores ainda afirmam que as lajes nervuradas se adequam ao sistema de lajes sem vigas e

consomem menos aço e concreto em relação a sistemas similares, reduzindo o peso próprio e por consequência aliviando as fundações.

Dias (2003) respalda as informações, reconhecendo que além da questão econômica, as lajes nervuradas com cubetas de polipropileno permitem maior liberdade arquitetônica, facilitando a execução da obra, pois facilita os escoramentos, quando o sistema for aplicado sem vigas, como na Figura 1.

Figura 1 - Laje nervurada bidirecional



Fonte: ATEX¹ (2019).

2.3.1 Métodos construtivos de lajes nervuradas

Há basicamente duas formas de construir lajes nervuradas bidirecionais moldadas in loco e sua principal diferença depende de como deseja-se que o acabamento do teto seja feito. Quando expostas, prefere-se que sejam utilizadas fôrmas de plástico pré-fabricadas, como as que podem ser vistas na Figura 2, pois o molde tem uma desforma facilitada devido as arestas arredondadas. Além disso, ao utilizar os moldes de plástico o consumo de formas também é reduzido, pois permitem inúmeras reutilizações e também podem ser facilmente alugados. Contudo deve-se atentar que esses moldes possuem dimensões pré-definidas, portanto, quando

¹ Disponível em: <<https://www.atex.com.br/blog/laje/apresentando-as-formas-para-laje-atex/>>. Acesso em: 10 out. 2019.

utilizados, as nervuras devem ser calculadas de acordo com as medidas disponibilizadas pelo fabricante da forma.

Por outro lado, quando for previsto a execução de algum tipo de acabamento no teto, como forros de gesso acartonado, pode-se utilizar materiais de enchimento, que não tem função estrutural, como EPS de alta densidade, tijolos cerâmicos, entre outros, como pode ser visto na Figura 3. A vantagem de se utilizar esses materiais é que a nervura pode ser moldada em qualquer dimensão, pois o material de enchimento não vem em tamanhos pré-definidos, podendo ser encomendado com as dimensões que se desejar.

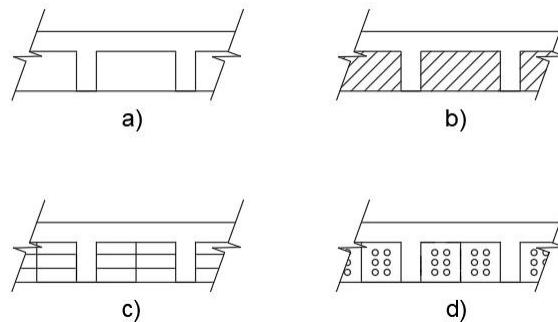
Figura 2 - Cubetas plásticas pré-fabricadas



Fonte: ATEX² (2019).

² Disponível em: <<https://www.atex.com.br/pt/formas/laje-nervurada/>>. Acesso em: 12 jul. 2020.

Figura 3 - Seções transversais de lajes nervuradas com materiais inertes: a) isopor; b) blocos de concreto comum; c) blocos de concreto celular; d) tijolos cerâmicos furados.

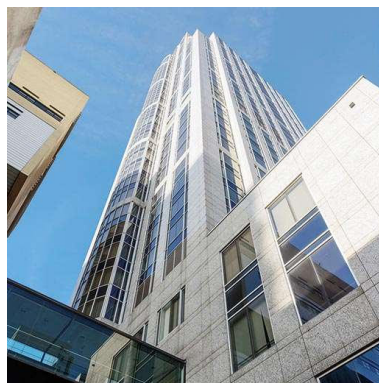


Fonte: Adaptada de CARVALHO; PINHEIRO (2009).

2.4 LAJES *BUBBLEDECK*®

BubbleDeck® é uma tecnologia desenvolvida na Dinamarca na década de 1980 pelo engenheiro Jørgen Breuning que se tornou conhecida na Europa e em todo o mundo no início do século XXI, após a construção da Millenium Tower em Rotterdam, Holanda (Figura 4). A técnica consiste em uma laje biaxial com vazios, onde esferas plásticas ocupam o espaço de concreto que não desempenha função estrutural, ou seja, remove uma alta carga enquanto mantém a maioria de suas características resistentes, além de dispensar o uso de vigas (*BUBBLEDECK INTERNATIONAL* (a), 2019).

Figura 4 - Millenium Tower (Rotterdam, Holanda).



Fonte: The Millenium Tower³ (2019).

³ Disponível em: <<http://millennium-tower.nl/en/>>. Acesso em: 08 set. 2019.

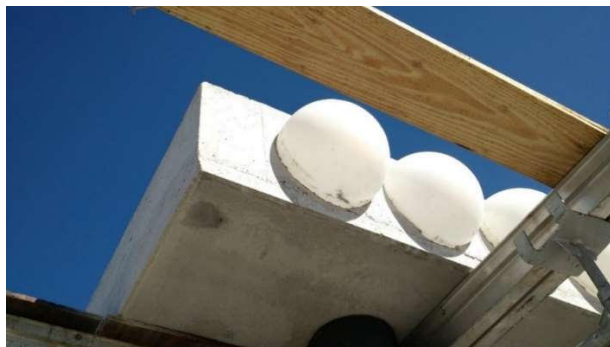
Algumas aplicações deste sistema no Brasil são nos edifícios do Centro Administrativo do Distrito Federal (CADF) em Brasília, na ampliação da garagem Rio Galeão (Aeroporto Internacional Tom Jobim), no Rio de Janeiro, em parte da reforma do estádio da Arena da Baixada, em Curitiba, entre outros. Os exemplos podem ser visualizados nas Figura 5 aFigura 7.

Figura 5 - Centro Administrativo do Distrito Federal (Brasília, DF)



Fonte: Ulma Brasil⁴ (2019).

Figura 6 - Reforma da Arena da Baixada (Curitiba, PR)



Fonte: SkyscraperCity⁵ (2019).

⁴ Disponível em: <<https://www.ulmaconstruction.com.br/pt-br/projetos-construcao/edificacao/edificacoes-empresariais-administrativas/centro-administrativo-distrito-federal-brasil>>. Acesso em 08 set. 2019.

⁵ Disponível em: <<https://www.skyscrapercity.com/showthread.php?p=134727277>>. Acesso em: 08 set. 2019.

Figura 7 - Aeroporto Internacional Tom Jobim (Rio de Janeiro, RJ)



Fonte: Construtora Odebrecht⁶ (2019).

Devido ao menor volume de concreto utilizado por esse tipo de laje, diversos benefícios são atingidos, dentre eles a redução de 30 a 35% do peso total da laje, quando comparada a uma laje maciça de mesma espessura, a diminuição na seção transversal de pilares e fundações, a possibilidade de aumentar a distância entre as colunas e uma construção mais veloz, pois a quantidade de material transportada é substancialmente menor (BUBBLEDECK INTERNATIONAL (a), 2019).

O fabricante destaca alguns aspectos positivos como o ganho de pé direito com o embutimento das instalações na laje, o fato de apresentar o “Selo verde” por reduzir a emissão de CO₂ na atmosfera já que reduz a quantidade de materiais e transportes empregados (concreto, madeira, água e energia) e por utilizar plástico reciclável na composição das esferas, além de resistência ao fogo de 60 a 180 minutos (verificações realizadas de acordo com a ISSO 834) e as esferas carbonizam sem emitir gases tóxicos em caso de incêndio.

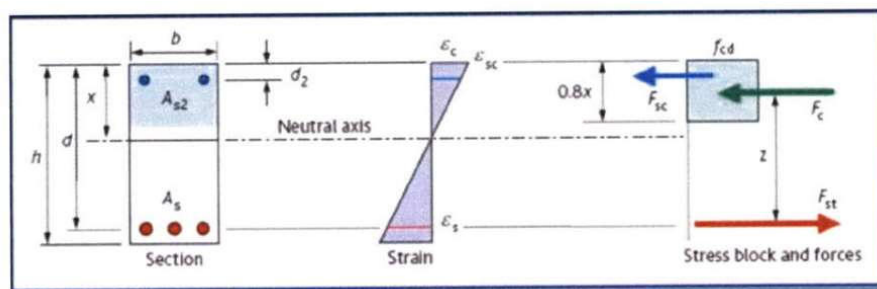
Contudo, Palla (2017) destaca algumas desvantagens como o fato de não ser um procedimento normatizado em alguns países (incluindo no Brasil), a necessidade de mão de obra especializada, dificuldade na execução por ter requisitos de projeto já especificados (como largura mínima e espaçamento) e a necessidade de cuidado especial no transporte.

⁶ Disponível em: <<https://www.odebrecht.com/pt-br/comunicacao/releases/tecnologia-bubbledeck-e-apresentada-em-palestra-gratuita-no-rio-de-janeiro>>. Acesso em 08 set. 2019.

2.5 CONSIDERAÇÕES ESPECIAIS DAS LAJES BUBBLEDECK

LAI (2009) demonstra que quando as lajes Bubbledeck são dimensionadas de acordo com as normas EC2 (Eurocode 2) e BS8110 (British Standard), a zona com as bolhas está impressada entre camadas de concreto de aproximadamente a mesma profundidade do bloco de tensão de uma laje maciça. Quando a laje estiver altamente carregada, a linha neutra pode entrar na zona de bolhas, contudo, o autor afirma que qualquer redução da altura da linha neutra de até 20% tem efeitos triviais na performance da laje Bubbledeck. Dessa forma, por apresentar o mesmo comportamento à flexão de uma laje maciça, podem ser utilizados métodos semi-empíricos, como os métodos de Czerny, Barus ou Marcus para o cálculo da laje Bubbledeck.

Figura 8 - Diagrama de tensões usuais em uma seção de concreto armado



Fonte: Eurocode (2010)

Além disso, Sagadevan e Rao (2019) mostram que, apesar de não apresentar uma mudança significativa na sua capacidade à flexão, a resistência ao cisalhamento das lajes Bubbledeck apresenta uma baixa significativa, de até 40%, quando comparada a lajes maciças.

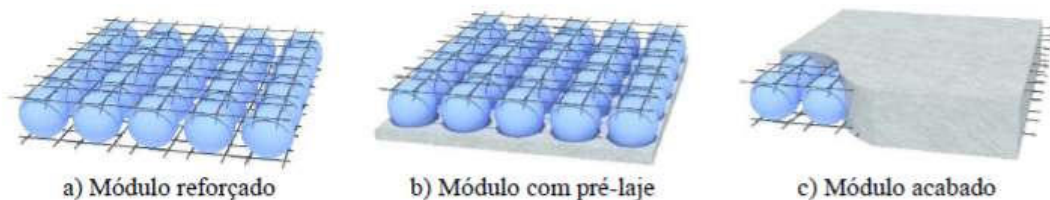
2.5.1 Aspectos Construtivos de Lajes **BubbleDeck**®

Segundo Nicácio (2018), existem 3 alternativas construtivas que dependem do tipo de aplicação da laje. No primeiro caso, denominado de módulo reforçado, os moldes esféricos ficam presos entre duas telas de aço, como pode ser visto na Figura 9a. Nesse caso, é necessário utilizar formas para posicionar as esferas e a concretagem deve ser feita em duas etapas. Na primeira, é lançada uma camada de aproximadamente 60mm, para realizar a ancoragem das esferas. Em seguida, após a perda de fluidez do concreto já lançado, verte-se o restante até o acabamento da laje.

No segundo caso, utiliza-se uma laje pré-moldada de concreto onde as esferas são inseridas, com a mesma servindo de forma permanente, conforme a Figura 9b. Esses painéis podem diminuir significativamente o tempo e os custos relacionados ao sistema de forma e escoramento, uma vez que a própria placa serve de forma.

Já no terceiro caso, visto na Figura 9c, as esferas são fornecidas acabadas, e a continuidade entre os painéis subsequentes é garantida pela superposição da armadura de flexão e preenchimento de concreto nas zonas de conexão, diferentemente dos primeiros dois casos, onde as ligações são feitas entre os elementos com barras de emenda.

Figura 9 - Tipos construtivos de lajes *BubbleDeck*



Fonte: Nicácio (2018).

Para garantir a resistência necessária ao cisalhamento em regiões onde as forças cortantes são maiores, como nas regiões próximas aos pilares, as esferas são removidas, deixando uma região maciça, como visto na Figura 10. Essa área depende da carga do pilar e da espessura da laje. Contudo, é importante esclarecer que regiões maciças no contorno dos pilares somente são necessárias quando a laje é lisa, ou seja, não utiliza vigas. (NICÁCIO, 2018).

