

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

BRENO OSCAR CHAVES BESEGGIO

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE LAJE
NERVURADA EM CONCRETO ARMADO MOLDADO NO LOCAL EM EDIFÍCIOS
COMERCIAIS**

SÃO CARLOS
2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**Análise Comparativa entre Sistemas Construtivos de Laje Nervurada em
Concreto Armado moldado no Local em Edifícios Comerciais**

Breno Oscar Chaves Beseggio

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Civil da
Universidade Federal de São Carlos como
parte dos requisitos para a conclusão da
graduação em Engenharia Civil

Orientador: Fernando Menezes de Almeida
Filho

São Carlos
2020

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais, Alessandra e Oscar,
e à minha irmã, Giovanna.*

AGRADECIMENTOS

Meu sincero agradecimento ao meu professor orientador Fernando Menezes de Almeida Filho pela solicitude durante todo o processo de desenvolvimento desta monografia e pelo empenho nas aulas ministradas durante o curso.

Agradeço também meus professores da Universidade Federal de São Carlos, que me possibilitaram avançar no aprendizado e no conhecimento da engenharia civil.

Agradeço meus familiares pelo incondicional apoio e suporte para meu desenvolvimento acadêmico.

Agradeço meus amigos, em especial, aqueles que fizeram a universidade e São Carlos momentos mágicos e inesquecíveis em minha vida.

RESUMO

As lajes exercem papel fundamental na estrutura de um edifício, além de serem responsáveis por boa parte do consumo de materiais e consequentemente do custo de um empreendimento. Com o surgimento de novos sistemas construtivos para laje nervurada, torna-se necessários estudá-los para que seja possível o aprimoramento dos projetos na engenharia civil. Este trabalho visou realizar um estudo teórico comparativo entre sistemas construtivos de laje nervurada em concreto armado moldado no local a fim de encontrar o sistema mais adequado para um edifício comercial. Entre os sistemas construtivos de laje nervurada estudados estão a laje nervurada tradicional, a laje *bubbledeck* e a laje *holedeck*, utilizando a laje maciça como referência. Primeiramente, identificou-se as especificidades de cada sistema construtivo, atentando-se a metodologia construtiva e os elementos necessários para sua execução. Em seguida, definiu-se casos de laje com diferentes vãos, de 5,0 metros até 10,0 metros, e dimensionou-se para os sistemas construtivos estudados. Os cálculos foram realizados em tabela *Excel*[®] de acordo com a ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Analisou-se o consumo de materiais, peso próprio e altura da laje para cada caso estudado e assim concluiu-se que a laje nervurada tradicional apresentou ser o sistema construtivos mais adequado para edifícios comerciais, pois reduziu em média o consumo de concreto em 48% e o consumo aço em 8% em relação a laje maciça, aumentou em média o consumo de fôrma apenas em 84%, além de diminuir em média peso-próprio em 48%, também em relação a laje maciça, a altura da laje mostrou-se ser constantemente menor ao se comparar com os sistemas construtivos *bubbledeck* e *holedeck*.

Palavras-chave: laje nervurada, *bubbledeck*, *holedeck*

ABSTRACT

Slabs are fundamental in the structure of a building, in addition to being responsible for a large part of the consumption of materials and consequently of the cost of an enterprise. The emergence of new construction systems for ribbed slab became necessary to study them to enable an improvement of civil construction projects. This work aimed to be a comparative theoretical study between reinforced concrete slab construction systems molded on site in order to find the most suitable system for a commercial building. Among the construction systems of ribbed slab studied are the traditional ribbed slab, *bubbledeck* slab and *holedeck* slab, using solid slab as a reference. First, the specificities of each construction system were identified, paying attention to the construction methodology and the elements necessary for its execution. Then, slab cases with different spans, from 5.0 meters to 10.0 meters, were defined and dimensioned for the studied construction systems. The calculations were performed in an *Excel*[®] table according to ABNT NBR 6118: Design of concrete structures - procedure. The consumption of materials, own weight and height of the slab for each case studied was analyzed and it was concluded that the traditional ribbed slab proved to be the most suitable construction system for commercial buildings, as it reduced the average consumption of concrete by 48% and steel consumption by 8% in relation to solid slab, the average consumption of formwork increased only by 84%, in addition to decreasing in average self-weight by 48%, also in relation to solid slab, the height of the slab was shown be constantly smaller when compared to the *bubbledeck* and *holedeck* construction systems.

Key-words: ribbed slab, *bubbledeck*, *holedeck*

LISTA DA FIGURAS

Figura 1 – Montagem de uma laje nervurada com cubas plásticas	9
Figura 2 – Sistema de laje <i>bubbledeck</i> em montagem.....	9
Figura 3 – Sistema de laje <i>holedeck</i> finalizado	10
Figura 4 – Esquema de laje.....	12
Figura 5 – Representação de seções transversais de lajes nervuradas com materiais inertes: a) Isopor; b) blocos de concreto comum; c) blocos de concreto celular; d) tijolos cerâmicos furados	14
Figura 6 – Posicionamento de cubetas laje nervurada.....	18
Figura 7 – Catálogo técnico laje nervurada – Atex 600	19
Figura 8 – Catálogo técnico laje nervurada – Atex 700	20
Figura 9 - Módulos da laje <i>bubbledeck</i>	21
Figura 10 – Pannel pré-moldado de laje <i>bubbledeck</i>	21
Figura 11 – Catálogo técnico laje <i>bubbledeck</i>	22
Figura 12 – Laje <i>holedeck</i> finalizada.....	23
Figura 13 – Catálogo técnico laje <i>holedeck</i>	23
Figura 14 – Seção da nervura da laje <i>holedeck</i>	23
Figura 15 - Parâmetros geométricos de lajes nervuradas	31
Figura 16 – Esquema genérico da seção da laje <i>Bubbledeck</i>	38
Figura 17 – Parâmetros geométricos da laje <i>bubbledeck</i>	38
Figura 18 – Parâmetros geométricos da laje <i>holedeck</i>	39
Figura 19 – Planilha de resultados aspecto geométrico das lajes, em cm	40
Figura 20 – Gráfico da relação de consumo de concreto pelo vão [m^3/m^2 / $\text{m}^3/\text{m}^2_{\text{maciça}}$]	41
Figura 21 – Gráfico da relação da área de aço pelo vão.....	43
Figura 22 – Gráfico de consumo de fôrma pelo vão	45
Figura 23 – Gráfico da relação peso próprio pelo vão	47
Figura 24 – Gráfico da altura das lajes para cada caso.....	48
Figura 25 – Gráfico das flechas para cada caso.....	50
Figura 26 – Quadro de coeficientes α , μ_x , μ_y , k_x , k_y , ψ_2	54
Figura 27 – Planilhas de cálculo laje maciça: 5,0 x 5,0m e 5,0 x 7,5m.....	55

Figura 28 – Planilhas de cálculo laje maciça: 5,0 x 10,0m e 7,5 x 7,5m.....	56
Figura 29 – Planilhas de cálculo laje maciça: 7,5 x 10,0m e 10,0 x 10,0m.....	57
Figura 30 – Planilha de cálculo laje tradicional: 5,0 x 5,0m	58
Figura 31 – Planilha de cálculo laje tradicional: 5,0 x 7,5m	59
Figura 32 – Planilha de cálculo laje tradicional: 5,0 x 10,0m	60
Figura 33 – Planilha de cálculo laje tradicional: 7,5 x 7,5m	61
Figura 34 – Planilha de cálculo laje tradicional: 7,5 x 10,0m	62
Figura 35 – Planilha de cálculo laje tradicional: 10,0 x 10,0m	63
Figura 36 – Planilha de cálculo laje <i>bubbledeck</i> : 5,0 x 5,0m.....	64
Figura 37 – Planilha de cálculo laje <i>bubbledeck</i> : 5,0 x 7,5m.....	65
Figura 38 – Planilha de cálculo laje <i>bubbledeck</i> : 5,0 x 10,0m.....	66
Figura 39 – Planilha de cálculo laje <i>bubbledeck</i> : 7,5 x 7,5m.....	67
Figura 40 – Planilha de cálculo laje <i>bubbledeck</i> : 7,5 x 10,0m.....	68
Figura 41 – Planilha de cálculo laje <i>bubbledeck</i> : 10,0 x 10,0m.....	69
Figura 42 – Planilha de cálculo laje <i>holedeck</i> : 5,0 x 5,0m.....	70
Figura 43 – Planilha de cálculo laje <i>holedeck</i> : 5,0 x 7,5m.....	71
Figura 44 – Planilha de cálculo laje <i>holedeck</i> : 5,0 x 10,0m.....	72
Figura 45 – Planilha de cálculo laje <i>holedeck</i> : 7,5 x 7,5m.....	73
Figura 46 – Planilha de cálculo laje <i>holedeck</i> : 7,5 x 10,0m.....	74
Figura 47 – Planilha de cálculo laje <i>holedeck</i> : 10,0 x 10,0m.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cargas variáveis em edifícios comerciais.....	15
Tabela 2 – Consumo de concreto [m^3/m^2]	40
Tabela 3 – Relação de consumo de concreto pelo vão [m^3/m^2 / $\text{m}^3/\text{m}^2_{\text{,maciça}}$]	41
Tabela 4 – Consumo de aço [cm^2/m].....	42
Tabela 5 – Relação de consumo de aço pelo vão [$A_s/A_{s,\text{maciça}}$]	43
Tabela 6 – Consumo de fôrma [m^2/m^2]	44
Tabela 7 – Peso próprio [kN/m^2]	46
Tabela 8 – Relação peso próprio pelo vão [kN/m^2 / $\text{kN}/\text{m}^2_{\text{,maciça}}$]	46
Tabela 9 – Altura total da laje para cada caso [cm].....	48
Tabela 10 – Flecha para cada caso [cm].....	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Justificativa	10
1.2 Objetivos.....	11
1.3 Metodologia.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3. SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE LAJE NERVURADA.....	18
3.1 Laje nervurada tradicional.....	18
3.2 Laje <i>bubbledeck</i>	20
3.3 Laje <i>holedeck</i>	22
4. MÉTODO DE CÁLCULO.....	24
4.1 Laje maciça	24
4.1.1 Cargas atuantes	25
4.1.2 Verificação do estado limite de deformação excessiva	25
4.1.3 Armadura longitudinal	27
4.1.4 Resistência a força cortante	29
4.2 Cálculo Laje Nervurada.....	30
4.2.1 Cargas atuantes	32
4.2.2 Armadura longitudinal	32
4.2.3 Verificação do estado limite de deformação excessiva.....	35
4.2.4 Verificação do estado limite de abertura de fissura	37
4.2.5 Resistencia a força cortante	37
4.3 Laje <i>bubbledeck</i>	37
4.4 Laje <i>holedeck</i>	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5.1 Consumo de Concreto	40
5.2 Consumo de aço	42
5.3 Área de Fôrma	44
5.4 Peso próprio	46
5.5 Altura da laje	48
5.6 Considerações finais	50
6. CONCLUSÕES.....	52
REFERÊNCIAS.....	53
ANEXO 1	54

<i>APÊNDICE A – Planilhas de cálculo laje maciça.....</i>	<i>55</i>
<i>APÊNDICE B – Planilhas de cálculo laje nervurada tradicional</i>	<i>58</i>
<i>APÊNDICE C – Planilhas de cálculo laje bubbledeck.....</i>	<i>64</i>
<i>APÊNDICE D – Planilhas de cálculo laje holedeck.....</i>	<i>70</i>

1. INTRODUÇÃO

A distribuição de cargas em um edifício se inicia no elemento que denominamos de laje, elemento estrutural bidirecional que recebe as cargas provenientes no uso da edificação. Devido ao seu enorme volume em comparação aos outros elementos estruturais, como pilares, vigas e blocos de fundação, as lajes possuem a característica de consumir boa parte dos recursos de materiais de um edifício. Significando assim, que com um pequeno ajuste de dimensão ou uma melhor racionalização do sistema construtivo de laje resulta-se em uma economia considerável para um empreendimento.