Figura 10 - Região sem esferas nas proximidades do pilar



Fonte: Smarttech⁷ (2019).

⁷ Disponível em: <<http://smarttech.com.br/lajes-bubbledeck/>>. Acesso em: 18 out. 2019.

2.5.2 Esferas de PEAD

As esferas utilizadas nas lajes *bubbledeck* são fabricadas de polietilenos de alta densidade, inerte e não poroso. Além disso, possuem rigidez suficiente para suportar com segurança as cargas aplicadas durante a execução, até que seja realizada a concretagem.

Seu diâmetro pode variar entre 180mm e 540mm e a altura da laje entre 230mm e 700mm, conseguindo vencer vãos de 5m a 24 m. A distância entre as esferas deve ser maior que 1/9 do seu diâmetro e a espessura da laje pré-moldada deve ser superior a 60mm (BUBBLEDECK UK, 2008).

2.6 MÉTODO DA ANALOGIA DE GRELHA EQUIVALENTE

O método de analogia de grelha é um método muito utilizado na análise de lajes pois permite uma análise global da estrutura.

Segundo Stramandinoli (2003), a analogia de grelha consiste em substituir o pavimento por uma grelha equivalente, representando a laje através de barras perpendiculares entre si, ligadas por nós, formando uma malha. Durante a análise deve-se discretizar a laje em um número adequado de barras, que terão larguras dependentes da geometria e das dimensões do pavimento.










GUARDA (1995) afirma que a consideração feita para os carregamentos no pavimento se divide entre as barras da grelha de forma equivalente, de acordo com a área de influência de cada uma. Essas cargas podem ser consideradas uniformemente distribuídas ao longo das barras da grelha ou concentradas diretamente nos nós.

2.7 MÉTODO DE CZERNY

O método de Czerny é um método simplificado para o cálculo de lajes maciças, o qual consiste no uso de tabelas semi-empíricas baseadas na Teoria da Elasticidade.

No cálculo dos momentos fletores e nos deslocamentos pelo método de Czerny não é considerado a rigidez a torção, o que simplifica a análise da estrutura considerando cada painel de laje isolado, apoiado em vigas indeformáveis. Cada tabela é utilizada de acordo com as condições de contorno e carga de cada estrutura. As condições de apoio são representadas na Figura 11.

Figura 11 - Casos de vinculação para as tabelas de Czerny

Caso	Vinculação	Caso	Vinculação	Caso	Vinculação
1		2A		2B	
	Quatro bordas simplesmente apoiadas		Uma borda menor engastada		Uma borda maior engastada
3		4A		4B	
	Duas bordas adjacentes engastadas		Duas bordas menores engastadas		Duas bordas maiores engastadas
5A		5B		6	
	Uma borda maior apoiada		Uma borda menor apoiada		Quatro bordas engastadas

Fonte: Pinheiro (2007)

Para o cálculo dos momentos fletores são utilizadas as equações abaixo:

$$M_x = \frac{p \cdot l_x^2}{\alpha_x} \quad (1)$$

$$M_y = \frac{p \cdot l_x^2}{\alpha_y} \quad (2)$$

$$X_x = \frac{p \cdot l_x^2}{\beta_x} \quad (3)$$

$$X_y = \frac{p \cdot l_x^2}{\beta_y} \quad (4)$$

Onde:

- M_x é o momento positivo na direção x ;
- M_y é o momento positivo na direção y ;
- X_x é o momento negativo na direção x ;
- X_y é o momento negativo na direção y ;
- p é a carga distribuída na laje, em kN/m^2 ;
- l_x é o menor vão da laje, em m ;
- $\alpha_x, \alpha_y, \beta_x, \beta_y$ são os coeficientes das tabelas de Czerny;

Já o cálculo do deslocamento é realizado através de:

$$w = \frac{p \cdot l_x^4}{E \cdot h^3 \cdot \alpha_2} \quad (5)$$

Onde:

- w é o deslocamento vertical, em cm ;
- p é a combinação das cargas permanentes e acidentais, em kN/cm^2 ;
- l_x é o menor vão, em cm ;
- E é o módulo de elasticidade do material, em kN/cm^2 ;
- h é a altura da laje, em cm ;
- α_2 é o coeficiente da tabela de Czerny;

Como as tabelas de Czerny determinam momentos fletores isolados em bordas contínuas nos painéis de laje, é necessário realizar a uniformização desses momentos atuantes nas regiões de encontro dessas lajes. A compatibilização desses momentos deve ser realizada de acordo com o prescrito na NBR 6118 (2014).

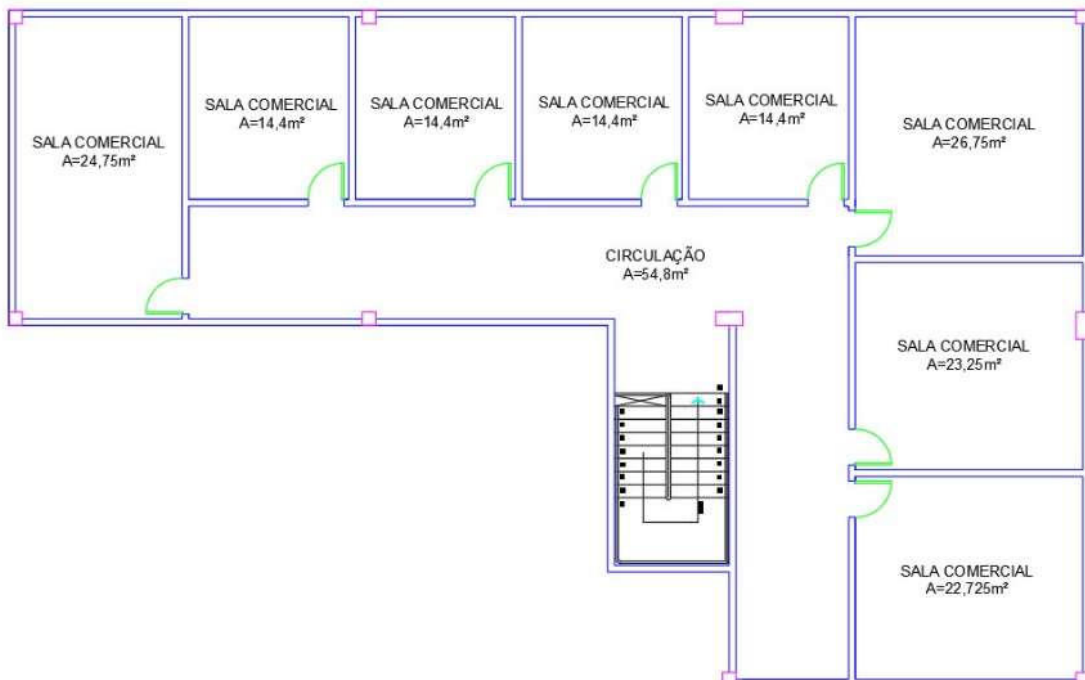
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho foram dimensionados dois painéis de laje de mesma área e mesmo uso, um pelo sistema de lajes nervuradas, utilizando o software AltoQi Eberick e um pelo sistema de lajes *bubbledeck*, de maneira manual utilizando o método de Czerny.

3.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO DO TRABALHO

O croqui do edifício comercial em que foram dimensionadas ambas as lajes pode ser visto na Figura 12. No edifício, adotou-se um pé direito de 3,2m, f_{ck} de 30 MPa, aço CA-50 e classe de agressividade ambiental II. Para melhor compreensão dos métodos de cálculo que foram utilizados, considerou-se a escada de forma isolada no edifício, fazendo com que a mesma não tenha influência nos painéis de laje. Além disso, foram consideradas vigas no contorno e entre as lajes com dimensões de 20x60cm, de forma a distribuir os esforços causados pelas lajes e evitar ligações laje-pilar, que poderiam causar fenômenos de puncionamento.

Figura 12 – Croqui do edifício



Fonte: Autoria própria. (2019)

3.2 AÇÕES CONSIDERADAS

Os carregamentos considerados nas lajes variam desde pessoas até móveis, equipamentos, divisórias, paredes, entre outros. Para determinar as ações atuantes, recorreu-se a norma NBR 6120 (2019). Nas ações atuantes das duas lajes, diferindo-se apenas o peso próprio da estrutura, pois ambas as placas tem o mesmo uso.

3.2.1 Peso próprio

O peso próprio da laje nervurada é composto pelo peso das nervuras, da mesa de concreto e do material de enchimento. O peso próprio de cada laje pode ser visto nos anexos A1 a A4, que resumem as cargas.

O peso próprio da laje *bubbledeck* foi calculado de acordo com as informações disponíveis na Tabela 2 e o peso de cada painel pode ser visto nos anexos A5 a A8, que resumem as cargas.

3.2.2 Contrapiso

O contrapiso é uma camada de argamassa colocada logo acima do concreto da superfície superior da laje para nivelar ou diminuir a rugosidade, preparando-a para receber o revestimento de piso final. Seu peso é o produto entre o peso específico da argamassa de acordo com a NBR 6120 (2019) pela espessura de argamassa considerada. Sendo assim:

$$g_{cp} = \gamma_a * e \quad (6)$$

Onde:

- g_{cp} é a carga do contrapiso, em kN/m^2 ;
- γ_a é o peso específico da argamassa de regularização, em kN/m^3 ;
- e é a espessura da camada de regularização, em m ;

Nesse caso,

$$g_{cp} = 19 * 0,05$$

$$g_{cp} = 0,95kN/m^2$$

3.2.3 Revestimento do teto

Optou-se por utilizar o revestimento do teto com placas de gesso acartonado, que tem seu peso específico fixo pela NBR 6120 (2019) de 0,25kN/m².

3.2.4 Piso

O piso é o revestimento final na superfície superior da laje. Para sua correta quantificação é necessário definir o tipo ou material do qual é composto, com o auxílio do projeto arquitetônico. Caso isso não seja possível, pode-se estimar através de valores da NBR 6120 (2019) a carga do piso por metro quadrado. Portanto, estimou-se a carga do piso como 1kN/m², de acordo com a norma.

3.2.5 Paredes

Como a laje é armada em duas direções, considera-se que a carga da parede será distribuída uniformemente na área da laje, de forma que a carga é o peso total da parede dividido pela área da laje. Os pesos específicos dos materiais a serem adotados estão em conformidade com NBR 6120 (2019) Isto é:

$$g_{par} = \frac{P_{par}}{A_{laje}} = \frac{\gamma_{par} * h_p * l_p}{A_{laje}} \quad (7)$$

$$\gamma_{par} = \gamma_{alv} * e_{alv} + \gamma_{rev} * e_{rev} \quad (8)$$

Onde:

- g_{par} é a carga da parede, em kN/m²;
- P_{par} é o peso próprio da parede, em kN;
- A_{laje} é a área da laje onde a parede está apoiada, em m²;
- γ_{par} é o peso específico da parede, em kN/m³;
- γ_{alv} é o peso específico dos tijolos de alvenaria, em kN/m³;
- γ_{rev} é o peso específico da argamassa de revestimento, em kN/m³;
- e_{alv} é a espessura da alvenaria, em m;
- e_{rev} é a espessura da camada de revestimento, em m;
- h_p é a altura da parede, em m;
- l_p é o comprimento da parede, em m;

Dessa forma, considerou-se como paredes de vedação de alvenaria no contorno do edifício e divisórias de drywall entre as salas e corredores. A carga final das paredes pode ser vista nas tabelas de carga em anexo.

3.2.6 Ações variáveis

As cargas acidentais são decorrentes da finalidade da edificação e levam em conta pessoas, materiais, móveis, veículos, entre outros. Para fins de cálculo, supõe-se que as cargas são uniformemente distribuídas na laje. O cálculo dessas cargas foi realizado segundo a NBR 6120 (2019), estando de acordo com seu uso menos favorável. Como o edifício será de uso comercial, temos dois tipos de carga que podem ser consideradas de acordo com a norma: uma carga de 2,5 kN/m² (salas de uso geral e sanitários) ou 3 kN/m² (corredores de uso comum). De modo a ir a favor da segurança, optou-se por considerar uma carga acidental de 3 kN/m².

3.3 ESPECIFICAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO DA LAJE NERVURADA

A NBR 6118 (2014) preconiza que, em lajes nervuradas bidirecionais, os esforços solicitantes podem ser calculados através de simplificações, como lajes maciças, ou quando não forem verificadas as condições da Tabela 1, sendo analisada como uma capa de concreto como uma laje maciça apoiada em uma grelha de vigas.

Tabela 1 - Condições de projeto para lajes nervuradas.

Espaçamento entre eixos das nervuras	Condições para o projeto
$\leq 65\text{cm}$	Pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa e para a verificação do cisalhamento da região das nervuras permite-se a consideração dos critérios de laje
$65\text{cm} < e \leq 110\text{cm}$	É necessária a verificação da flexão da mesa e as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas. Permite-se essa verificação caso o espaçamento entre os eixos das nervuras for até 90cm e a largura média das mesmas maior que 12cm
$> 110\text{cm}$	A mesa deve ser projetada como laje maciça apoiada sob uma grelha de vigas.

Fonte: Adaptada da NBR 6118 (2014).

3.4 SOFTWARE ALTOQI EBERICK

O software AltoQi Eberick é produzido pela empresa AltoQi e serve para elaboração de projetos estruturais em concreto armado moldado in-loco, pré-moldado, alvenaria estrutural e de estruturas mistas. Além disso, possui ambiente CAD próprio, com recursos feitos propriamente para modelagem de elementos estruturais, como pilares, vigas, lajes, escadas, fundações, entre outros e ainda verifica os elementos para o Estado Limite Último e de Serviço, de acordo com as normas brasileiras. O presente trabalho utilizou-se de uma licença comercial do software, cedida pela empresa Platte Engenharia.

Inicialmente foram lançados os pilares de seção 20x40cm, um em cada canto de cada painel de laje. Em seguida, lançou-se as vigas de seção 20x60cm, delimitando os painéis de laje.

Para o lançamento da laje, foi escolhida a opção de laje nervurada e foram lançadas as cargas permanentes em cada painel. Em seguida, foi necessário realizar a modelagem do material de enchimento. Escolheu-se utilizar enchimento em EPS de alta densidade pela facilidade de encontrar o material, além de poder ser encomendado em quaisquer dimensões. Para o edifício em consideração, foram testadas diferentes dimensões, aumentando ou reduzindo as espessuras da mesa e das nervuras até chegar em um resultado em que o software dimensionasse as armaduras. Além disso, para que fossem atendidas as condições de estado limite de serviço, optou-se por engastar as lajes umas nas outras, reduzindo assim os deslocamentos verticais.

3.5 ESPECIFICAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO DA LAJE *BUBBLEDECK*

O vão a ser vencido define a espessura padronizada das lajes *bubbledeck*, assim como sua carga permanente associada e o consumo de concreto por metro quadrado de laje. Essas informações podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Especificações padrões de lajes *Bubbledeck*

Modelo	Intervalo de espessura da laje (mm)	Diâmetro das esferas (mm)	Vão (m)	Peso próprio da laje (kN/m ²)	Quantidade de concreto (m ³ /m ²)
BD230	230-250	180	5 a 8	4,1	0,16
BD285	280-320	225	7 a 10	5,0	0,20
BD340	330-370	270	9 a 12	6,0	0,24
BD395	380-420	315	11 a 14	6,9	0,27
BD450	430-500	360	13 a 16	7,9	0,31
BD560	540-600	450	15 a 20	9,7	0,39
BD670	630-700	540	17 a 24	11,5	0,46

Fonte: Adaptado de BUBBLEDECK INTERNATIONAL (c) (2019).

Baseado em estudos teóricos e experimentais [NIELSEN (1993), HELD et al., (1999), HELD (2002) e ANDERS BRØNDEN et al (2002)], a *Bubbledeck* internacional indica que o seu sistema de lajes se comporta como uma laje maciça e podem seguir as mesmas regras de dimensionamento. Além disso, comitês técnicos da Alemanha (Deutsches Institut für Bautechnik), Dinamarca (Directorate of Building and Housing, Municipality of Copenhagen), Holanda (Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving) e Reino Unido (Concrete Research & Innovation Centre under the Imperial College of Science, Technology & Medicine) já certificaram estas conclusões.

Dessa forma, é possível utilizar os mesmos métodos de cálculo de flexão de lajes convencionais e, em seguida, realizar o dimensionamento das lajes *bubbledeck*. Contudo, algumas considerações de cálculo devem ser adotadas no dimensionamento. Uma delas é o valor da linha neutra da laje *bubbledeck*, que é diferente da laje maciça comum, pelo fato de existirem vazios em seu interior. Três parâmetros são influenciados pela posição da linha neutra: o peso próprio, deflexão e resistência ao cisalhamento.

3.5.1 Peso próprio

De acordo com o fabricante, o peso próprio de uma laje *bubbledeck* é de 30 a 35% menor, quando comparado ao peso próprio de uma laje maciça com a mesma espessura. Isso ocorre pela inserção das esferas de vazios, que ocupam o lugar do concreto e acarretam nessa redução no peso próprio. Contudo, essa porcentagem é aproximada e o valor do peso próprio deve ser calculado conforme especificado na Tabela 2.

3.5.2 Deflexão (flechas)

Para o cálculo da deflexão, analisou-se a recomendação do fabricante, que utiliza a norma britânica BS8110 (1997) e o Eurocode EC2 (2010), juntamente com uma sugestão de reduzir a rigidez a flexão, utilizando cerca de 90% de rigidez de uma laje lisa de mesma altura. Entretanto, optou-se por utilizar nesse trabalho as limitações da norma brasileira NBR 6118 (2014), pelo fato da mesma ser mais conservadora e para dar mais uniformidade a comparação, mas ainda considerando a redução na rigidez recomendada pelo fabricante.

3.5.3 Resistência ao cisalhamento

Como a resistência ao cisalhamento de uma laje é diretamente proporcional à seção transversal de concreto, essa resistência em lajes *bubbledeck* deverá ser minorada. As recomendações do fabricante indicam o uso de um fator de cortante de 0,6, o que é uma redução expressiva. De forma a evitar o fenômeno de puncionamento nas regiões de contorno dos pilares, optou-se por utilizar vigas, ao invés de se considerar uma laje lisa. A resistência da laje ao cisalhamento será calculada de acordo com o item 19.4 da NBR 6118 (2014).

3.5.4 Pré-dimensionamento

O tipo de laje *bubbledeck* apropriado deve ser escolhido de acordo com a configuração da edificação, o tamanho dos vãos entre os apoios e o carregamento aplicado.

Os diâmetros das esferas utilizados na laje são padronizados, assim como alguns valores relacionados a cada diâmetro. O espaçamento entre as esferas pode variar, assim como a redução de carga por esfera. Ambos esses fatores são dependentes do número de esferas por metro quadrado na laje. As especificações técnicas podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 - Especificações Técnicas

Diâmetro da esfera (cm)	18,00	22,50	27,00	31,50	36,00	40,50	45,00
Espaçamento mínimo entre esferas (cm)	20,00	25,00	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00
Número máximo de esferas por m ²	25,00	16,00	11,11	8,16	6,25	4,94	4,00
Espessura mínima recomendada da laje (cm)	23,00	28,00	34,00	40,00	45,00	52,00	58,00
Redução de carga por esfera (kN)	0,08	0,15	0,26	0,41	0,61	0,87	1,19
Máxima redução de carga por m ² (kN/m ²)	2,00	2,40	2,89	3,35	3,81	4,30	4,76
Fator de rigidez	0,88	0,87	0,87	0,88	0,87	0,88	0,88
Fator de cortante	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60

Fonte: Adaptado de BUBBLEDECK INTERNATIONAL (c). (2019)

Como um guia geral para fins de escopo de projeto, o fabricante define limitações para os vão máximos que podem ser adotados por essas lajes utilizando limitações de flechas. O critério é determinado pela razão entre o menor comprimento do vão (L) e a altura efetiva da laje (d), estipulado pela norma britânica BS8110 (1997) e modificado pela aplicação de um fator de 1,5, permitido pela norma britânica, no item 2.4.4.1, para levar em conta a redução do peso próprio das lajes *Bubbledeck* em relação a lajes maciças (BUBBLEDECK INTERNATIONAL (b), 2019). Essa razão é descrita a seguir:

$$\frac{L}{d} \leq 30 - \text{vãos simples} \quad (9)$$

$$\frac{L}{d} \leq 40 - \text{vãos contínuos} \quad (10)$$

$$\frac{L}{d} \leq 15 - \text{balanço} \quad (11)$$

3.6 COBRIMENTO

Para a laje nervurada foram adotados os parâmetros de cobrimento recomendados pela NBR 6118 (2014).

Para a laje *bubbledeck*, o fabricante indica que o cobrimento nominal de lajes *bubbledeck* deve cumprir 2 requisitos:

- Ser maior ou igual a 1/9 do diâmetro da esfera;
- Estar em conformidade com no mínimo de 30 minutos de resistência ao fogo no caso de incêndio, como requerido na Tabela 4:

Tabela 4 - Cobrimento nominal em função do tempo de resistência a fogo em caso de incêndio

Resistência ao fogo com máxima utilização do aço (min)	30	60	90	120	180
Cobrimento nominal (mm)	17	29	35	42	55

Fonte: Adaptado de BUBBLEDECK UK (2008)

Contudo, o trabalho também irá consultar a NBR 6118 (2014), adotando o maior valor dentre os 3 para o cobrimento, de forma a cumprir os 3 requisitos.

3.7 ALTURA DA LAJE

Para o cálculo da altura das lajes nervuradas foram adotados os parâmetros recomendados pela NBR 6118 (2014).

Diferentemente do caso de lajes maciças comuns, para lajes *bubbledeck* a altura já é pré-definida em um certo intervalo, que depende do modelo escolhido, de acordo com a Tabela 2.

3.8 MOMENTOS FLETORES

Para as lajes nervuradas, o cálculo dos momentos fletores foi realizado através do software AltoQI Eberick, que utilizou o método das grelhas equivalentes.

Para as lajes *bubbledeck*, o cálculo dos momentos fletores foi realizado utilizando o método de Czerny, baseado na teoria da elasticidade.

3.9 FLECHAS

Deve-se verificar o estado limite de deformações excessivas em lajes, de acordo com o item 19.3.1 da NBR 6118 (2014), que recomenda que sejam utilizados os critérios propostos para vigas no item 17.3.2 da mesma norma. A flecha total é a soma da flecha imediata e da flecha por fluência.

3.9.1 Flecha imediata

A flecha imediata é aquela que ocorre quando é aplicado o primeiro carregamento. O cálculo foi realizado de acordo com o item 17.3.2.1.1 da NBR 6118 (2014).

3.9.2 Flecha por fluência

A flecha por fluência é decorrente das cargas de longa duração na estrutura. Esta foi calculada de acordo com o item 17.3.2.1.2 da NBR 6118 (2014).

3.10 VERIFICAÇÃO DO CISALHAMENTO

Geralmente, as forças cortantes são facilmente resistidas pelo concreto. Como as lajes do presente trabalho não possuem uma seção completa de concreto, e são menos espessas que lajes maciças comuns, o cisalhamento foi verificado em ambas as lajes, de acordo com o item 19.4 da NBR 6118 (2014).

3.11 ARMADURAS

O dimensionamento das armaduras longitudinais e dos estribos foram realizadas de acordo com a NBR 6118 (2014), respeitando os valores mínimos e máximos recomendados pela norma. Na laje nervurada, o dimensionamento foi realizado inteiramente pelo software Eberick, que segue a NBR 6118 (2014). Já a laje bubbledeck foi dimensionada de acordo com os momentos encontrados através do método de Czerny, seguindo as recomendações da NBR 6118 (2014) pela mesma ser mais conservadora que a BS8110 (1997) e que a EN (2010).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DIMENSIONAMENTO DA LAJE BUBBLEDECK

Foi escolhido o painel do tipo BD230 de espessura de 25cm e com esferas de diâmetro de 18cm, pois este é indicado para vãos de 5 a 8m, de acordo com a Tabela 2.

4.1.1 Carregamentos considerados

No projeto, considerou-se a utilização de alvenaria para vedação, com blocos cerâmicos de 9cm e revestimento nas duas faces de 3cm cada, totalizando uma parede acabada de 15cm, o que equivale a 16kN/m^3 de acordo com a NBR 6120 (2019). O carregamento distribuído em cada laje pode ser visto nas tabelas de carga no Anexo A.

Como revestimento no teto, considerou-se a utilização de placas de gesso acartonado, com peso de $0,25\text{kN/m}^2$, de acordo com a NBR 6120.