Existem diversas soluções de laje para se aplicar a um edifício comercial. Entre elas, estão lajes metálicas, de concreto armado (pré-fabricadas ou moldadas no local) e concreto protendido. Usualmente no Brasil, a laje mais utilizada é a de concreto armado moldada no local, devido fatores culturais e econômicos, como facilidade de acesso a mão de obra especializada, materiais básicos baratos, sem necessidade de grandes investimentos em equipamentos para execução.

As lajes em concreto armado moldado do local limitam-se a dois tipos: maciças e nervuradas. As lajes maciças são caracterizadas por não possuírem nenhum material inerte em sua geometria, ou seja, utiliza-se apenas as fôrmas de madeira, concreto e malhas de aço, criando assim um maciço de concreto armado para resistir aos esforços solicitantes.

No entanto, as lajes nervuradas possuem em sua composição sistemas que possibilitam a diminuição do seu peso próprio, pode ser utilizado cubetas de plástico, materiais com peso específico relativamente baixo, como o isopor, ou ainda dispositivos que atuam para criar vazios de ar. A Figura 1 mostra a utilização das cubetas plásticas.

Figura 1 – Montagem de uma laje nervurada com cubas plásticas



Fonte: Vizotto e Sartorti (2010)

O sistema tradicional de laje nervurada é composto por cubetas de plásticos, que servem tanto para criar espaços vazios nas lajes, quanto como fôrma para a concretagem. Novos sistemas surgiram, entre eles o *bubbledeck* e o *holedeck*. O sistema construtivo *bubbledeck* consiste na utilização de esferas plásticas no interior da geometria da laje, criando espaços vazios de ar, pode-se ver na Figura 2.

Figura 2 – Sistema de laje *bubbledeck* em montagem



Fonte: Júnior (2014)

Já o sistema *holedeck* consiste na criação de furos nas nervuras da laje, através da utilização de fôrmas especiais, como pode-se ver na Figura 3. Esses dois sistemas construtivos serão vistos e analisados neste trabalho.

Figura 3 – Sistema de laje *holedeck* finalizado



Fonte: Scott (2016)

1.1 JUSTIFICATIVA

A engenharia civil como um todo evolui para tornar os processos e os projetos mais eficazes e racionalizados, tornando os empreendimentos mais atrativos e diferenciais. No âmbito dos prédios residenciais e comerciais há uma busca por melhorar o aproveitamento do espaço interno e disponibilizar uma maior flexibilização dos ambientes para os usuários. Nesse contexto, surge a busca para tornar a flexibilização possível de modo seguro e eficiente.

Uma das alternativas possíveis é a diminuição da quantidade de pilares no interior de uma edificação. Isso gera uma estrutura com maiores vãos entre os pilares, o que é benéfico quando se trata de propor uma maior flexibilização dos ambientes. Entretanto, como resultado inevitável, ocorre um aumento das solicitações nos elementos de viga e de laje. Desse modo, as lajes nervuradas surgem como uma solução muito eficaz para se obter um aumento nos vãos no interior dos edifícios, sem prejudicar o desempenho estrutural, ou seja, fazendo-se respeitar o Estado Limite Último (ELU) e o Estado Limite de Serviço (ELS) da estrutura.

As lajes nervuradas já são utilizadas com o intuito de oferecer uma solução mais eficaz ao se comparar com a lajes maciças, tanto na questão do material, reduzindo o volume de concreto em uma parte da estrutura cuja demanda de concreto impacta diretamente no consumo

de concreto de todo o edifício, quanto na questão do custo do empreendimento. Porém, com o surgimento de novos sistemas construtivos de lajes nervuradas, torna-se necessário estudá-los e compará-los com o sistema construtivo de laje nervurada tradicional para identificar em quais situações o emprego desses novos sistemas são realmente mais eficientes.

Além disso, percebeu-se uma escassez de trabalho a respeito desses novos sistemas na literatura, tanto nacional quanto internacionalmente.

1.2 OBJETIVOS

De forma geral, o objetivo deste trabalho foi realizar um estudo teórico comparativo entre sistemas construtivos de laje nervurada em concreto armado moldado no local, considerando a nervurada tradicional, a *bubbledeck* e a *holedeck*, a fim de encontrar o sistema mais adequado para um edifício comercial do ponto de vista de consumo de materiais, peso próprio e altura de laje por meio de dimensionamento através de planilhas *Excel*® sob a ótica da ABNT NBR 6118:2014, utilizando a laje maciça como referência.

Os objetivos específicos podem ser definidos em:

- 1) Identificar as especificidades de cada sistema construtivo de laje a ser comparado.
- 2) Dimensionar as lajes para os diferentes sistemas construtivos em diferentes vãos.
- 3) Analisar o consumo de concreto, aço e fôrma, peso próprio e altura de laje para cada caso estudado.

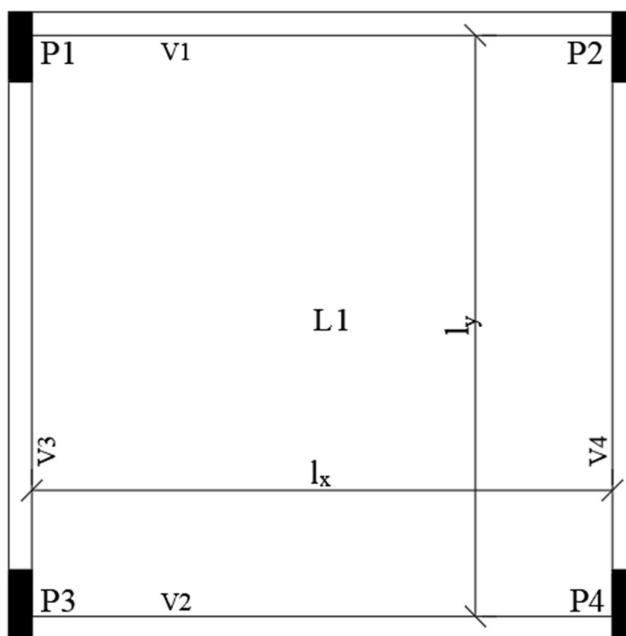
1.3 METODOLOGIA

Para que fosse possível a comparação entre os sistemas construtivos de laje nervurada em concreto armado moldada no local foram adotados métodos qualitativos e quantitativos.

A parte qualitativa foi desenvolvida através da coleta de dados documentais de fabricantes e outros estudos a respeito das lajes nervuradas tradicionais, *bubbledeck* e *holedeck*, de forma a possibilitar o entendimento específico de cada sistema e a análise de conceitos e metodologias construtivas dessas lajes.

A parte quantitativa foi desenvolvida através do dimensionamento de casos de laje para diversos vãos. Definiu-se que a faixa de vão a ser estudo é entre 5,0 metros e 10,0 metros. Essa faixa de vão corresponde aos vãos usualmente praticados em edifícios com finalidade comercial. Assim, definiu-se seis casos de vão. São eles: 5,0 x 5,0 metros, 5,0 x 7,5 metros, 5,0 x 10,0 metros, 7,5 x 7,5 metros, 7,5 x 10 metros e 10,0 x 10,0 metros. A figura 4 mostra um esquema de laje padrão em dimensões $l_x \times l_y$.

Figura 4 – Esquema de laje



Fonte: produzido pelo autor, 2020

Os sistemas construtivos de laje nervurada foram definidos por: nervurada tradicional, *bubbledeck* e *holedeck*. Além disso, adotou-se a laje maciça como parâmetro de referência para as outras lajes. Para os parâmetros geométricos das lajes nervradas adotou-se fabricantes como referência de dimensões.

As outras variáveis de cálculo como classe do concreto, resistência do aço, sobrecarga, carga accidental, classe de agressividade ambiental, foram fixados de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014) e ABNT NBR 6120 (2019) para todos os casos, de modo a possibilitar a comparação entre eles. Após o dimensionamento dos casos de laje coletou-se os dados de consumo de concreto, consumo de aço, consumo de fôrma, peso próprio e altura da laje dos quatro sistemas construtivos de laje (maciça, nervurada tradicional, *bubbledeck*, *holedeck*).

Desse modo, analisou-se, através de tabelas e gráficos qual sistema construtivo de laje nervurada moldada no local se mostrou mais adequado para um edifício comercial.

O método de cálculo utilizado foi manual em tabela de cálculo no *Excel*[®], seguindo os parâmetros da ABNT NBR 6118 (2014). As lajes foram calculadas para o estado limite último e estado limite de serviço, e sua altura e parâmetros foram definidas em função da aceitação em todas as verificações realizadas (deformação excessiva, abertura de fissuras, resistência força cortante).

Cabe ressaltar que não foi considerado no dimensionamento das lajes a norma ABNT NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho (2013) e nem ABNT NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio (2012).

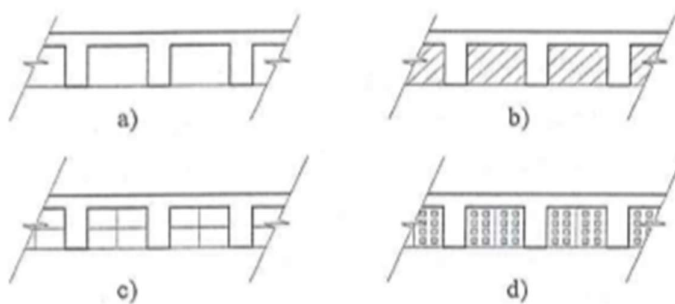
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As lajes são essenciais para a estrutura de um edifício e são responsáveis por uma enorme parcela de concreto utilizado na edificação. Em virtude disso, a escolha do sistema estrutural para a laje deve ser analisada levando em consideração diversos fatores, como: econômico, funcionamento, execução e interação com outros subsistemas construtivos. Muitas vezes a escolha se deve apenas pelo menor custo final, considerando apenas os insumos e mão de obra, desprezando outros benefícios. (SILVA, 2005).