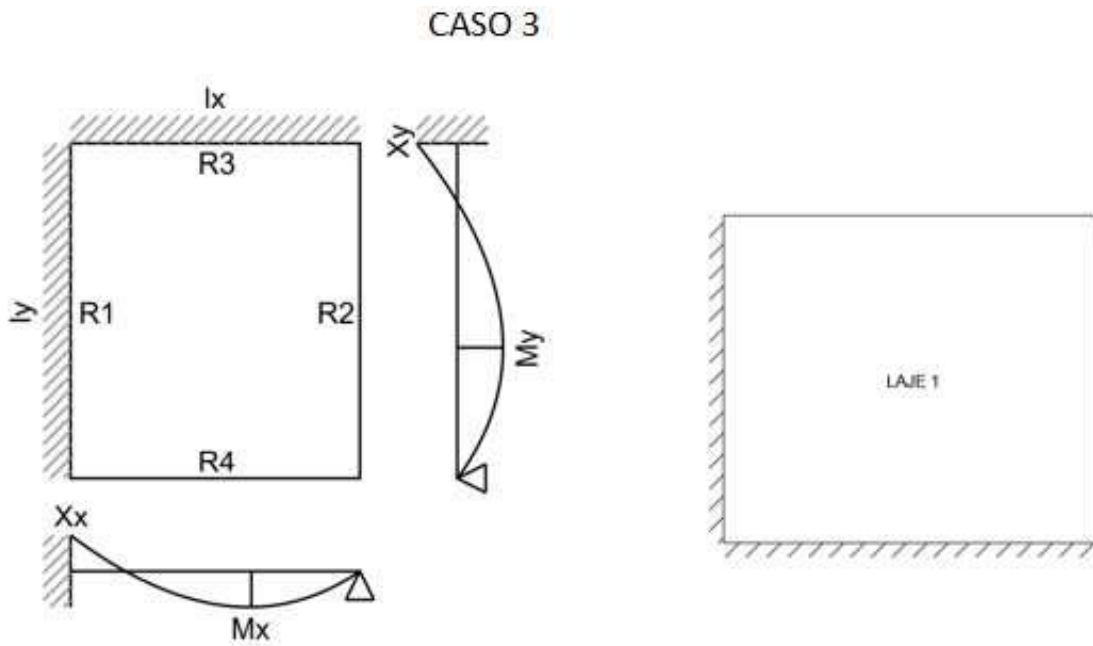
Para o piso da laje foi considerado um contrapiso de 5 cm de espessura, com um peso específico de 19kN/m^3 , totalizando um carregamento de $0,95\text{kN/m}^2$. Além disso, também foi considerado um revestimento de piso de carga de 1kN/m^2 .

Como o edifício será um prédio comercial, a norma recomenda o uso de cargas acidentais de $2,5\text{kN/m}^2$ para salas de uso geral e sanitários e 3kN/m^2 para corredores de uso comum. De forma a ir a favor da segurança, optou-se por utilizar a carga acidental de 3kN/m^2 .

4.1.2 Cálculo dos esforços utilizando o método de Czerny

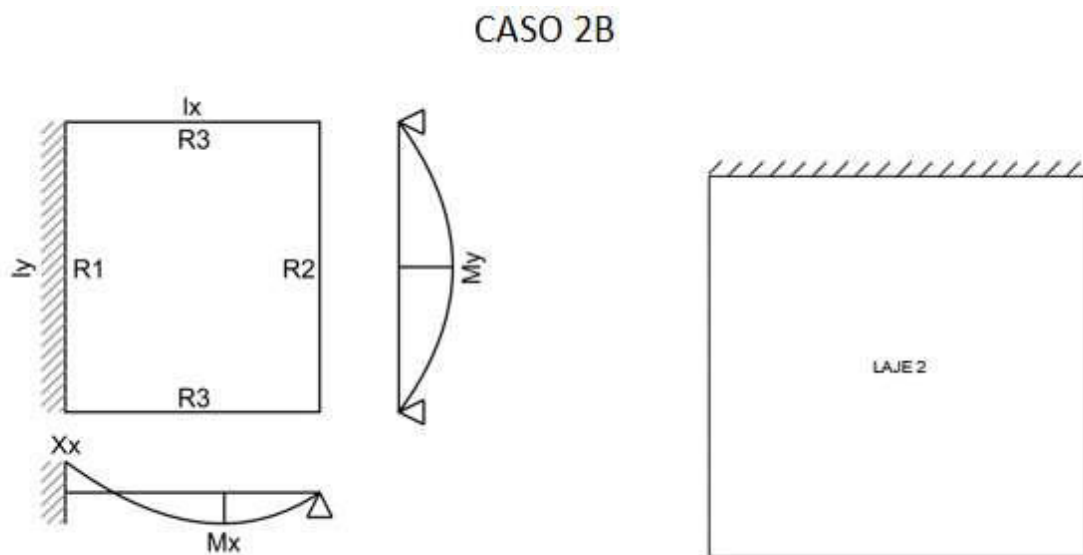
Para cada uma das lajes foi considerado um caso diferente de acordo com suas condições de apoio nas vigas e nas lajes adjacentes. Cada caso está ilustrado nas Figura 13, Figura 14 e Figura 16.

Figura 13 - Caso de vinculação da Laje 1



Fonte: Autoria própria. (2020)

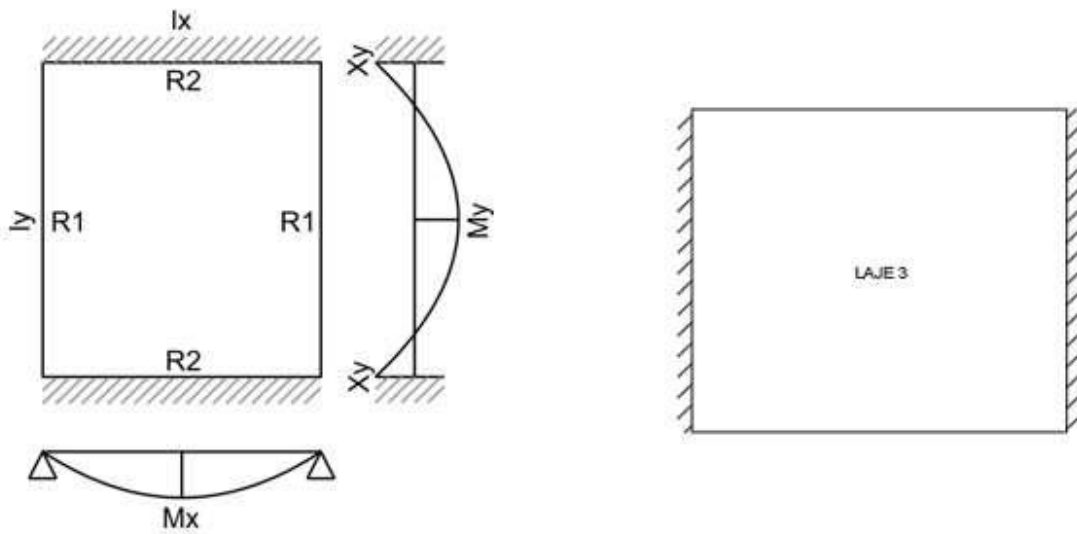
Figura 14 - Caso de vinculação da Laje 2



Fonte: Autoria própria. (2019)

Figura 15 - Caso de vinculação da Laje 3

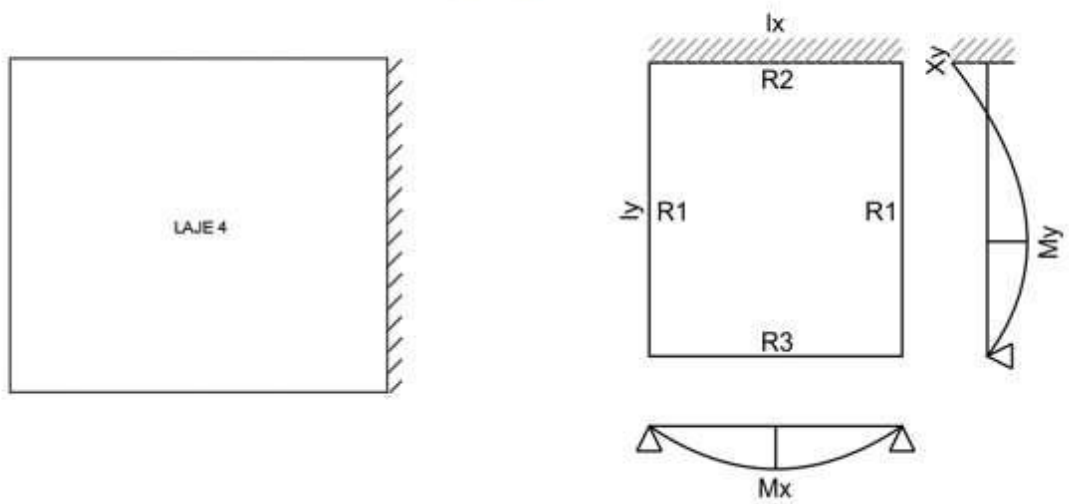
CASO 4A



Fonte: Autoria própria. (2019)

Figura 16 - Caso de vinculação da Laje 4

CASO 2A



Fonte: Autoria própria. (2019)

Os momentos obtidos através das equações 1, 2, 3 e 4 com os coeficientes das tabelas de Czerny podem ser vistos na Tabela 5.

Como as lajes do pavimento foram consideradas isoladas umas das outras, os momentos fletores negativos em bordas comuns a duas lajes são geralmente diferentes. Dessa forma, a NBR 6118 (2014) permite que seja feita uma compatibilização desses momentos fletores negativos, de acordo com o item 14.7.6.2 da mesma. Os momentos compatibilizados podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 5 - Momentos calculados

Momentos calculados					
Laje	Caso	Mx (kN.m)	My (kN.m)	Xx (kN.m)	Xy (kN.m)
Laje 1	1	30,228	18,179	64,990	58,638
Laje 2	2B	34,611	26,378	91,327	-
Laje 3	4A	19,894	24,590	-	65,983
Laje 4	2A	30,156	29,633	-	82,060

Fonte: Autoria própria. (2020)

Tabela 6 - Momentos compatibilizados de acordo com a NBR 6118 (2014)

Momentos compatibilizados					
Laje	Caso	Mx (kN.m)	My (kN.m)	Xx (kN.m)	Xy (kN.m)
Laje 1	1	43,400	21,850	78,160	62,310
Laje 2	2B	47,780	26,378	78,160	-
Laje 3	4A	19,894	24,590	-	74,020
Laje 4	2A	30,156	37,670	-	74,020

Fonte: Autoria própria. (2020)

4.1.3 Armaduras

Antes de calcular as armaduras deve-se verificar qual é a armadura máxima e mínima recomendadas pela NBR 6118 (2014). A soma das áreas das armaduras de compressão e de tração não deve ultrapassar 4% da área de concreto. Já a armadura mínima para lajes armadas em duas direções é dada nas Tabela 7 e Tabela 8.

Além disso, também deve-se estimar a altura útil (d) da seção, que leva em conta a altura da laje, o cobrimento recomendado pela norma para dada classe de agressividade ambiental e pelo diâmetro estimado da armadura longitudinal

tracionada. Nesse caso, a altura da laje é de 25cm, cobrimento de 2,5cm (para classe de agressividade ambiental II) e diâmetro estimado de 1cm.

$$d = h - c - \frac{\Phi}{2}$$

Onde:

- d é a altura útil da seção, em cm;
- h é a altura da laje, em cm;
- c é o cobrimento nominal recomendado pela NBR 6118, em cm;
- Φ é o diâmetro da armadura longitudinal tracionada, em cm;

Dessa forma:

$$d = 25 - 2,5 - \frac{1}{2}$$

$$d = 22\text{cm}$$

Tabela 7 - Valores mínimos para armaduras

Armadura	Elementos estruturais sem armaduras ativas	Elementos estruturais com armadura ativa aderente	Elementos estruturais com armadura ativa não aderente
Armaduras negativas	$\rho_s \geq \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,67 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,67 \rho_{\min}$ (ver 19.3.3.2)
Armaduras negativas de bordas sem continuidade	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min}$		
Armaduras positivas de lajes armadas nas duas direções	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$
Armadura positiva (principal) de lajes armadas em uma direção	$\rho_s \geq \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$
Armadura positiva (secundária) de lajes armadas em uma direção	$A_g/s \geq 20\%$ da armadura principal $A_g/s \geq 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ $\rho_s \geq 0,5 \rho_{\min}$		-
onde $\rho_s = A_s/b_w h$ e $\rho_p = A_p/b_w h$. NOTA Os valores de ρ_{\min} são definidos em 17.3.5.2.1.			

Fonte: Adaptada da NBR 6118 (2014).

Tabela 8 - Taxa mínima de armação

Forma da seção	Valores de ρ_{min}^a ($A_{s,min}/A_c$) %														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,21	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256

^a Os valores de ρ_{min} estabelecidos nesta Tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $d/h = 0,8$ e $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, ρ_{min} deve ser recalculado.

Fonte: Adaptada da NBR 6118 (2014).

Dessa forma, levando em conta a área das esferas:

$$A_{s_{m\acute{a}x}} = 0,02 \cdot \left(100 \cdot 25 - \frac{100}{20 + 18} \cdot \pi \cdot \frac{18^2}{4} \right)$$

$$A_{s_{m\acute{a}x}} = 36,6 \text{ cm}^2/m$$

E também:

$$A_{s_{min+}} = 0,0015 \cdot 0,67 \cdot 100 \cdot 25$$

$$A_{s_{min+}} = 2,5 \text{ cm}^2/m$$

$$A_{s_{min-}} = 0,0015 \cdot 100 \cdot 25$$

$$A_{s_{min-}} = 3,75 \text{ cm}^2/m$$

O cálculo das armaduras de flexão é feito de forma semelhante ao cálculo de armaduras de flexão em vigas, supondo faixas com largura de um metro. Fazendo uso das equações com coeficientes tabelas, determina-se o coeficiente K_c através de:

$$K_c = \frac{b_w \cdot d^2}{M_d}$$

Onde:

- b_w é a largura da faixa, em cm;
- d é a altura útil da seção, em cm;

- M_d é o momento máximo atuante na seção, em kN.cm;

Após encontrado o K_c , utilizando a Anexo B. 4, determinam-se os coeficientes β_x e K_s e o domínio em que a laje está. Sendo β_x a relação x/d , onde x é a altura da linha neutra. Essa relação deve ser menor ou igual a 0,45, para concretos com $f_{ck} \leq 50$ MPa.

Se atendidos os valores limites, a área da armadura, em cm^2/m é calculada com:

$$A_s = K_s \frac{M_d}{d}$$

Onde:

- A_s é a área de aço, em cm^2/m ;
- M_d é o momento máximo atuante na seção, em kN.cm;
- d é a altura útil da seção, em cm;

Em seguida, utilizando Anexo C. 1, a distribuição do aço é escolhida de acordo com a área de aço encontrada. Os resultados obtidos podem ser vistos nas Tabela 9 a 12.

Tabela 9 - Armaduras positivas na direção X

Armadura positiva direção x									
Laje	M_d (kN.cm)	b_w (cm)	d (cm)	k_c	x/d	k_s	a_s (cm^2/m)	dist	a_{se} (cm^2/m)
Laje 1	4340	100	22	11,15	0,06	0,024	4,73	ø10 c/16	5
Laje 2	4778	100	22	10,13	0,07	0,024	5,21	ø8 c/9,5	5,26
Laje 3	1989,4	100	22	24,33	0,03	0,023	2,08	ø6,3 c/12,5	2,52
Laje 4	3015,6	100	22	16,05	0,05	0,023	3,15	ø8 c/15	3,33

Fonte: Autoria própria. (2020)

Tabela 10 - Armaduras positivas na direção Y

Armadura positiva direção y									
Laje	M_d (kN.cm)	b_w (cm)	d (cm)	k_c	x/d	k_s	a_s (cm^2/m)	dist	a_{se} (cm^2/m)
Laje 1	2185	100	22	22,15	0,030	0,023	2,28	ø6,3 c/12,5	2,52
Laje 2	2637,8	100	22	18,35	0,040	0,023	2,76	ø6,3 c/11	2,86
Laje 3	2459	100	22	19,68	0,035	0,023	2,57	ø6,3 c/12	2,62
Laje 4	3767	100	22	12,85	0,055	0,0235	4,02	ø8 c/12,5	4

Fonte: Autoria própria. (2020)

Tabela 11 - Armaduras negativas na direção X

Armadura negativa direção x									
Laje	Md (kN.cm)	b _w (cm)	d (cm)	k _c	x/d	k _s	a _s (cm ² /m)	dist	a _{se} (cm ² /m)
Laje 1	7816	100	22	6,19	0,12	0,024	8,53	ø10 c/9	8,89
Laje 2	7816	100	22	6,19	0,12	0,024	8,53	ø10 c/9	8,89
Laje 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Laje 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria. (2020)

Tabela 12 - Armaduras negativas na direção Y

Armadura negativa direção y									
Laje	Md (kN.cm)	b _w (cm)	d (cm)	k _c	x/d	k _s	a _s (cm ² /m)	dist	a _{se} (cm ² /m)
Laje 1	6231	100	22	7,77	0,10	0,024	6,80	ø10 c/12	6,67
Laje 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Laje 3	7402	100	22	6,54	0,11	0,024	8,07	ø10 c/10	8
Laje 4	7402	100	22	6,54	0,11	0,024	8,07	ø10 c/10	8

Fonte: Autoria própria. (2020)

4.1.4 Verificação do cisalhamento

Algumas lajes podem prescindir de armadura transversal para resistir as forças de tração oriundas da força cortante quando a força cortante de cálculo a uma distância d da face do apoio se não obedecerem à expressão:

$$V_{sd} \leq V_{Rd1}$$

No qual:

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k(1,2 + 40\rho_1) + 0,15\sigma_{cp}]b_w \cdot d$$

$$k = \begin{cases} 1, & \text{para elementos onde 50\% da armadura} \\ & \text{inferior não chega até o apoio} \\ 1,6 - d, & \text{para os demais casos} \end{cases}$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c}$$

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

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d}, \text{ não maior que } 0,02$$

Onde:

- V_{sd} é a força cortante atuante na seção, em kN;
- V_{rd1} é a força cortante máxima resistida pela seção de concreto, em kN;
- τ_{sd} é a tensão resistente de cálculo do concreto à força cortante, em kN/cm²;
- N_{sd} é a força longitudinal na seção devido à proteção ou carregamento, em kN;
- A_c é a área de concreto da seção, em cm²;
- A_{s1} é a área da armadura de tração, em cm²;
- b_w é a largura mínima da seção ao longo da altura útil, em cm;
- d é a altura útil, em cm;

Os resultados das verificações podem ser vistos na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados da verificação ao cisalhamento

Laje	V_{sd} (kN)	d (cm)	b_w (cm)	A_{s1} (cm ² /m)	τ_{rd} (kN/cm ²)	p_1	k	$0,6 \cdot V_{Rd1}$ (kN)	Verificação
L1	40,724	22	100	5	0,0362	0,0023	1,38	85,139	OK
L2	55,478	22	100	5,26	0,0362	0,0024	1,38	85,451	OK
L3	38,467	22	100	3,85	0,0362	0,0018	1,38	83,760	OK
L4	52,042	22	100	3,85	0,0362	0,0018	1,38	83,760	OK

Fonte: Autoria própria. (2020)

Portanto, como a força cortante atuante na seção é menor que a força cortante máxima resistida minorada em 40% não serão necessários o uso de armaduras transversais.

4.1.5 Flechas

É importante fazer a verificação do estado limite de serviço de forma a identificar possíveis deslocamentos excessivos nas lajes. Os deslocamentos limites podem ser vistos na Tabela 14.

Tabela 14 - Deslocamentos limites

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

Fonte: NBR 6118 (2014).

Utilizando a equação 5 encontram-se os valores para os deslocamentos verticais identificados como w_i na Tabela 15. Além disso, também se calculou a flecha diferida no tempo identificada como w_f na mesma tabela, de acordo com o item 17.3.2.1.2 da NBR 6118 (2014). Os resultados finais podem ser vistos na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 15 - Deslocamentos verticais nas lajes bubbledeck

Laje	g (kN/m ²)	q (kN/m ²)	q* Ψ (kN/m ²)	p (kN/m ²)	h (cm)	0,88*E (kN/cm ²)	α_2	w_i (cm)	w_f (cm)	w máx (cm)	limite (L/250)(cm)
L1	8,79	3	1,2	9,99	25	2361,78	31,7	0,205	0,475	0,680	2,8
L2	9,52	3	1,2	10,72	25	2361,78	31,2	0,381	0,885	1,266	3,2
L3	8,97	3	1,2	10,17	25	2361,78	30,4	0,218	0,505	0,722	2,8
L4	9,90	3	1,2	11,10	25	2361,78	22,3	0,324	0,751	1,075	2,8

Fonte: Autoria própria. (2020)

4.2 DIMENSIONAMENTO DA LAJE NERVURADA

Para o dimensionamento da laje nervurada considerou-se a utilização de um material de enchimento de EPS de alta densidade pois o mesmo pode ser encomendado em qualquer dimensão, o que permite a moldagem de nervuras com qualquer espessura, altura e distância entre eixos.

4.2.1 Carregamentos considerados

Como o pavimento é o mesmo da laje bubbledeck, com exceção do peso próprio, todas as cargas aplicadas nas lajes são os mesmos. Um resumo dessas cargas pode ser visto no Anexo A.5 a A.8.

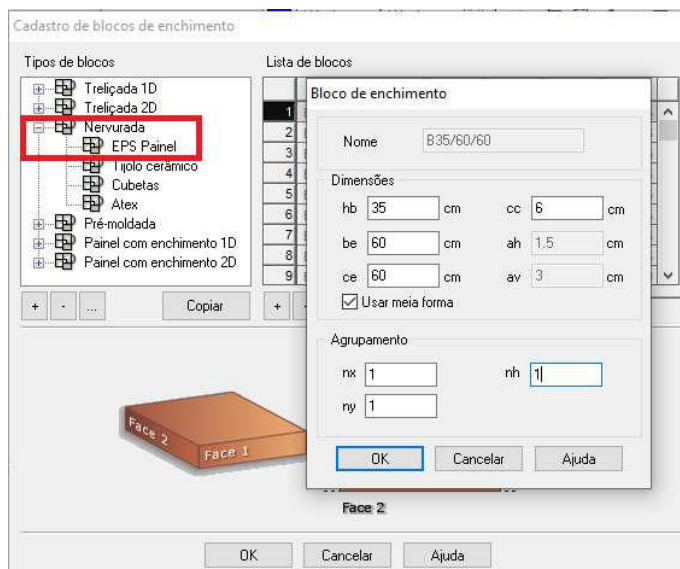
4.2.2 Modelagem da laje no software AltoQI Eberick

Inicialmente foram lançados pilares de 20x40cm nos cantos do pavimento, e então em distâncias de 7 a 8m. Em seguida, foram lançadas vigas de 20x70cm de forma a delimitar as lajes.

4.2.3 Cadastro de blocos de enchimento

Como não havia um bloco pré-cadastrado no sistema que cumprisse as necessidades do projeto foi necessário realizar o cadastro de um novo bloco. O painel utilizado pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 - Cadastro do bloco de EPS



Fonte: Autoria própria (2020).

Onde:

- hb é a altura do painel, em cm;
- be é largura em x do painel, em cm;
- ce é a largura em y do painel, em cm;
- cc é metade do espaçamento entre painéis, em cm;

Posteriormente, foram lançadas as lajes com as cargas de projeto, como pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Lançamento da laje 1

Fonte: Autoria própria (2020).

Nesse caso, a carga do revestimento é a soma da carga do contrapiso, do piso e do revestimento de gesso acartonado. A carga extra é a cargas das paredes de alvenaria e das paredes de drywall.

Além disso, também foi necessário realizar o engaste manualmente entre as lajes adjacentes, a fim de serem mantidas as condições de contorno do projeto.

O programa encontrou os seguintes esforços na laje:

- Momento negativo máximo - 122,31 kN.m/m
- Momento positivo máximo - 86,09 kN.m/m.
- Força cortante máxima – 116,38 kN

Os esforços máximos em cada laje podem ser vistos nas Tabela 16 e Tabela 17.

Tabela 16 - Tabela resumo dos momentos máximos atuantes no pavimento

Laje	Momentos positivos		Momentos negativos	
	Mdx (kN.m/m)	Mdy (kN.m/m)	Mdx (kN.m/m)	Mdy (kN.m/m)
Laje 1	77,42	60,32	-118,7	-112,2
Laje 2	81,04	55,63	-24,5	-117,8
Laje 3	27,38	85,37	-122,3	-30,2
Laje 4	52,93	86,09	-74,6	0

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 17 - Tabela resumo das forças cortantes máximas atuantes no pavimento

Laje	Vsdx (kN/nervura)	Vsdy (kN/nervura)
L1	83,79	69,62
L2	58,14	109,07
L3	105,53	48,63
L4	41,23	33,99

Fonte: Autoria própria (2020).