As lajes nervuradas são definidas, segundo ABNT NBR 6118 (2014), como lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras entre as quais podem ser colocado material inerte. Para esse trabalho, o foco são as lajes nervuradas em concreto armado moldado no local.

Os materiais inertes podem ser os mais variados possíveis, entre eles estão o isopor, o bloco de concreto comum, o bloco de concreto celular, o tijolo cerâmico furado, como pode-se ver na Figura 5 suas representações. Além de materiais inertes, pode-se utilizar fôrmas de cubas plásticas para que esses espaços entre as nervuras fiquem vazios.

Figura 5 – Representação de 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: Carvalho e Pinheiro, 2009

As lajes nervuradas apresentam uma melhor eficiência para grandes vãos, uma vez que possuem o comportamento semelhante à de uma laje maciça, porém com inércia semelhante à de vigas. Essas características são essenciais para sua eficiência. Ao se comparar com a laje maciça, nota-se que a tornaria antieconômica pois necessitaria uma espessura de laje elevada

para atender ao estado limite último e estado limite de serviço de deformação. (CARVALHO e PINHEIRO, 2009)

Autores como Dalben e Bridi (2015) e Vizotto e Sartori (2010) compararam de forma qualitativa as soluções com lajes maciças, nervuradas com cubas plásticas e nervuradas com vigotas treliçadas pré-moldadas. Dalben e Bridi (2015) analisaram as vantagens e desvantagens de cada sistema construtivo. Levando em consideração todos os aspectos de custos de insumos, mão de obra, execução e recursos, concluíram a importância de analisar de forma cuidadosa a estrutura de laje a ser adotada em uma edificação para conseguir uma economia na edificação. Entretanto, Vizotto e Sartori (2010) estudaram de forma quantitativa o comportamento dos sistemas construtivos de laje. Utilizando o *software TQS* e padronizando os vãos em 6 metros nas duas direções com carga permanente de $2,0 \text{ kN/m}^2$ e acidental de $2,5 \text{ kN/m}^2$, concluíram a laje maciça como a menos econômica entre os três sistemas e a laje com vigotas pré-moldadas como a mais eficiente economicamente em 19,1%.

Pode-se dizer que as lajes nervuradas são compostas por duas partes: a mesa (parte semelhante à laje maciça) e a alma (parte semelhante à viga), desta forma, são diversas as possibilidades de novos sistemas construtivos, alterando-se padrões nas nervuras e materiais inertes compostos na laje.

Uma variável bastante influente no cálculo de lajes são as ações atuantes. Essas, que serão consideradas para o desenvolvimento de projeto de lajes, são caracterizadas na ABNT 6120 (2019). As ações predominantes permanentes são: peso próprio da estrutura e peso de componentes construtivos, exemplo: alvenaria, telhado, revestimentos. Além dessas, devem ser consideradas as cargas variáveis. A tabela 1 mostra as cargas variáveis aplicáveis em edifícios comerciais.

Tabela 1 – Cargas variáveis em edifícios comerciais

Local		Carga uniformemente distribuída [kN/m^2]
Edifícios comerciais	Salas de uso geral e sanitários	2,5
	Regiões de arquivos deslizantes	5,0
	Call center	3,0
	Corredores dentro de unidades autônomas	2,5
	Corredores de uso comum	3,0

Fonte: ABNT NBR 6120:2019

Novos sistemas construtivos de laje nervurada que surgiram vêm sendo estudados por diversos autores. Júnior (2014), Mendes, Leite e Salomão (2019) e Guedes e Andrade (2015) estudaram a eficiência do sistema construtivo da laje *bubbledeck* em relação a outros tipos de laje e em diversas situações.

Essa laje aparece no cenário da construção civil como uma alternativa que busca agilidade na execução das obras, além de reduzir custos em materiais e mão de obra (DUARTE JÚNIOR, 2014). Em seu estudo, adotando vãos de 10 metros e comparando com a laje maciça e a laje nervurada tradicional, a laje *bubbledeck* apresentou menor consumo de concreto, porém uma maior taxa de aço ao se comparar com a laje nervurada tradicional, não sendo economicamente eficiente. Entretanto, ao considerar outros custos em decorréncia de mão de obra, fôrmas, escoramento e montagem, concluiu que a laje *bubbledeck* foi a mais eficiente para um vão de 10 metros.

Mendes, Leite e Salomão (2019) compararam o desempenho da laje *bubbledeck* com a laje nervurada em situação de laje lisa (sem vigas). Nessa comparação, foi adotado vãos de 8 metros e espessura das lajes fixadas em 28 centímetros com sobrecarga de $1,50 \text{ kN/m}^2$, além do revestimento de $1,00 \text{ kN/m}^2$ e cargas devido alvenaria de $0,90 \text{ kN/m}^2$. Utilizando o programa computacional *Robot*, concluíram que o consumo de aço foi menor na laje nervurada (0,15%) do que na laje *bubbledeck* (0,23%). Quanto ao volume de concreto, a laje nervurada também obteve um melhor resultado ($9,04\text{m}^3$) contra a laje *bubbledeck* ($12,19\text{m}^3$). Em relação ao deslocamento vertical, as duas apresentaram resultados dentro da ABNT NBR 6118:2014.

Ao contrário de Mendes, Leite e Salomão (2019), Guedes e Andrade (2015), ao compararem o sistema construtivo de laje *bubbledeck* com o de laje maciça lisa, adotaram o método de equivalência entre deflexões, ou seja, calcularam a deformação (flecha) para a espessura da laje *bubbledeck* e então encontraram uma espessura de laje lisa maciça equivalente. Dessa forma, utilizando o *software TQS* e métodos manuais de cálculos, seus resultados foram satisfatórios em apontar a laje *bubbledeck* como mais eficiente, reduzindo volume de concreto em 45% (média), momento solicitante positivo em 29% menor e momento solicitante negativo em 13% menos, demonstrando assim a efetividade da laje *bubbledeck* em relação a laje maciça.

Outro sistema construtivo de laje nervurada inovador é o *holedeck*. Esse sistema consiste em aberturas nas próprias nervuras da laje, com a finalidade de reduzir peso próprio e possibilitar a passagem de dutos elétricos, iluminação e equipamentos mecânicos. Dessa forma,

propícia uma redução de 55% no volume de concreto ao se comparar com a laje maciça. (SCOTT, 2016)

Notou-se a disparidade entre resultados obtidos pelos pesquisadores, em virtude de condições iniciais pré-estabelecidas e os métodos de comparação. Para Duarte Júnior (2014) a laje *bubbledeck* apresentou maior eficiência para vão de 10,0 metros, porém para Mendes, Leite e Salomão (2019) a laje nervurada tradicional apresentou maior eficiência para vão de 8,0 metros em relação ao consumo de concreto e aço frente a laje *bubbledeck*. Guedes e Andrade (2015) e Scott (2016) compararam diretamente as lajes *bubbledeck* e *holedeck*, respectivamente, com a laje maciça, obtendo-se uma redução de consumo de concreto de 45% para laje *bubbledeck* e 55% para laje *holedeck*. Foi perceptível a busca por identificar o sistema construtivo de laje mais adequado e eficiente para determinados parâmetros e situações. Por isso, justificou-se o aprofundamento dos estudos sobre os sistemas construtivos de laje nervurada em concreto armado moldadas no local.

3. SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE LAJE NERVURADA

3.1 LAJE NERVURADA TRADICIONAL

O sistema construtivo de laje nervurada tradicional moldada no local é consagrado pela utilização de cubetas plásticas na forma quadrada para criar espaços vazios, porém é possível também a utilização de outros materiais inertes. Essas cubetas são postas lado a lado nas duas direções de laje e atuam ao mesmo tempo como fôrma e material inerte para criação de vazios. Por consequência, cria-se as nervuras em ambas as direções (caso a laje seja bidirecional). A figura 6 mostra a disposição das cubetas em uma laje nervurada.

Figura 6 – Posicionamento de cubetas laje nervurada



Fonte: Atex Brasil, disponível: www.atex.com.br, acesso em agosto/2020

A execução da laje nervurada inicia-se com o posicionamento das cubetas obedecendo os espaçamentos definidos em projeto juntamente com o escoramento. Pelo fato de não haver fôrmas além das cubetas, o escoramento da laje ocorre diretamente nas cubetas.

Após o correto posicionamento e escoramento, coloca-se a armadura das nervuras em ambas as direções. Adiciona-se espaçadores ao longo de toda nervura, a fim de se garantir o

correto cobrimento nas áreas de nervura, então ocorre a fixação da armadura da nervura. Para armadura da mesa adiciona-se também os espaçadores para garantir o cobrimento de projeto.

O concreto utilizado em lajes nervuradas geralmente é usinado, com a utilização de bombas de concreto ou guas para seu transporte. O concreto deve ter as resistências mínimas definidas em projeto e a concretagem deve ocorrer preferencialmente em uma única etapa, a fim de evitar juntas de concretagem.

Caso o concreto utilizado não for autoadensável deve ser realizado o adensamento do concreto. Utiliza-se vibradores de imersão que devem ser de tamanho compatível com as nervuras e armaduras.

Após a concretagem, deve ser realizado a cura do concreto. Processo de manter o concreto umedecido durante todo tempo de cura necessário. Para a retirada do escoramento, é necessário esperar que o concreto atinja uma resistência mínima.

A retirada das fôrmas deve ser feita com cunhas de madeiras, assim, possibilita-se a reutilização dessas em outros pavimentos superiores ou outras obras, pois não danifica as cubetas.

Para a realização do dimensionamento das lajes no sistema construtivo de laje nervurada tradicional, adotou-se o modelo de cubeta da empresa *Atex Brasil*[®], mais especificamente as linhas *Atex 600* e *Atex 700*. A figura 7 e a figura 8 mostram o catálogo técnico dessas linhas.