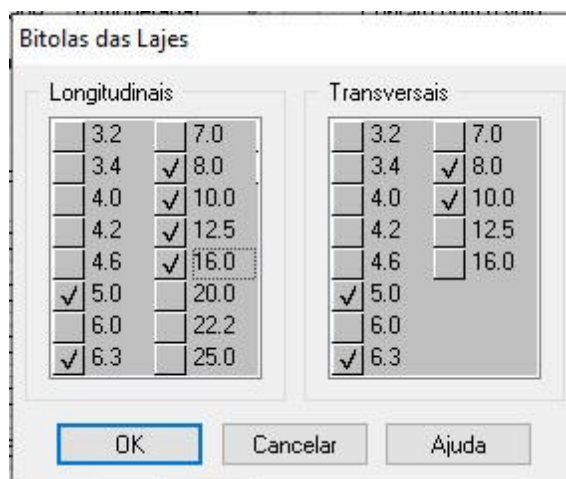
4.2.4 Armaduras

Nas configurações do software é possível escolher as bitolas a serem utilizadas nas armaduras longitudinais e transversais, como mostrado na Figura 19.

Além disso, também é possível configurar coeficientes que priorizam diferentes situações no momento da escolha das armaduras. São elas, a área de aço, no qual o software calcula a armadura escolhida mais próxima da área de aço calculada,

gerando maior economia, a mão de obra, que calcula o menor número de barras, gerando menor necessidade de mão de obra, e o diâmetro das barras, que seleciona as barras de menor diâmetro, facilitando na dobra das armaduras. No presente trabalho, optou-se por priorizar a área de aço.

Figura 19 - Configuração de bitolas das lajes



Fonte: Autoria própria (2020).

As armaduras calculadas pelo programa podem ser vistas nas Tabela 18 a Tabela 24.

Tabela 18 - Armaduras positivas na direção X

ARMADURA POSITIVA (DIREÇÃO X)				
Laje	Mdx (kN.m/m)	Asx (cm ² /nervura)	Distribuição escolhida	Asex (cm ² /nervura)
Laje 1	77,42	3,45	7φ8 c/nervura	3,52
Laje 2	81,04	3,51	3φ12,5 c/nervura	3,68
Laje 3	27,38	1,14	1φ12,5 c/nervura	1,23
Laje 4	52,93	2,27	3φ10 c/nervura	2,36

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 19 - Armaduras positivas na direção Y

ARMADURA POSITIVA (DIREÇÃO Y)				
Laje	Mdy (kN.m/m)	Asy (cm ² /nervura)	Distribuição escolhida	Asex (cm ² /nervura)
Laje 1	60,32	2,7	6φ8 c/nervura	3,02
Laje 2	55,63	2,41	2φ12,5 c/nervura	2,45
Laje 3	85,37	3,83	3φ12,5 c/nervura	3,68
Laje 4	86,09	3,84	3φ12,5 c/nervura	3,68

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 20 - Armaduras negativas na direção X

ARMADURA NEGATIVA (DIREÇÃO X)				
Laje	Mdx (kN.m/m)	Asx (cm ² /nervura)	Distribuição escolhida	Asex (cm ² /m)
Laje 1	-118,7	5,71	φ8 c/ 6cm	8,38
Laje 2	-24,5	1,03	φ6,3c/ 20cm	1,56
Laje 3	-122,3	5,92	φ8 c/ 6cm	8,38
Laje 4	-74,6	3,37	φ10 c/ 16cm	4,91

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 21 - Armaduras negativas na direção Y

ARMADURA NEGATIVA (DIREÇÃO Y)				
Laje	Mdy (kN.m/m)	Asy (cm ² /nervura)	Distribuição escolhida	Asey (cm ² /m)
Laje 1	-112,2	5,53	φ12,5 c/ 16cm	7,67
Laje 2	-117,8	5,92	φ8 c/ 6cm	8,38
Laje 3	-30,2	1,33	φ6,3c/ 16cm	1,95
Laje 4	0	0,52 (Asmin)	φ5 c/ 20cm	0,98

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 22 - Armaduras negativas na continuidade das lajes

ARMADURA NEGATIVA (na continuidade)				
Trecho	Md (kN.m/m)	As (cm ² /m)	Distribuição escolhida	Ase (cm ² /m)
L1-L3	-122,31	8,22	φ8 c/ 6cm	8,38
L1-L2	-117,78	7,92	φ12,5c/ 15cm	8,18
L3-L4	-74,61	4,68	φ10 c/ 16cm	4,91

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 23 - Armaduras transversais nas nervuras da direção X

ESTRIBOS					
Laje	Direção X				
	Vsd (kN/nervura)	Vrd1 (kN/nervura)	Vrd2 (kN/nervura)	Vsw (kN/nervura)	Asw (cm ² /m)
L1	83,79	30,27	227,28	45,01	4,29
L2	58,14	30,98	233,95	18,21	1,69
L3	105,53	27,11	240,57	64,47	5,81
L4	41,23	28,73	235,22	1,08	0,1

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 24 - Armaduras transversais nas nervuras da direção Y

ESTRIBOS					
Laje	Direção Y				
	Vsd (kN/nervura)	Vrd1 (kN/nervura)	Vrd2 (kN/nervura)	Vsw (kN/nervura)	Asw (cm ² /m)
L1	69,62	29,27	225,65	31,11	2,99
L2	109,07	28,76	232,92	69,31	6,45
L3	48,63	30,5	226,31	4,01	0,67
L4	33,99	30,59	227,84	0	0

Fonte: Autoria própria (2020).

4.2.5 Flechas

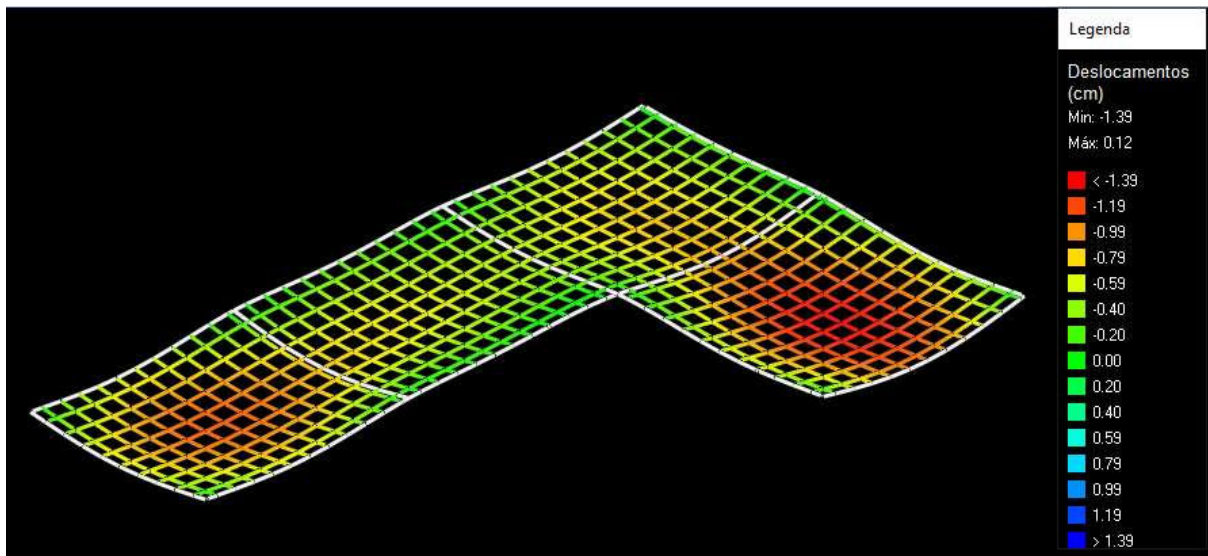
O software utiliza métodos numéricos para calcular o deslocamento vertical da laje, portanto um erro estimado é associado ao valor encontrado. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 25, bem como a grelha deformada na Figura 20.

Tabela 25 - Deslocamentos verticais calculados pelo software

LAJE	DESLOCAMENTOS				Erro estimado (%)
	Imediatos (cm)	Diferidos (cm)	Total (cm)	Limite (cm)	
L1	1,2	1,22	2,42	2,8	-1,26
L2	1,69	1,41	3,1	3,2	0,23
L3	1,14	1,11	2,25	2,8	-2,09
L4	1,34	1,13	2,47	2,8	-0,04

Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 20 - Grelha deformada



Fonte: Autoria própria (2020).

4.3 COMPARATIVO DE GASTO DE MATERIAIS

O volume de concreto das lajes bubbledeck foi calculado multiplicando-se a área da laje pelo volume de concreto por metro quadrado indicado na Tabela 2. Já o aço foi calculado utilizando as seguintes determinações:

Ancoragem até metade da viga, sem gancho, para as armaduras positivas;

E para as armaduras negativas:

$$C = 0,25 \cdot l_x + l_b$$

Onde:

- C é o comprimento da barra em um lado da viga, em cm;
- l_x é o maior vão entre os menores vãos das lajes adjacentes, em cm;
- l_b é o comprimento de ancoragem das barras, sem gancho, com boa aderência e C30 dado no Anexo C. 2, em cm;

Além disso, considerou-se que o comprimento C deverá ser arredondado para o múltiplo de 5 mais próximo e será alongado metade desse comprimento outro lado da viga. A quantidade total de material pode ser vista na Tabela 26.

Já as quantidades de material das lajes nervuradas são dadas pelo software AltoQI Eberick e podem ser vistas na Tabela 27.

Analisando essas quantidades de material, pode-se notar que o modelo de laje bubbledeck utiliza cerca de 6,5% a menos de concreto e cerca de 3% a menos de aço por pavimento. Uma provável explicação para a redução do concreto é pela geometria da laje, que tem uma altura menor do que a laje nervurada. Para o aço, pode-se dizer que a redução se dá pelo fato da laje bubbledeck do estudo de caso em questão dispensa armaduras transversais, que são necessárias na laje nervurada equivalente.

Tabela 26 - Quantitativo de concreto e aço utilizados nas lajes bubbledeck

LAJE BUBBLEDECK				
Aço	Diâmetro (mm)	Comprimento total (m)	Peso + 10% (kg)	Volume de concreto (m³)
CA50	6,3	1415,9	381,6	37,12
	8	1439,4	625,4	
	10	1669,3	1132,9	
	12,5	0,0	0,0	
CA60	5	0,0	0,0	
TOTAL		-	2139,9	

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 27 - Quantitativo de concreto e aço utilizados nas lajes nervuradas

LAJE NERVURADA				
Aço	Diâmetro (mm)	Comprimento total (m)	Peso + 10% (kg)	Volume de concreto (m³)
CA50	6,3	393,2	106,0	39,7
	8	1221,8	530,9	
	10	408,9	277,5	
	12,5	1246,6	1320,5	
CA60	5	2980	504,8	
TOTAL		-	2234,9	

Fonte: Autoria própria (2020).

5 CONCLUSÃO

O estudo mostrou que novas alternativas tecnológicas de construção, como os sistemas construtivos de lajes com vazios estão sendo cada vez mais adotadas nacional e internacionalmente, apresentando soluções com desempenho adequado e gerando uma redução de consumo de materiais em sua construção.

Ao realizar uma análise comparativa entre os dois métodos apresentados neste trabalho, podemos notar que o sistema de lajes Bubbledeck apresenta um consumo de material inferior ao sistema de lajes nervuradas, o que pode se destacar mais ainda conforme o aumento no número de pavimentos do edifício. Além disso, o método Bubbledeck também apresenta menores deflexões e menor altura na laje.

A solução também se mostrou simples em seu dimensionamento, mesmo adaptado a norma brasileira. Contudo, é importante salientar que esse sistema construtivo exige um grau de sofisticação maior, devido a necessidade de mão-de-obra especializada, que não existe em grande escala no Brasil atualmente, visto que esse método é relativamente novo no país.

Por outro lado, o sistema de lajes nervuradas tem se mostrado um método excepcional, sendo aplicado cada vez mais. Além do mais, esse tipo de laje é normatizado no Brasil, o que implica em uma maior qualidade tanto no cálculo, que pode ser feito facilmente em vários softwares, quanto na execução.

Por fim, conclui-se que, será vantajoso utilizar o sistema de laje bubbledeck caso a demanda por esse tipo de laje cresça, o que irá aumentar a oferta de mão-de-obra qualificada, e conseqüentemente, sua viabilidade. Caso esse cenário não aconteça, o uso de lajes nervuradas é satisfatório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERS BRØNDEN; HAUKOHL, J. C.; JØRGENSEN, M. H.

Gennemlokningsstyrken af Bobbledeak. Report. The Technical University of Denmark, Lyngby - Denmark: 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120:** Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BORGES, Alberto Nogueira. **Curso prático de cálculo de concreto armado.** 2. ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 2007.

BRITISH STANDART. **BS8110:** Structural use of concrete. London: Board For Building And Civil Engineering, 1997.

BUBBLEDECK INTERNATIONAL (a). **Product Introduction.** Disponível em: <<http://www.bubbledeck.com/download/BubbleDeck.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2019.

BUBBLEDECK INTERNATIONAL (b). **BubbleDeck technology.** Disponível em: <<http://www.bubbledeck.com/>>. Acesso em: 15 set. 2019.

BUBBLEDECK INTERNATIONAL (c). **Design Guide.** Disponível em: <http://www.bubbledeck.com/download/BD_INT_DesignGuide.pdf>. Acesso em: 12 out. 2019.

BUBBLEDECK UK (United Kingdom). **Bubbledeck Technical Manual.** Disponível em: <<http://www.bubbledeck-uk.com/pdf/2-BDTechManualv1a.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2019.

CARVALHO, Roberto Chust; PINHEIRO, Libânio Miranda. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: Volume 2.** São Paulo: PINI, 2009.

DIAS, Ricardo Henrique. **Análise numérica de pavimentos de edifícios em lajes nervuradas.** 2003. 455 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.

EUROPEAN STANDART. **EN1992:** Design of concrete structures. Brussels: CEN, 2010.

GUARDA, M. C. C. **Cálculo de lajes-cogumelo pela teoria das charneiras plásticas.** 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

HELD, M. S. Report - **Untersuchung an BubbleDeck Modulen,** Technical University of Darmstadt. Darmstadt: 2002.

- HELD, M.S.; STEFAN, E.; DENK, H; PFEFFER, K. **BubbleDeck. Design of Biaxial Hollow Slabs**. Annual Journal on Concrete and Concrete Structures, v. 14, 1999.
- LAI, Tina. **Structural Behavior of BubbleDeck* Slabs And Their Application to Lightweight Bridge Decks**. 2009. 42 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Massachusetts Institute Of Technology, Cambridge, 2010.
- LOUREIRO, G. J. **Projeto de Lajes Protendidas com Cordoalhas Engraxadas**, VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, 2006, Anais.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concreto: Microestruturas, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.
- NICÁCIO, Wanderley Gustavo. **Comportamento à punção de lajes de concreto armado tipo *bubbledeck***. 2018. 198 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.
- NIELSEN, M. P. **BubbleDeck Report from AEC Consulting Engineers Lt. Report**, 1993.
- PALLA, Anna Elizabete Fonseca. **Referencial teórico e estudo comparativo do dimensionamento de Lajes *Bubbledeck***. 2017. 43 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.
- SAGADEVAN, R.; RAO, B. N. Experimental and analytical investigation of punching shear capacity of biaxial voided slabs. **Structures**, Chennai, v. 20, p.340-352, mar. 2019.
- STRAMANDINOLI, J.S. **Contribuições à análise de lajes nervuradas por analogia de grelha**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2003.

ANEXOS

ANEXO A – TABELAS DE CARGAS NAS LAJES

Anexo A. 1 - Cargas na Laje Bubbledeck 1

LAJE 1					
CARGAS PERMANENTES	Peso específico do material (kN/m ³)	Espessura (m)	Comprimento (m)	Área (m ²)	Carga aplicada na laje (kN/m ²)
Peso próprio	-	0,25	-	56	4,1
Contrapiso	19	0,05	-		0,95
Revestimento do teto (Gesso acartonado)	0,25	-	-		0,25
Piso	1	-	-		1
Alvenaria	16	0,15	15		2,06
Divisórias de drywall	0,5	0,15	15		0,43
CARGAS ACIDENTAIS	-	-	-		-
Salas de uso geral e sanitários	2,5	-	-		2,5
Corredores de uso comum	3	-	-		3
Carga permanente total (kN/m²)					8,79
Carga acidental total (kN/m²)					3,00

Fonte: Autoria própria. (2020)

Anexo A. 2 - Cargas na Laje Bubbledeck 2

LAJE 2					
CARGAS PERMANENTES	Peso específico do material (kN/m ³)	Espessura (m)	Comprimento (m)	Área (m ²)	Carga aplicada na laje (kN/m ²)
Peso próprio	-	0,25	-	64	4,1
Contrapiso	19	0,05	-		0,95
Revestimento do teto (Gesso acartonado)	0,25	-	-		0,25
Piso	1	-	-		1
Alvenaria	16	0,15	24		2,88
Divisórias de drywall	0,5	0,15	13,5		0,34
CARGAS ACIDENTAIS	-	-	-		-
Salas de uso geral e sanitários	2,5	-	-		2,5
Corredores de uso comum	3	-	-		3
Carga permanente total (kN/m²)					9,52
Carga acidental total (kN/m²)					3,00

Fonte: Autoria própria. (2020)

Anexo A. 3 - Cargas na Laje Bubbledeck 3

LAJE 3					
CARGAS PERMANENTES	Peso específico do material (kN/m ²)	Espessura (m)	Comprimento (m)	Área (m ²)	Carga aplicada na laje (kN/m ²)
Peso próprio	-	0,25	-	56	4,1
Contrapiso	19	0,05	-		0,95
Revestimento do teto (Gesso acartonado)	0,25	-	-		0,25
Piso	1	-	-		1
Alvenaria	16	0,15	16		2,19
Divisórias de drywall	0,5	0,15	16,5		0,47
CARGAS ACIDENTAIS	-	-	-		-
Salas de uso geral e sanitários	2,5	-	-		2,5
Corredores de uso comum	3	-	-		3
Carga permanente total (kN/m²)					8,97
Carga acidental total (kN/m²)					3,00

Fonte: Autoria própria. (2020)

Anexo A. 4 - Cargas na Laje Bubbledeck 4

LAJE 4					
CARGAS PERMANENTES	Peso específico do material (kN/m ²)	Espessura (m)	Comprimento (m)	Área (m ²)	Carga aplicada na laje (kN/m ²)
Peso próprio	-	0,25	-	56	4,1
Contrapiso	19	0,05	-		0,95
Revestimento do teto (Gesso acartonado)	0,25	-	-		0,25
Piso	1	-	-		1
Alvenaria	16	0,15	23		3,15
Divisórias de drywall	0,5	0,15	15,5		0,44
CARGAS ACIDENTAIS	-	-	-		-
Salas de uso geral e sanitários	-	-	-		2,5
Corredores de uso comum	-	-	-		3
Carga permanente total (kN/m²)					9,90
Carga acidental total (kN/m²)					3,00

Fonte: Autoria própria. (2020)

Anexo A. 5 - Cargas na Laje Nervurada 1

LAJE 1					
CARGAS PERMANENTES	Peso específico do material (kN/m³)	Espessura (m)	Comprimento (m)	Área (m²)	Carga aplicada na laje (kN/m²)
Peso próprio	25	-	-	56	4,615
Enchimento (EPS de alta densidade)	0,3	0,35	-		0,105
Contrapiso	19	0,05	-		0,95
Revestimento do teto (Gesso acartonado)	0,25	-	-		0,25
Piso	1	-	-		1
Alvenaria	16	0,15	15		2,06
Divisórias de drywall	0,5	0,15	15		0,43
CARGAS ACIDENTAIS	-	-	-		-
Salas de uso geral e sanitários	2,5	-	-		2,5
Corredores de uso comum	3	-	-		3
Carga permanente total (kN/m²)					9,41
Carga acidental total (kN/m²)					3,00

Fonte: Autoria própria. (2020)

Anexo A. 6 - Cargas na Laje Nervurada 2

LAJE 2					
CARGAS PERMANENTES	Peso específico do material (kN/m³)	Espessura (m)	Comprimento (m)	Área (m²)	Carga aplicada na laje (kN/m²)
Peso próprio	25	-	-	64	4,615
Enchimento (EPS de alta densidade)	0,3	0,35	-		0,105
Contrapiso	19	0,05	-		0,95
Revestimento do teto (Gesso acartonado)	0,25	-	-		0,25
Piso	1	-	-		1
Alvenaria	16	0,15	24		2,88
Divisórias de drywall	0,5	0,15	13,5		0,34
CARGAS ACIDENTAIS	-	-	-		-
Salas de uso geral e sanitários	2,5	-	-		2,5
Corredores de uso comum	3	-	-		3
Carga permanente total (kN/m²)					10,14
Carga acidental total (kN/m²)					3,00

Fonte: Autoria própria. (2020)

Anexo A. 7 - Cargas na Laje Nervurada 3

LAJE 3					
CARGAS PERMANENTES	Peso específico do material (kN/m ³)	Espessura (m)	Comprimento (m)	Área (m ²)	Carga aplicada na laje (kN/m ²)
Peso próprio	25	-	-	56	4,615
Enchimento (EPS de alta densidade)	0,3	0,35	-		0,105
Contrapiso	19	0,05	-		0,95
Revestimento do teto (Gesso acartonado)	0,25	-	-		0,25
Piso	1	-	-		1
Alvenaria	16	0,15	16		2,19
Divisórias de drywall	0,5	0,15	16,5		0,47
CARGAS ACIDENTAIS	-	-	-		-
Salas de uso geral e sanitários	2,5	-	-		2,5
Corredores de uso comum	3	-	-		3
Carga permanente total (kN/m²)					9,58
Carga acidental total (kN/m²)					3,00

Fonte: Autoria própria. (2020)

Anexo A. 8 - Cargas na Laje Nervurada 4

LAJE 4					
CARGAS PERMANENTES	Peso específico do material (kN/m ³)	Espessura (m)	Comprimento (m)	Área (m ²)	Carga aplicada na laje (kN/m ²)
Peso próprio	25	-	-	56	4,615
Enchimento (EPS de alta densidade)	0,3	0,35	-		0,105
Contrapiso	19	0,05	-		0,95
Revestimento do teto (Gesso acartonado)	0,25	-	-		0,25
Piso	1	-	-		1
Alvenaria	16	0,15	23		3,15
Divisórias de drywall	0,5	0,15	15,5		0,44
CARGAS ACIDENTAIS	-	-	-		-
Salas de uso geral e sanitários	2,5	-	-		2,5
Corredores de uso comum	3	-	-		3
Carga permanente total (kN/m²)					10,51
Carga acidental total (kN/m²)					3,00

Fonte: Autoria própria. (2020)

ANEXO B – Tabelas de Czerny

Anexo B. 1 - Tabelas de Czerny para os casos 1, 2A e 2B

λ	CASO 1		CASO 2 A			CASO 2 B		
	αx	αy	αx	αy	βy	αx	αy	βx
1	22,7	22,7	32,4	26,5	11,9	26,5	32,4	11,9
1,05	20,8	22,5	29,2	25	11,3	25,7	33,3	11,3
1,1	19,3	22,3	26,1	24,4	10,9	24,4	33,9	10,9
1,15	18,1	22,3	23,7	23,9	10,4	23,3	34,5	10,5
1,2	16,9	22,3	22	23,8	10,1	22,3	34,9	10,2
1,25	15,9	22,4	20,2	23,6	9,8	21,4	35,2	9,9
1,3	15,2	22,7	19	23,7	9,6	20,7	35,4	9,7
1,35	14,4	22,9	17,8	23,7	9,3	20,1	37,8	9,4
1,4	13,8	23,1	16,8	23,8	9,2	19,7	39,9	9,3
1,45	13,2	23,3	15,8	23,9	9	19,2	41,1	9,1
1,5	12,7	23,5	15,1	24	8,9	18,8	42,5	9
1,55	12,3	23,5	14,3	24	8,8	18,3	42,5	8,9
1,6	11,90	23,5	13,8	24	8,7	17,8	42,5	8,8
1,65	11,50	23,5	13,2	24	8,6	17,5	42,5	8,7
1,7	11,20	23,5	12,8	24	8,5	17,2	42,5	8,6
1,75	10,80	23,5	12,3	24	8,45	17	42,5	8,5
1,8	10,70	23,5	12	24	8,4	16,8	42,5	8,4
1,85	10,40	23,5	11,5	24	8,35	16,5	42,5	8,3
1,9	10,20	23,5	11,3	24	8,3	16,4	42,5	8,3
1,95	10,10	23,5	10,9	24	8,25	16,3	42,5	8,3
2	9,90	23,5	10,8	24	8,2	16,2	42,5	8,3
∞	8,00	23,5	8	24	8	14,2	42,5	8