Figura 7 – Catálogo técnico laje nervurada – Atex 600

Atex 600

ALTURA DA FÔRMA	ESPESURA DA LÂMINA	ALTURA TOTAL	LARGURA DA NERVURA			ÁREA DA SEÇÃO	DISTÂNCIA DO C.B. A		INÉRCIA		VOLUME DO VAZIO		PESO PRÓPRIO	VOLUME DE CONCRETO
			INFERIOR	SUPERIOR	MÉDIA		FACE SUPERIOR	FACE INFERIOR	INÉRCIA PI NERV.	ALTURA EQUIVALENTE				
cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ²	cm	cm	cm ⁴	cm	m ³	m ³ /m ²	kN /m ²	m ³ /m ²
15,0	5,0	20,0	6,0	9,8	7,9	418	5,2	14,8	10290	12,7	0,041	0,113	2,18	0,087
18,0	5,0	23,0	8,0	12,5	10,3	485	6,6	16,4	18954	15,6	0,045	0,124	2,65	0,106
d1	ds	D	bi	bs	br	A	rs	ri	I	heq	V/V		CONCRETO 25kN/m ³	

Fonte: Atex Brasil, disponível: www.atex.com.br, acesso em agosto/2020

Figura 8 – Catálogo técnico laje nervurada – Atex 700

Atex 700

ALTURA DA FÔRMA	ESPESSURA DA LÂMINA	ALTURA TOTAL	LARGURA DA NERVURA			ÁREA DA SEÇÃO	DISTÂNCIA DO C.G. A		INÉRCIA		VOLUME DO VAZIO		PESO PRÓPRIO	VOLUME DE CONCRETO
			INFERIOR	SUPERIOR	MÉDIA		RIO SUPERIOR	RIO INFERIOR	INÉRCIA PY NERV.	ALTURA EQUIVALENTE				
cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ²	cm	cm	cm ⁴	cm	m ³	m ³ /m ²	kN /m ²	m ³ /m ²
18,0	5,0	23,0				586	7,0	16,0	24905	16,2			2,78	0,111
	7,5	25,5	12,0	14,2	13,1	761	7,6	17,9	34229	18,0	0,058	0,119	3,40	0,136
	10,0	28,0				936	8,5	19,5	45523	19,8			4,03	0,161
21,0	5,0	26,0				634	8,1	17,9	36015	18,3			3,08	0,123
	7,5	28,5	12,0	15,0	13,5	809	8,6	19,9	48206	20,2	0,067	0,137	3,70	0,148
	10,0	31,0				984	9,4	21,6	62285	22,0			4,33	0,173
26,0	5,0	31,0				719	10,1	20,9	60869	21,9			3,63	0,145
	7,5	33,5	12,0	16,4	14,2	894	10,4	23,1	79131	23,8	0,081	0,165	4,25	0,170
	10,0	36,0				1069	11,0	25,0	99047	25,7			4,88	0,195
30,0	5,0	35,0				800	11,8	23,2	87628	24,7			4,13	0,165
	7,5	37,5	12,0	18,0	15,0	975	11,9	25,6	112103	26,6	0,091	0,185	4,75	0,190
	10,0	40,0				1150	12,4	27,6	138016	28,7			5,38	0,215
35,0	5,0	40,0				910	13,9	26,1	130753	28,2			4,80	0,192
	7,5	42,5	12,0	20,0	16,0	1085	14,0	28,5	164577	30,4	0,102	0,208	5,43	0,217
	10,0	45,0				1260	14,4	30,7	199554	32,5			6,05	0,242
40,0	5,0	45,0				1034	16,1	28,9	186636	31,7			5,55	0,222
	7,5	47,5	12,0	22,2	17,1	1209	16,1	31,4	231618	34,1	0,112	0,228	6,18	0,247
	10,0	50,0				1384	16,4	33,6	277525	36,1			6,80	0,272
d1	ds	D	bi	bs	br	A	rs	ri	I	heq	V/V		CONCRETO 25kN/m ³	

Fonte: Atex Brasil, disponível: www.atex.com.br, acesso em agosto/2020

3.2 LAJE *BUBBLEDECK*

A laje *bubbledeck* tem como principal característica a utilização de esferas de plásticos dispostas uniformemente por toda dimensão da laje. Essas bolas criam espaços vazios preenchidos com ar, que diminuem o peso próprio da estrutura.

O processo de execução da laje *bubbledeck* é semelhante ao da laje nervurada tradicional, porém as esferas são travadas com treliças dispostas nas duas direções, criando-se assim as nervuras. A execução pode ocorrer através de módulos, que são elementos montados com as esferas e travados com treliças e telas metálicas, que podem ser vistos na figura 9.

Figura 9 - Módulos da laje *bubbledeck*



Fonte: Bubbledeck Brasil, disponível: www.bubbledeck.com.br, acesso em agosto/2020

Esses módulos são posicionados lado a lado acima de um assoalho de fôrmas convencionais, juntamente com a armadura complementar. Após a fixação de todos os componentes, ocorrem a concretagem no local. Esse método é ideal para obras de pequeno e médio porte, onde não há muitos espaços para equipamentos de grande porte.

Existe ainda a possibilidade de industrialização com pré-lajes, em que os módulos da laje *bubbledeck* são concretados na indústria com uma base de concreto, formando assim um painel único pré-moldado, como mostrado na figura 10.

Figura 10 – Painel pré-moldado de laje *bubbledeck*



Fonte: Bubbledeck Brasil, disponível: www.bubbledeck.com.br, acesso em agosto/2020

Essa camada do painel atua também como fôrma para a concretagem na obra, fazendo com que a fase de execução da concretagem na obra seja acelerado e necessite menos de mão de obra. São muito utilizados em obras de grande porte com a atuação de equipamentos de grande porte, como guias, guindastes.

Tanto os módulos quanto os painéis pré-moldados possuem uma execução de concretagem relativamente rápida. Essa execução inicia-se com a entrega das peças ao canteiro de obras, que irão ao projeto já definido de posicionamento de cada peça. Após o posicionamento, ocorre a execução do escoramento, juntamente com a finalização da montagem dos painéis. Coloca-se as armaduras nas nervuras e fecha-se as fôrmas laterais. Os cuidados com a execução da laje *bubbledeck* devem ser os mesmos que com a laje nervurada tradicional.

Para o dimensionamento das lajes no sistema construtivo *bubbledeck*, adotou-se as esferas da empresa *Bubbledeck*®. A figura 11 apresenta o catálogo técnico da laje *bubbledeck*.

Figura 11 – Catálogo técnico laje *bubbledeck*

Tipo	Espessura da laje (mm)	Diâmetro das esferas (mm)	Vão (m)	Carga (kgf/m²)	Concreto (m³/m²)
BD230	230	180	7 a 10	370	0,15
BD280	280	225	8 a 12	460	0,19
BD340	340	270	9 a 14	550	0,23
BD390	390	315	10 a 16	640	0,25
BD450	450	360	11 a 18	730	0,31

Fonte: Bubbledeck Brasil, disponível: www.bubbledeck.com.br, acesso em agosto/2020

3.3 LAJE *HOLEDECK*

A laje *holedeck* é semelhante a laje nervurada tradicional com utilização de cubetas plásticas, porém ocorre uma modificação nas fôrmas a fim de criar um furo na área das nervuras. Assim, aumenta-se os espaços vazios da laje. A figura 12 mostra uma laje *holedeck* construída.

Figura 12 – Laje *holedeck* finalizada



Fonte: Holedeck Products, disponível: www.holedeck.com, acesso em agosto/2020

A execução da laje *holedeck* é análoga a laje nervurada tradicional, difere-se apenas pela dificuldade na colocação das armaduras na área de nervura, visto que há a fôrma do furo dificultando o acesso na área da nervura.

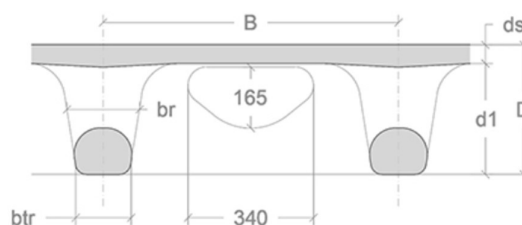
Para o dimensionamento das lajes no sistema construtivo *holedeck*, adotou-se as fôrmas da empresa *Holedeck Products*®. A figura 13 e figura 14 mostram o catálogo técnico e a seção da nervura da laje *holedeck*.

Figura 13 – S

HOLEDECK H030 WAFFLE MOULD PROPERTIES									
MOULD HEIGHT	VOID SURFACE	DEPTH OF TOPPING	TOTAL HEIGHT	BOTTOM RIB WIDTH	AVERAGE RIB WIDTH	DISTANCE BETWEEN THE RIBS AXIS	SECTION AREA	DISTANCE OF C.G.	
mm	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	FROM TOP	FROM BASE
300	438	50	350	150	196	800	990	118	232
		75	375		200	800	1190	121	254
		100	400		204	800	1390	127	273
		50	350	200	247	850	1169	127	223
		75	375		251	850	1382	130,5	244,5
		100	400		255	850	1594	136,5	263,5
d1	H	ds	D	btr	br	B	A	rs	ri

Fonte: Holedeck Products, disponível: www.holedeck.com, acesso em agosto/2020

Figura 14 – Seção da nervura da laje *holedeck*



Fonte: Holedeck Products, disponível: www.holedeck.com, acesso em agosto/2020

4. MÉTODO DE CÁLCULO

Definiu-se a classe de agressividade ambiental, segundo a ABNT NBR 6118 (2014), como CAA II, ou seja, agressividade moderada com classificação geral do tipo de ambiente como urbana e risco de deterioração pequeno, condizente com a situação de edifício comercial. Assim, definiu-se a classe do concreto adotado como C25, ou seja, o f_{ck} adotado de 25,0 MPa. O cobrimento da laje adotado foi de 2,50 centímetros e a bitola de armadura adotada de 12,5 milímetros, aço CA-50. As lajes foram consideradas simplesmente apoiadas nas quatro bordas. O procedimento de cálculo assim como o método adotado foi baseado em Carvalho e Pinheiro (2009) e Carvalho e Figueiredo Filho (2017).

4.1 LAJE MACIÇA

Para o desenvolvimento do cálculo de lajes maciças, adotou-se o método elástico, que segundo a ABNT NBR 6118 (2014) pode ser utilizado para estruturas de placas.

Iniciou-se os cálculos, relacionando as dimensões da laje.

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} \quad (4.1)$$

sendo:

l_x : a menor dimensão do vão

l_y : a maior dimensão do vão

Realizou-se o pré-dimensionamento da laje encontrando a altura útil inicial.

$$d = \frac{l_x}{\psi_2 \cdot \psi_3} \quad (4.2)$$

sendo:

l_x : a menor dimensão do vão

ψ_2 : coeficiente dependente das condições de vinculação e dimensão da laje

ψ_3 : coeficiente que depende do tipo de aço

Com o pré-dimensionamento da altura útil determinou-se a S.

$$h = d + c + 1,5\phi \quad (4.3)$$

sendo:

d : altura útil inicial

c : cobrimento

ϕ : bitola da armadura adotada

4.1.1 CARGAS ATUANTES

A partir do pré-dimensionamento da laje pôde-se calcular as cargas atuantes, sendo elas devido ao peso próprio (g_1), a sobrecarga permanente (g_2) e carga acidental (q). Adotou-se valores padrões para g_2 e q segundo a ABNT NBR 6120 (2019), considerando a laje em um edifício comercial.

$$\begin{aligned} g_1 &= \rho_{concreto} \cdot h \\ g_2 &= 1,40 \text{ kN/m}^2 \\ q &= 2.50 \text{ kN/m}^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

sendo:

h : altura inicial

$\rho_{concreto}$: peso específico do concreto

4.1.2 VERIFICAÇÃO DO ESTADO LIMITE DE DEFORMAÇÃO EXCESSIVA

Para essa verificação deve ser utilizada a combinação de ações em estado de serviço, calculou-se as flechas imediatas e considerando o efeito da fluência do concreto comparou-se com as flechas limites determinadas para o vão da laje em combinação quase permanente e carga acidental. Desprezou-se os efeitos da fissuração do concreto.

Para iniciar, calculou-se o módulo de elasticidade secante, que para concretos até a classe C50 e agregados de granito, é definido como:

$$E_{cs} = 0,85 \cdot E_{ci} = 0,85 \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (4.5)$$

sendo:

f_{ck} : resistência característica do concreto à compressão, em MPa

Em seguida, determinou-se a flecha imediata para a combinação quase permanente e carga acidental.

$$\begin{aligned}\delta_{\text{imediata,CQP}} &= \frac{(g_1 + g_2 + 0,4 \cdot q) \cdot l_x^4}{E_{cs} \cdot h^3} \cdot \frac{\alpha}{100} \\ \delta_{\text{imediata,Q}} &= \frac{q \cdot l_x^4}{E_{cs} \cdot h^3} \cdot \frac{\alpha}{100}\end{aligned}\quad (4.6)$$

sendo:

g_1 : peso próprio

g_2 : sobrecarga permanente

q : carga acidental

l_x : a menor dimensão do vão

E_{cs} : módulo de elasticidade secante

h : altura da laje

α : coeficiente para cálculo de flechas elásticas em lajes retangulares submetidas a carregamento uniformemente distribuído, ver Anexo 1.

Com a flechas imediatas encontradas, pôde-se determinar o efeito da fluência do concreto para calcular a flecha total no tempo infinito. Considerou-se 14 dias para a aplicação da carga e que não há armadura comprimida. Assim, temos:

$$\begin{aligned}\varepsilon(t_0) &= 0,68 \cdot 0,996^t \cdot t^{0,32}, \text{ para } t_0 = 14/30 \\ \varepsilon(\infty) &= 2, \text{ para } t > 70 \text{ meses}\end{aligned}\quad (4.7)$$

sendo:

t : idade, em meses, da aplicação da carga

A partir desses coeficientes, pôde-se encontrar o fator de aumento da flecha para consideração da fluência do concreto.

$$\alpha_f = \frac{\varepsilon(\infty) - \varepsilon(t_0)}{1 + 50 \cdot \rho'} \quad (4.8)$$

sendo:

ρ' : armadura comprimida

Por fim, determinou-se a flecha no tempo infinito.

$$\delta_{total,\infty} = \delta_{imediate,CQP} \cdot (1 + \alpha_f) \quad (4.9)$$

Comparou-se com as flechas limites, se a flecha no tempo infinito estiver maior que a flecha limite, aumenta-se a altura da laje. Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2017), para o cálculo das flechas limites, considera-se que 2/3 do deslocamento acontece na laje e 1/3 acontece na viga, ou seja, o deslocamento máximo da laje deve ser inferior a 2/3 do limite estabelecido pela ABNT NBR 6118 (2014). Assim, as flechas limites foram calculadas para a situação de laje isolada:

$$\begin{aligned} \delta_{limite,CQP} &= \frac{l_x}{375} \\ \delta_{limite,Q} &= \frac{l_x}{525} \end{aligned} \quad (4.10)$$

sendo:

l_x : a menor dimensão do vão

4.1.3 ARMADURA LONGITUDINAL

Para início dos cálculos da armadura longitudinal, foi necessário determinar os momentos atuantes na direção x e y, pelo fato da laje ser simplesmente apoiada e não engastada nas bordas, não há momento negativo. Calculou-se os momentos atuantes e posteriormente a armadura longitudinal para uma faixa de metro.

Os momentos atuantes podem ser definidos como:

$$\begin{aligned} m_x &= \mu_x \cdot \frac{(g_1 + g_2 + q) \cdot l_x^2}{100} \\ m_y &= \mu_y \cdot \frac{(g_1 + g_2 + q) \cdot l_x^2}{100} \end{aligned} \quad (4.11)$$

sendo:

μ_x e μ_y : coeficientes para cálculo dos momentos máximos em lajes retangulares uniformemente carregadas, ver Anexo 1.

l_x : a menor dimensão do vão

g_1 : peso próprio

g_2 : sobrecarga permanente

q : carga acidental

Em seguida, verificou-se a altura útil mínima possível para a armadura.

$$d_{min} = 2,0 \cdot \sqrt{\frac{M_d}{b_w \cdot f_{cd}}} \quad (4.12)$$

sendo:

M_d : momento de cálculo

b_w : largura da faixa de concreto

f_{cd} : resistência de projeto do concreto a compressão

Se o d_{min} encontrado for maior que o d adotado anteriormente, então aumenta-se a altura da laje. Com o d definido, calculou-se a armadura para uma faixa de laje de 1,0 metro para flexão simples nas duas direções. Como $f_{ck} < 50$ MPa, para o cálculo do KMD, KX e KZ, adota-se $\lambda = 0,80$ e $\alpha_c = 0,85$, assim temos:

$$\begin{aligned} KMD &= \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \\ KX &= \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot KMD}{0,85}}}{0,8} \\ KZ &= 1 - \frac{0,8 \cdot KX}{2} \end{aligned} \quad (4.13)$$

sendo:

M_d : momento de cálculo

b_w : largura da faixa de concreto

d : altura útil

f_{cd} : resistência de projeto do concreto a compressão

Desta forma, pôde-se calcular a área de armadura para faixa de 1,0 metro e para cada uma das direções.

$$A_s = \frac{M_d}{KZ \cdot d \cdot f_{yd}} \quad (4.14)$$

sendo:

M_d : momento de cálculo

d : altura útil

f_{yd} : resistência de projeto à tração do aço

Verificou-se a armadura encontrada com a armadura necessária mínima. Caso a armadura necessária mínima for maior que a encontrada, aumenta-se a armadura. Definiu-se a armadura necessária mínima para faixa de 1 metro como:

$$A_{s,min} = 0,15\% \cdot 100 \cdot h \quad (4.15)$$

sendo:

h : altura total

4.1.4 RESISTÊNCIA A FORÇA CORTANTE

Iniciou-se verificando se há a necessidade de armadura de cisalhamento na laje. Para isso, comparou-se a força cortante solicitante de projeto com a força resistente de projeto ao cisalhamento. A força cortante solicitante foi calculada a partir das reações da laje nas vigas de borda nas duas direções (q_x e q_y) e adotou-se a maior reação.

$$\begin{aligned} q_x &= k_x \cdot \frac{(g_1 + g_2 + q) \cdot l_x}{10} \\ q_y &= k_y \cdot \frac{(g_1 + g_2 + q) \cdot l_x}{10} \end{aligned} \quad (4.16)$$

sendo:

k_x e k_y : coeficientes das reações nas vigas de apoio de lajes retangulares uniformemente carregadas, ver Anexo 1.

l_x : a menor dimensão do vão

g_1 : peso próprio

g_2 : sobrecarga permanente

q : carga acidental

Assim, pôde-se calcular a força solicitante de projeto

$$V_{sd} = 1,40 \cdot V_s \quad (4.17)$$

sendo:

V_s : máximo entre q_x e q_y

Definiu-se a força resistente de projeto ao cisalhamento como:

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \cdot \rho_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad (4.18)$$

sendo:

$$\tau_{Rd} = 0,25 \cdot 0,7 \cdot 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} / 1,4$$

$$k = 1,6 - d > 1,00$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} < 0,02$$

$$\sigma_{cp} = 0 \text{ (não há força longitudinal)}$$

Assim, se $V_{Rd1} > V_{Sd}$ não há necessidade de armadura de cisalhamento na seção da laje. Em seguida, verificou-se a compressão diagonal do concreto. Para isso, calculou-se a resistência da biela de concreto à compressão.

$$V_{Rd2} = 0,5 \cdot \alpha_{v1} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot 0,9 \cdot d \quad (4.19)$$

sendo:

$$\alpha_{v1} = 0,7 - f_{ck}/200$$

f_{cd} : resistência de projeto do concreto a compressão

b_w : largura da faixa de concreto

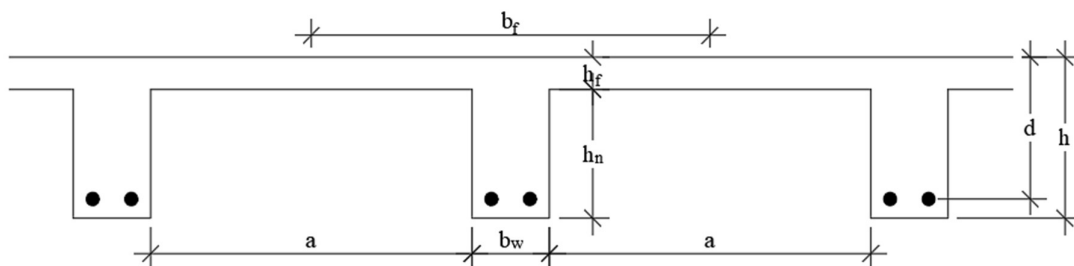
d : altura útil

Dessa forma, se $V_{Rd2} > V_{Sd}$ não há problemas na biela de concreto, ou seja, sem a necessidade de armadura para força de cisalhamento.

4.2 CÁLCULO LAJE NERVURADA

Para os procedimentos de cálculo da laje nervurada, foi adotado as mesmas premissas e parâmetros que o procedimento para laje maciça. Os parâmetros geométricos da laje nervurada podem ser vistos na figura 15. Considerou-se para simplificação de cálculo a largura da nervura (b_w) sendo a menor largura da seção transversal.