Anexo B. 2 - Tabelas de Czerny para os casos 3, 4A e 4B

λ	CASO 3				CASO 4 A			CASO 4 B		
	αx	αy	βx	βy	αx	αy	βy	αx	αy	βx
1	34,5	34,5	14,3	14,3	46,1	31,6	14,3	31,6	46,1	14,3
1,05	32,1	33,7	13,3	13,8	39,9	29,8	13,4	29,9	46,4	13,8
1,1	30,1	33,9	12,7	13,6	36	28,8	12,7	29	47,2	13,5
1,15	28	33,9	12	13,3	31,9	27,7	12	28	47,7	13,2
1,2	26,4	34	11,5	13,1	29	26,9	11,5	27,2	48,1	13
1,25	24,9	34,4	11,1	12,9	26,2	26,1	11,1	26,4	48,2	12,7
1,3	23,8	35	10,7	12,8	24,1	25,6	10,7	25,8	48,1	12,6
1,35	23	36,6	10,3	12,7	22,1	25,1	10,3	25,3	47,9	12,4
1,4	22,2	37,8	10	12,6	20,6	24,8	10	24,8	47,8	12,3
1,45	21,4	39,1	9,8	12,5	19,3	24,6	9,75	24,4	47,7	12,2
1,5	20,7	40,2	9,6	12,4	18,1	24,4	9,5	24,2	47,6	12,2
1,55	20,2	40,2	9,4	12,3	17	24,3	9,3	24	47,6	12,1
1,6	19,7	40,2	9,2	12,3	16,2	24,3	9,2	24	47,6	12
1,65	19,2	40,2	9,1	12,2	15,4	24,3	9,05	24	47,6	12
1,7	18,8	40,2	8,9	12,2	14,7	24,3	8,9	24	47,4	12
1,75	18,4	40,2	8,8	12,2	14	24,3	8,8	24	47,3	12
1,8	18,1	40,2	8,7	12,2	13,5	24,3	8,7	24	47,2	12
1,85	17,8	40,2	8,6	12,2	13	24,3	8,6	24	47,1	12
1,9	17,5	40,2	8,5	12,2	12,6	24,3	8,5	24	47,1	12
1,95	17,2	40,2	8,4	12,2	12,1	24,3	8,4	24	47,1	12
2	17,1	40,2	8,4	12,2	11,8	24,3	8,4	24	47	12
∞	14,2	40,2	8	12	8	24,3	8	24	47	12

Anexo B. 3 - Coeficientes de cálculo de flechas em lajes retangulares pelo método de Czerny

ly/lx	Caso 1	Caso 2A	Caso 2B	Caso 3	Caso 4A	Caso 4B
1	21,4	31,2	31,2	41,3	45,3	45,3
1,05	19,4	27,6	29,2	37,1	39,2	43,2
1,1	17,8	24,7	27,4	34,5	34,4	41,5
1,15	16,5	22,3	26	31,7	30,4	40,1
1,2	15,4	20,3	24,8	29,9	27,2	39
1,25	14,3	18,7	23,8	28,2	24,5	37,9
1,3	13,6	17,3	22,9	26,8	22,3	37,2
1,35	12,9	16,1	22,1	25,5	20,4	36,5
1,4	12,3	15,1	21,5	24,5	18,8	36
1,45	11,7	14,2	20,9	23,5	17,5	35,6
1,5	11,2	13,5	20,4	22,7	16,3	35,1
1,55	10,8	12,8	20	22,1	15,3	34,7
1,6	10,4	12,2	19,6	21,5	14,4	34,5
1,65	10,1	11,7	19,3	21	13,7	34,2
1,7	9,8	11,2	19	20,5	13	33,9
1,75	9,5	10,8	18,7	20,1	12,4	33,8
1,8	9,3	10,5	18,5	19,7	11,9	33,7
1,85	9,1	10,1	18,3	19,4	11,4	33,6
1,9	8,9	9,9	18,1	19	11	33,5
1,95	8,7	9,6	18	18,8	10,6	33,4
2	8,6	9,4	17,8	18,5	10,3	33,3
>2	6,7	6,7	16,7	16,7	6,7	32

Anexo B. 4 - Valores de Kc e Ks para concretos com $f_{ck} \leq 50$ MPa, $\gamma_c = 1,4$, $\gamma_s = 1,15$

$\beta_c = \frac{x}{d}$	$k_c = \frac{bd^2}{M_d} (\text{cm}^2/\text{kN})$							$k_s = \frac{A_s d}{M_d} (\text{cm}^2/\text{kN})$			DOMÍNIO
	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	CA-25	CA-50	CA-60	
0,02	51,9	41,5	34,6	29,7	25,9	23,1	20,8	0,046	0,023	0,019	2
0,04	26,2	20,9	17,4	15,0	13,1	11,6	10,5	0,047	0,023	0,020	
0,06	17,6	14,1	11,7	10,1	8,8	7,8	7,0	0,047	0,024	0,020	
0,08	13,3	10,6	8,9	7,6	6,7	5,9	5,3	0,048	0,024	0,020	
0,10	10,7	8,6	7,2	6,1	5,4	4,8	4,3	0,048	0,024	0,020	
0,12	9,0	7,2	6,0	5,2	4,5	4,0	3,6	0,048	0,024	0,020	
0,14	7,8	6,2	5,2	4,5	3,9	3,5	3,1	0,049	0,024	0,020	
0,16	6,9	5,5	4,6	3,9	3,4	3,1	2,8	0,049	0,025	0,021	
0,18	6,2	4,9	4,1	3,5	3,1	2,7	2,5	0,050	0,025	0,021	
0,20	5,6	4,5	3,7	3,2	2,8	2,5	2,2	0,050	0,025	0,021	
0,22	5,1	4,1	3,4	2,9	2,6	2,3	2,1	0,050	0,025	0,021	
0,24	4,7	3,8	3,2	2,7	2,4	2,1	1,9	0,051	0,025	0,021	
0,26	4,4	3,5	3,0	2,5	2,2	2,0	1,8	0,051	0,026	0,021	
0,28	4,1	3,3	2,8	2,4	2,1	1,8	1,7	0,052	0,026	0,022	3
0,30	3,9	3,1	2,6	2,2	2,0	1,7	1,6	0,052	0,026	0,022	
0,32	3,7	3,0	2,5	2,1	1,8	1,6	1,5	0,053	0,026	0,022	
0,34	3,5	2,8	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	0,053	0,027	0,022	
0,36	3,3	2,7	2,2	1,9	1,7	1,5	1,3	0,054	0,027	0,022	
0,38	3,2	2,6	2,1	1,8	1,6	1,4	1,3	0,054	0,027	0,023	
0,40	3,1	2,5	2,0	1,8	1,5	1,4	1,2	0,055	0,027	0,023	
0,42	3,0	2,4	2,0	1,7	1,5	1,3	1,2	0,055	0,028	0,023	
0,438	2,9	2,3	1,9	1,6	1,4	1,3	1,1	0,056	0,028	0,023	
0,44	2,8	2,3	1,9	1,6	1,4	1,3	1,1	0,056	0,028		
0,46	2,7	2,2	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1	0,056	0,028		
0,48	2,7	2,1	1,8	1,5	1,3	1,2	1,1	0,057	0,029		
0,50	2,6	2,1	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	0,058	0,029		
0,52	2,5	2,0	1,7	1,4	1,3	1,1	1,0	0,058	0,029		
0,54	2,4	2,0	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	0,059	0,029		
0,56	2,4	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	0,059	0,030		
0,58	2,3	1,9	1,5	1,3	1,2	1,0	0,9	0,060	0,030		
0,60	2,3	1,8	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,061	0,030		
0,628	2,2	1,8	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,061	0,031		
0,64	2,2	1,7	1,4	1,2	1,1	1,0	0,9	0,062			
0,68	2,1	1,7	1,4	1,2	1,0	0,9	0,8	0,063			
0,72	2,0	1,6	1,3	1,2	1,0	0,9	0,8	0,065			
0,76	2,0	1,6	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8	0,066			
0,772	1,9	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8	0,067			

Fonte: Pinheiro (2007)

ANEXO C – TABELAS DE AÇO

Anexo C. 1 - Tabela de distribuição de aço

s (cm)	DIÂMETRO NOMINAL (mm)						s (cm)
	5,0	6,3	8,0	10,0	12,5	16,0	
5,0	3,92	6,24	10,06	15,70	24,54	40,22	5,0
5,5	3,56	5,67	9,15	14,27	22,31	36,56	5,5
6,0	3,27	5,20	8,38	13,08	20,45	33,52	6,0
6,5	3,02	4,80	7,74	12,08	18,88	30,94	6,5
7,0	2,80	4,46	7,19	11,21	17,53	28,73	7,0
7,5	2,61	4,16	6,71	10,47	16,36	26,81	7,5
8,0	2,45	3,90	6,29	9,81	15,34	25,14	8,0
8,5	2,31	3,67	5,92	9,24	14,44	23,66	8,5
9,0	2,18	3,47	5,59	8,72	13,63	22,34	9,0
9,5	2,06	3,28	5,29	8,26	12,92	21,17	9,5
10,0	1,96	3,12	5,03	7,85	12,27	20,11	10,0
11,0	1,78	2,84	4,57	7,14	11,15	18,28	11,0
12,0	1,63	2,60	4,19	6,54	10,23	16,76	12,0
12,5	1,57	2,50	4,02	6,28	9,82	16,09	12,5
13,0	1,51	2,40	3,87	6,04	9,44	15,47	13,0
14,0	1,40	2,23	3,59	5,61	8,76	14,36	14,0
15,0	1,31	2,08	3,35	5,23	8,18	13,41	15,0
16,0	1,23	1,95	3,14	4,91	7,67	12,57	16,0
17,0	1,15	1,84	2,96	4,62	7,22	11,83	17,0
17,5	1,12	1,78	2,87	4,49	7,01	11,49	17,5
18,0	1,09	1,73	2,79	4,36	6,82	11,17	18,0
19,0	1,03	1,64	2,65	4,13	6,46	10,58	19,0
20,0	0,98	1,56	2,52	3,93	6,14	10,06	20,0
22,0	0,89	1,42	2,29	3,57	5,58	9,14	22,0
24,0	0,82	1,30	2,10	3,27	5,11	8,38	24,0
25,0	0,78	1,25	2,01	3,14	4,91	8,04	25,0
26,0	0,75	1,20	1,93	3,02	4,72	7,73	26,0
28,0	0,70	1,11	1,80	2,80	4,38	7,18	28,0
30,0	0,65	1,04	1,68	2,62	4,09	6,70	30,0
33,0	0,59	0,95	1,52	2,38	3,72	6,09	33,0

Fonte: Pinheiro (2007)

Anexo C. 2 - Comprimentos de ancoragem de armaduras negativas

COMPRIMENTO DE ANCORAGEM l_b (cm) para $A_{s,ef} = A_{s,caic}$ e aço CA-50 nervurado																
ϕ (mm)	Concreto															
	C15		C20		C25		C30		C35		C40		C45		C50	
	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
6,3	48	33	39	28	34	24	30	21	27	19	25	17	23	16	21	15
	33	23	28	19	24	17	21	15	19	13	17	12	16	11	15	10
8	61	42	50	35	43	30	38	27	34	24	31	22	29	20	27	19
	42	30	35	24	30	21	27	19	24	17	22	15	20	14	19	13
10	76	53	62	44	54	38	48	33	43	30	39	28	36	25	34	24
	53	37	44	31	38	26	33	23	30	21	28	19	25	18	24	17
12,5	95	66	78	55	67	47	60	42	54	38	49	34	45	32	42	30
	66	46	55	38	47	33	42	29	38	26	34	24	32	22	30	21
16	121	85	100	70	86	60	76	53	69	48	63	44	58	41	54	38
	85	59	70	49	60	42	53	37	48	34	44	31	41	29	38	27
20	151	106	125	87	108	75	95	67	86	60	79	55	73	51	68	47
	106	74	87	61	75	53	67	47	60	42	55	39	51	36	47	33
22,5	170	119	141	98	121	85	107	75	97	68	89	62	82	57	76	53
	119	83	98	69	85	59	75	53	68	47	62	43	57	40	53	37
25	189	132	156	109	135	94	119	83	108	75	98	69	91	64	85	59
	132	93	109	76	94	66	83	58	75	53	69	48	64	45	59	42
32	242	169	200	140	172	121	152	107	138	96	126	88	116	81	108	76
	169	119	140	98	121	84	107	75	96	67	88	62	81	57	76	53
40	303	212	250	175	215	151	191	133	172	120	157	110	145	102	136	95
	212	148	175	122	151	105	133	93	120	84	110	77	102	71	95	66