Figura 15 - Parâmetros geométricos de lajes nervuradas



Fonte: produzido pelo autor, 2020

sendo:

b_f : largura colaborante da mesa;

b_w : largura da alma;

h_f : altura da mesa;

h_n : altura da nervura;

a : espaçamento entre nervuras;

d : altura útil;

h : altura total

Segundo ABNT NBR 6118 (2014) existem restrições de dimensões de alguns parâmetros geométricos da laje nervurada. São eles:

$$\begin{aligned}
 h_f &\geq \begin{cases} a/15, & \text{sem tubulação horizontal embutida} \\ 4 \text{ cm} & \end{cases} \\
 h_f &\geq \begin{cases} 4 \text{ cm} + (\phi \text{ ou } 2\phi) & , \text{ com tubulação horizontal embutida} \\ 5 \text{ cm} & \end{cases} \\
 b_w &\geq \begin{cases} 5 \text{ cm} \\ 8 \text{ cm, se possuir armadura de compressão} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

sendo:

a : espaçamento entre nervuras

ϕ : diâmetro da tubulação

Iniciou-se calculando a largura da mesa colaborante. Os cálculos são realizados para as duas direções da laje (x e y).

$$b_f = b_w + 2 \cdot b_1 \tag{4.21}$$

sendo:

$$b_1 \leq \begin{cases} 0,10 \cdot l_x \\ 0,50 \cdot a \end{cases}$$

l_x : a menor dimensão do vão

a : espaçamento entre nervuras

4.2.1 CARGAS ATUANTES

As cargas atuantes foram definidas analogamente as cargas da laje maciça, sendo g_2 e q estritamente iguais, diferindo-se apenas no cálculo do peso próprio da estrutura.

$$g_1 = \rho_{concreto} \cdot \left(h_f + \frac{h_n \cdot b_w}{b_{f,x}} + \frac{h_n \cdot b_w}{b_{f,y}} \right) \quad (4.22)$$

sendo:

$\rho_{concreto}$: peso específico do concreto

$b_{f,x}$: largura da mesa colaborante na direção x

$b_{f,y}$: largura da mesa colaborante na direção y

4.2.2 ARMADURA LONGITUDINAL

Segundo Carvalho e Pinheiro (2009), para o cálculo do momento fletor final para cada nervura, aplica-se o coeficiente de Hahn para contemplar o efeito de grelha.

$$\delta_{Hahn} = \frac{1}{1 - \left(\frac{5}{6} \cdot \frac{\varepsilon^2}{1 + \varepsilon^4} \right)} \quad (4.23)$$

sendo:

$$\varepsilon = \frac{1}{\lambda}$$

λ : relação entre as dimensões da laje

Assim, calculou-se o momento fletor final característico para cada nervura em ambas as direções.

$$\begin{aligned} M_{Sk,ELU,x} &= \mu_x \cdot b_{f,x} \cdot \delta_{Hahn} \cdot \frac{(g_1 + g_2 + q) \cdot l_x^2}{100} \\ M_{Sk,ELU,y} &= \mu_y \cdot b_{f,y} \cdot \delta_{Hahn} \cdot \frac{(g_1 + g_2 + q) \cdot l_x^2}{100} \end{aligned} \quad (4.24)$$

sendo:

μ_x e μ_y : coeficientes para cálculo dos momentos máximos em lajes retangulares uniformemente carregadas, ver Anexo 1.

l_x : a menor dimensão do vão

g_1 : peso próprio

g_2 : sobrecarga permanente

q : carga acidental

$b_{f,x}$ e $b_{f,y}$: largura da mesa colaborante

δ_{Hahn} : coeficiente de Hahn

Para o dimensionamento da armadura, assumiu-se primeiramente que a linha neutra (LN) passa na mesa da seção. Se essa hipótese é confirmada então assume-se que a seção é um “T falso”. Caso não for, inicia-se os cálculos para um “T verdadeiro”. Os cálculos foram realizados para as duas direções e dimensionou-se as armaduras de flexão para as direções x e y.

$$\begin{aligned}
 KMD &= \frac{M_{Sd}}{b_f \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \\
 KX &= \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot KMD}{0,85}}}{0,8} \\
 KZ &= 1 - \frac{0,8 \cdot KX}{2}
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

sendo:

M_{Sd} : momento fletor de projeto

b_f : largura da mesa colaborante

d : altura útil

f_{cd} : resistência de projeto do concreto a compressão

Assim, pôde-se calcular a altura da linha neutra. Se $x < h_f$ então a linha neutra passa na mesa.

$$x = KX \cdot d \tag{4.26}$$

sendo:

d : altura útil

E por fim, calculou-se a área de aço necessário para cada nervura em ambas as direções.

$$A_{s,x} = \frac{M_{sd}}{KZ \cdot d \cdot f_{yd}} \quad (4.27)$$

sendo:

M_d : momento fletor de projeto

d : altura útil

f_{yd} : resistência de projeto à tração do aço

Com o dimensionamento da armadura de flexão para ambas as direções, foi possível verificar se estas estão nos limites estabelecidos pela ABNT NBR 6118 (2014). Calculou-se então a armadura mínima e máxima.

$$A_{s,min} > \begin{cases} \frac{M_{d,min}}{KZ \cdot d \cdot f_{yd}} \\ \rho_{min} \cdot A_c \end{cases} \quad (4.28)$$

sendo:

ρ_{min} : taxa de armadura mínima dependente do f_{ck} , tabela 17.3 da ABNT NBR 6118:2014

A_c : área de concreto da seção

d : altura útil

f_{yd} : resistência de projeto à tração do aço

Encontrou-se o momento fletor mínimo pela equação abaixo e realizou-se o cálculo de KMD, KX e KZ novamente para encontrar a armadura mínima necessária.

$$M_{d,min} = \frac{0,312 \cdot I_o \cdot f_{ck}^{2/3}}{y_t} \quad (4.29)$$

sendo:

I_o : momento de inércia bruta da seção

y_t : distância do centro de gravidade a fibra mais tracionada

f_{ck} : resistência característica do concreto à compressão, em MPa

Determinou-se também a armadura máxima da seção.

$$A_{s,max} = 4,0\% \cdot A_c \quad (4.30)$$

sendo:

A_c : área de concreto da seção

Se a armadura encontrada estiver entre os limites determinados, então aceita-se a quantidade de aço sem alterações.

4.2.3 VERIFICAÇÃO DO ESTADO LIMITE DE DEFORMAÇÃO EXCESSIVA

A verificação das flechas em lajes nervuradas foi semelhante ao procedimento já descrito para lajes maciças. Porém, verificou-se que a seção transversal de concreto fissurou ou não. Caso tenha fissurada, corrige-se a inércia da seção bruta por um fator que leva em consideração a inércia da seção no estágio II.

Para verificar se há ou não a fissuração da seção, calculou-se o momento de fissuração.

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct,m} \cdot I_o}{y_t} \quad (4.31)$$

sendo:

$\alpha = 1,20$ (seção “T”)

$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$

I_o : momento de inércia bruta da seção

y_t : distância do centro de gravidade a fibra mais tracionada

Se $M_{Sk,CQP} > M_r$ portanto a peça fissurou. Desse modo, calculou-se a nova posição da linha neutra no estágio II.

$$x_{II} = \frac{-a_2 + \sqrt{a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1} \quad (4.32)$$

sendo:

$a_1 = \frac{b_f}{2}$

$a_2 = \alpha_e \cdot A_s$

$a_3 = -d \cdot \alpha_e \cdot A_s$, considerando $A_s' = 0$

Então, calculou-se o momento de inércia no estágio II.

$$I_{II} = \frac{b_f \cdot x_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (x_{II} - d)^2 \quad (4.33)$$

sendo:

x_{II} : posição da linha neutra no estágio II

b_f : largura da mesa colaborante

d : altura útil

A_s : armadura longitudinal positiva

$$\alpha_e = \frac{E_{si}}{E_{cs}}$$

Assim, calculou-se um momento de inércia médio.

$$I_m = I_o \cdot \left(\frac{M_r}{M_{Sk,CQP}} \right)^3 + I_{II} \cdot \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_{Sk,CQP}} \right)^3 \right] \quad (4.34)$$

sendo:

M_r : momento de fissuração

$M_{Sk,CQP}$: momento solicitante para combinação quase permanente

I_o : momento de inércia bruto

I_{II} : momento de inércia no estágio II

Em seguida, calculou-se a flecha para situação fissurada. A flecha imediata para laje nervurada foi calculada de maneira análoga a flecha imediata para laje maciça, já descrito anteriormente.

$$\delta_{fissurada,CQP} = \delta_{imediate,CQP} \cdot \frac{I_o}{I_m} \quad (4.35)$$

sendo:

$\delta_{imediate,CQP}$: flecha imediata para combinação quase permanente

I_o : momento de inércia bruto

I_m : momento de inércia médio

Por fim, considerou-se a fluência do concreto de maneira análoga a laje maciça. Resultando assim, na flecha no tempo infinito. Caso essa flecha for menor que a flecha limite, aceita-se na verificação de deformação excessiva. Se necessário, aumenta-se a altura da laje.

4.2.4 VERIFICAÇÃO DO ESTADO LIMITE DE ABERTURA DE FISSURA

A laje não deve sofrer fissuração maior que a estabelecida por limite. Desse modo, calculou-se a abertura de fissura na laje.

$$w_k = \frac{\phi_i}{12,5 \cdot \eta_i} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \frac{3 \cdot \sigma_{si}}{f_{ct,m}} \quad (4.36)$$

sendo:

ϕ_i : bitola da armadura

η_i : coeficiente de aderência

E_{si} : módulo de elasticidade do concreto

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$$

$$\sigma_{si} = \frac{f_{yk}}{1,15 \cdot 1,4} \cdot \frac{g_1 + g_2 + 0,4 \cdot q}{g_1 + g_2 + q}$$

Se o valor de abertura de fissura encontrado for menor que o valor limite estabelecido pela ABNT NBR 6118 (2014), de acordo com a classe de agressividade ambiental adotado, então aceita-se a seção.

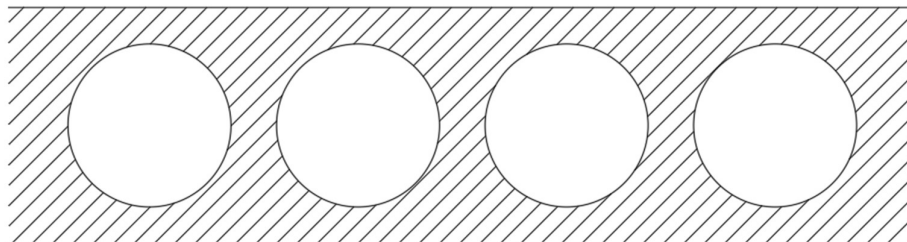
4.2.5 RESISTENCIA A FORÇA CORTANTE

O procedimento de verificação do cisalhamento para lajes nervuradas foi análogo a verificação ao cisalhamento para lajes maciças, já descrito.

4.3 LAJE *BUBBLEDECK*

A laje *Bubbledeck* foi considerada como uma laje nervurada dupla, ou seja, as esferas de ar em seu interior atuam como material inerte, gerando desta forma nervuras nas duas direções da laje, como mostrado na figura 16. Algumas considerações foram feitas para a realização dos cálculos: a laje seria moldada no local, adotou-se os diâmetros comerciais das bolas, manteve-se as restrições impostas pela ABNT NBR 6118:2014 em relação a dimensões mínimas de aspectos geométricos de uma laje nervurada.

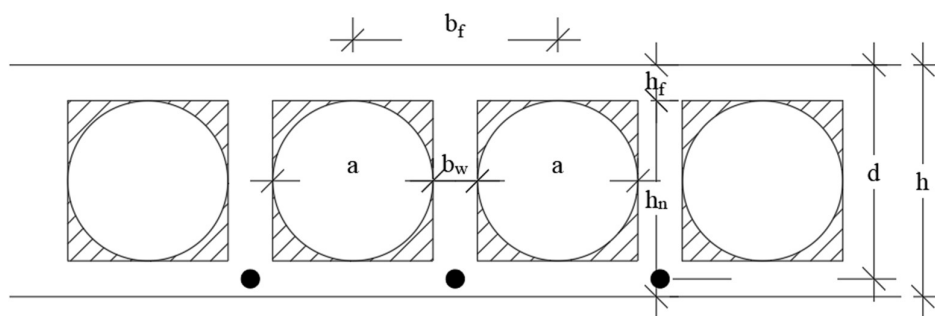
Figura 16 – Esquema genérico da seção da laje *Bubbledeck*



Fonte: produzido pelo autor, 2020

Para a definição dos parâmetros geométricos de cálculo, as áreas curvas em torno das esferas foram desconsideradas para simplificação dos cálculos, como visto abaixo na Figura 17. Assim, considerou-se a largura da nervura sendo a menor largura da seção transversal entre as esferas.

Figura 17 – Parâmetros geométricos da laje *bubbledeck*



Fonte: produzido pelo autor, 2020

Sendo:

b_f : largura colaborante da mesa;

b_w : largura da alma;

h_f : altura da mesa;

h_n : altura da nervura;

a : espaçamento entre nervuras;

d : altura útil;

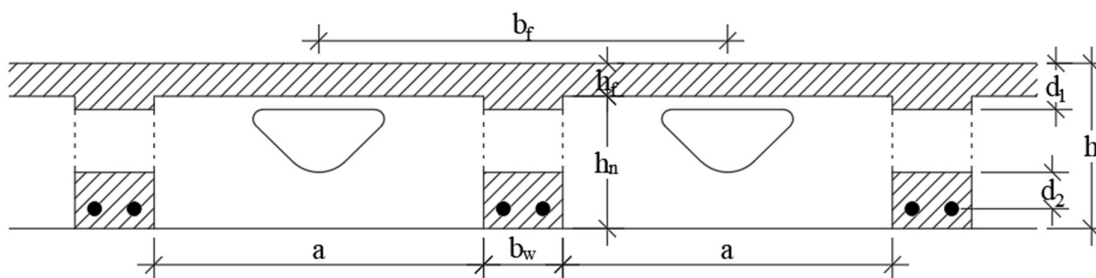
h : altura total

Desse modo, todos os procedimentos de cálculo da laje *bubbledeck* foram já descritos na laje nervurada.

4.4 LAJE *HOLED*DECK

A laje *holedeck* foi considerada uma laje do tipo nervurada para efeitos de cálculo, ou seja, o espaço vazio das nervuras não a descaracteriza como uma laje nervurada. Algumas considerações foram feitas para a realização dos cálculos: a laje seria moldada no local, adotou-se as fôrmas comerciais de fabricantes e manteve-se as restrições impostas pela ANBT NBR 6118 (2014) em relação a dimensões mínimas de aspectos geométricos de uma laje nervurada. Adotou-se como largura da nervura (b_w) como sendo a menor largura da seção transversal e para o cálculo da altura útil da seção foi descontado a altura da abertura. O furo da nervura foi aproximado para um círculo para simplificação os cálculos. A figura 18 mostra a seção transversal considerada e os parâmetros geométricos.

Figura 18 – Parâmetros geométricos da laje *holedeck*



Fonte: produzido pelo autor, 2020

Sendo:

b_f : largura colaborante da mesa;

b_w : largura da alma;

h_f : altura da mesa;

h_n : altura da nervura;

a : espaçamento entre nervuras;

$d = d_1 + d_2$, altura útil da seção;

h : altura total

Desse modo, todos os procedimentos de cálculo da laje *holedeck* foram já descritos na laje nervurada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização dos cálculos para as lajes maciça, nervurada, *bubbledeck* e *holedeck* foi possível analisar os resultados obtidos afim de identificar o sistema construtivo de laje nervurada moldada no local mais adequado para um edifício comercial. Analisou-se separadamente o consumo de concreto, o consumo de aço, o consumo de fôrma, além do peso próprio e altura final da laje. A figura 19 mostra os resultados obtidos para cada caso em relação aos aspectos geométricos da laje.

Figura 19 – Planilha de resultados aspecto geométrico das lajes, em cm

Casos	Maciça	Nervurada					<i>Bubbledeck</i>					<i>Holedeck</i>				
	h	b _w	h _f	h _n	h	a _x ,a _y	b _w	h _f	h _n	h	a _x ,a _y	b _w	h _f	h _n	h	a _x ,a _y
5,0 x 5,0	11,0	6,0	5,0	15,0	20,0	60,0	5,0	4,0	18,0	26,0	18,0	15,0	5,0	30,0	35,0	65,0
5,0 x 7,5	14,0	8,0	5,0	18,0	23,0	60,0	5,0	4,0	18,0	26,0	18,0	15,0	5,0	30,0	35,0	65,0
5,0 x 10,0	16,0	8,0	5,0	18,0	23,0	60,0	5,0	4,0	18,0	26,0	18,0	15,0	5,0	30,0	35,0	65,0
7,5 x 7,5	18,0	8,0	5,0	18,0	23,0	60,0	5,0	5,0	16,0	26,0	18,0	15,0	5,0	30,0	35,0	65,0
7,5 x 10,0	22,0	12,0	5,0	18,0	23,0	70,0	5,0	6,0	16,0	28,0	18,0	15,0	5,0	30,0	35,0	65,0
10,0 x 10,0	26,0	12,0	5,0	18,0	23,0	70,0	5,0	6,0	18,0	30,0	18,0	15,0	7,5	30,0	37,5	65,0

5.1 CONSUMO DE CONCRETO

Para que fosse possível a comparação do consumo de concreto entre os diversos sistemas construtivos estudados, foi calculado o consumo de concreto em metros cúbicos para uma área de 1 metro quadrado para cada caso. A tabela 2 mostra os resultados obtidos.

Tabela 2 – Consumo de concreto [m³/m²]

Caso	Maciça	Nervurada	<i>Bubbledeck</i>	<i>Holedeck</i>
5,0 x 5,0	0,110	0,087	0,211	0,142
5,0 x 7,5	0,140	0,106	0,210	0,142
5,0 x 10,0	0,160	0,106	0,209	0,142
7,5 x 7,5	0,180	0,106	0,208	0,142
7,5 x 10,0	0,220	0,111	0,227	0,142
10,0 x 10,0	0,260	0,111	0,246	0,167

A fim de se avaliar a influência do aumento do vão para a viabilidade de cada sistema construtivo e facilitar as comparações, selecionou-se os casos com o $\lambda = 1,00$ (relação entre o vão de maior dimensão e menor dimensão da laje). Além disso, adotou-se os casos da laje

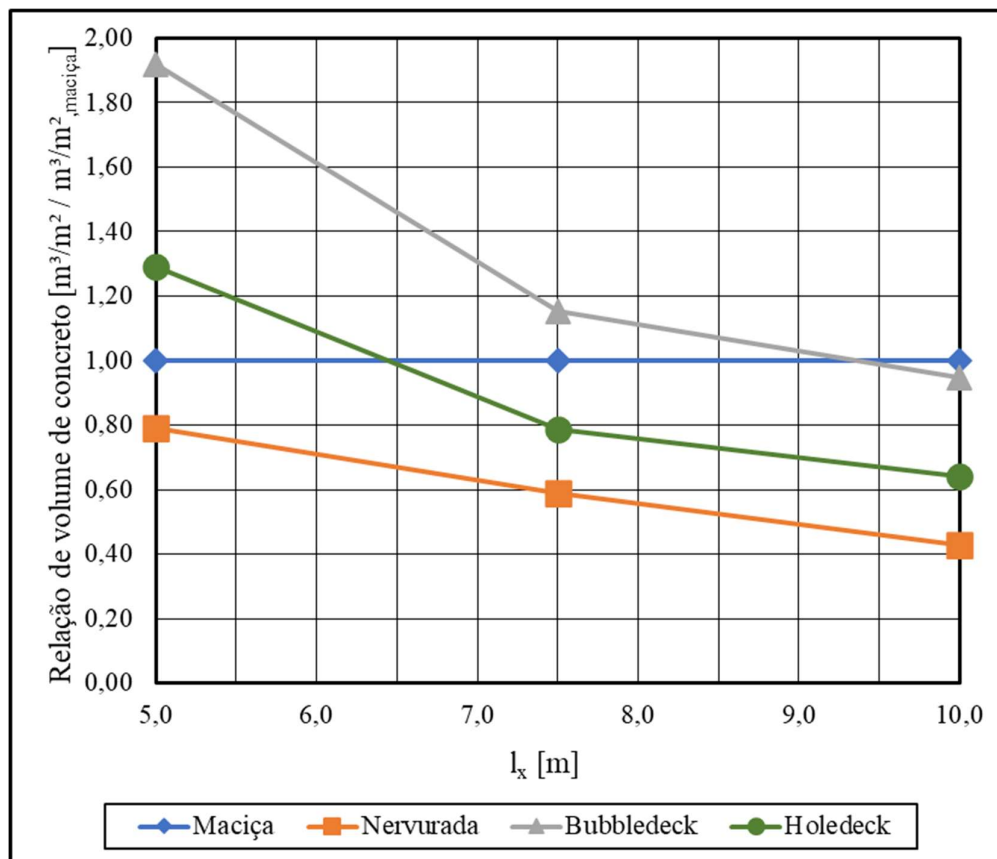
maciça como referência para os outros sistemas. Assim, encontrou-se os resultados demonstrados na tabela 3.

Tabela 3 – Relação de consumo de concreto pelo vão [m^3/m^2 / $\text{m}^3/\text{m}^2_{\text{maciça}}$]

l_x	Maciça	Nervurada	<i>Bubbledeck</i>	<i>Holedeck</i>
5,0	1,00	0,79	1,92	1,29
7,5	1,00	0,59	1,15	0,79
10,0	1,00	0,43	0,95	0,64

Assim, pôde-se construir um gráfico relacionando o vão da laje com a relação de consumo de concreto para cada sistema construtivo. O gráfico pode ser visto na figura 20.

Figura 20 – Gráfico da relação de consumo de concreto pelo vão [m^3/m^2 / $\text{m}^3/\text{m}^2_{\text{maciça}}$]



Fonte: produzido pelo autor, 2020

Para o vão de 5 metros a laje nervurada tradicional apresentou uma redução no consumo de concreto de 21% em relação a laje maciça. Já as lajes *bubbledeck* e *holedeck* apresentaram um aumento de 92% e 29%, respectivamente. Para o vão de 7,50 metros a laje nervurada

tradicional e a *holedeck* apresentaram uma redução no consumo de concreto de 41% e 21% respectivamente. Já a laje *bubbledeck* apresentou um aumento de 15% no consumo de concreto. Para o vão de 10,0 metros os três sistemas construtivos apresentaram redução frente a laje maciça. A laje nervurada reduziu em 57%, a laje *holedeck* em 36% e a laje *bubbledeck* em apenas 5%. Ao considerar os três casos, a laje nervurada tradicional reduziu 40%, a laje *bubbledeck* aumentou 34% e laje *holedeck* reduziu 9% o consumo de concreto em média.

Notou-se que com o aumento do vão os sistemas construtivos de laje nervurada apresentaram menor consumo de concreto ao se comparar com a laje maciça, algo já esperado. Ao se comparar os sistemas construtivos de laje nervurada, a laje nervurada tradicional apresentou maior viabilidade em todas as faixas de vão. Isso é explicado pelo fato da laje *bubbledeck* possuir duas mesas, a inferior e a superior, fazendo assim com que a área de concreto de sua seção seja elevada ao se comparar com os outros tipos. Por sua vez, a laje *holedeck*, devido a diminuição da altura útil por nervura e a restrição de moldes com alturas variáveis, também apresentou um maior consumo de concreto frente a laje nervurada tradicional.

5.2 CONSUMO DE AÇO

Para que fosse possível a comparação do consumo de aço entre os diversos sistemas construtivos estudados, adotou-se por padrão a soma da área de aço para as duas direções da laje em uma faixa de 1 metro. O consumo de aço analisado foi restrito a área de aço na nervura, não contabilizando aços construtivos e área de aço na mesa das lajes nervuradas. Os resultados encontrados são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Consumo de aço [cm²/m]

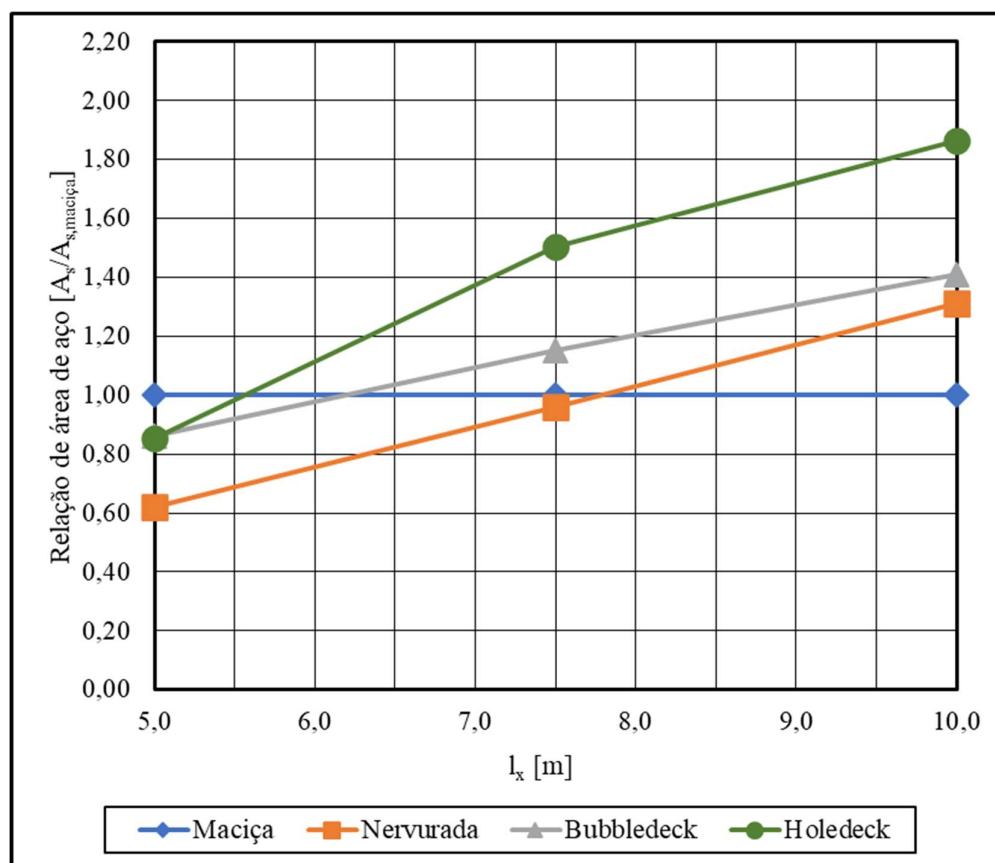
Caso	Maciça	Nervurada	<i>Bubbledeck</i>	<i>Holedeck</i>
5,0 x 5,0	7,78	4,84	6,70	6,64
5,0 x 7,5	8,02	5,07	7,33	8,40
5,0 x 10,0	8,30	4,92	7,70	8,91
7,5 x 7,5	10,42	10,02	12,00	15,69
7,5 x 10,0	11,48	11,88	13,36	18,49
10,0 x 10,0	14,34	18,81	20,25	26,72

A fim de se avaliar a influência do aumento do vão na área de aço necessário por metro, selecionou-se os casos com $\lambda = 1$ e adotou-se a laje maciça como padrão de comparação. Dessa forma, obteve-se os dados apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Relação de consumo de aço pelo vão [$A_s/A_{s,maciça}$]

l_x	Maciça	Nervurada	<i>Bubbledeck</i>	<i>Holedeck</i>
5,0	1,00	0,62	0,86	0,85
7,5	1,00	0,96	1,15	1,51
10,0	1,00	1,31	1,41	1,86

Com esses dados, construiu-se o gráfico mostrado na figura 21.

Figura 21 – Gráfico da relação da área de aço pelo vão

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Para o vão 5,0 metros a laje nervurada tradicional, a laje *bubbledeck* e a laje *holedeck* apresentaram redução na área de aço por metro, sendo, respectivamente, de 38%, 14% e 15% frente a laje maciça. Para o vão de 7,5 metros a laje nervurada tradicional reduziu em 4%, já a laje *bubbledeck* aumentou em 15%, a laje *holedeck* apresentou aumento de 51%. Por fim, para o vão de 10,0 metros os três sistemas construtivos de laje nervuradas sofreram aumento na área de aço, sendo eles de 31% para laje nervurada tradicional, 41% para laje *bubbledeck* e 86% para laje *holedeck*. Ao considerar os três casos, a laje nervurada tradicional reduziu em 3% e as lajes

bubbledeck e *holedeck* aumentaram em 14% e 41% respectivamente o consumo de aço em média.

Notou-se que entre os sistemas construtivos de laje nervurada, o sistema tradicional demonstrou maior efetividade para todos os vãos com relação a área de aço por metro. Fato esse condizente com o esperado, pois seu consumo de concreto por metro quadrado também foi o menor para todas as faixas de vão. Além disso, com o aumento do vão, os sistemas construtivos de laje nervurada apresentaram um aumento praticamente constante no consumo de aço em relação a laje maciça. A laje *holedeck* apresentou a pior efetividade para praticamente todas as faixas de vão ao se comparar apenas os sistemas construtivos de laje nervurada.

5.3 ÁREA DE FÔRMA

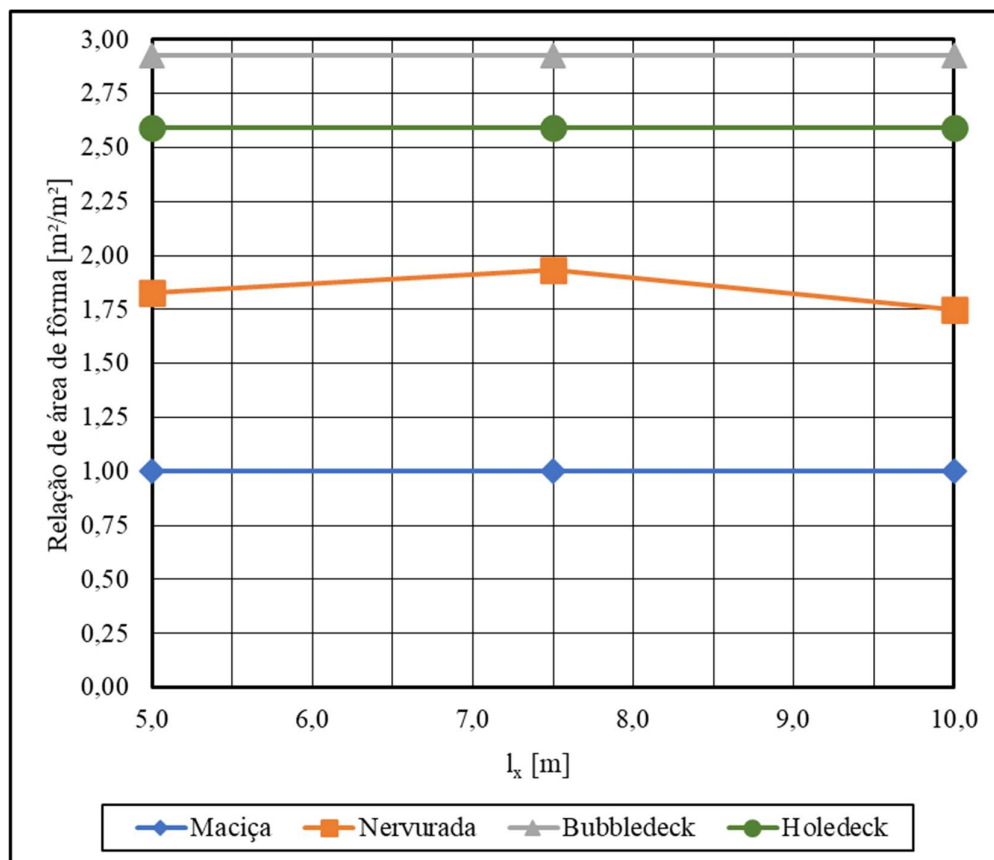
A área de fôrma foi contabilizada para cada caso estudado como a área em metros quadrado de fôrma para um metro quadrado de laje. Assim, obteve-se os resultados apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Consumo de fôrma [m²/m²]

Caso	Maciça	Nervurada	<i>Bubbledeck</i>	<i>Holedeck</i>
5,0 x 5,0	1,00	1,83	2,92	2,59
5,0 x 7,5	1,00	1,93	2,92	2,59
5,0 x 10,0	1,00	1,93	2,92	2,59
7,5 x 7,5	1,00	1,93	2,92	2,59
7,5 x 10,0	1,00	1,75	2,92	2,59
10,0 x 10,0	1,00	1,75	2,92	2,59

Assim, adotando os casos com $\lambda = 1,00$, construiu-se o gráfico apresentado na figura 22, relacionando a área de fôrma com o vão.

Figura 22 – Gráfico de consumo de fôrma pelo vão



Fonte: produzido pelo autor, 2020

Como era esperado, os sistemas construtivos de laje nervurada apresentaram um consumo de fôrma maior em relação a laje maciça. Para o vão de 5,0 metros, a laje nervurada tradicional, a laje *bubbledeck* e a laje *holedeck* apresentaram um aumento de 83%, 192% e 59% respectivamente. Para o vão de 7,5 metros os resultados foram semelhantes ao de 5,0 metros, apenas a laje nervurada tradicional aumentou 93% ao invés de 83%. Para o vão de 10,0 metros a laje nervurada tradicional, a laje *bubbledeck* e a laje *holedeck* apresentaram aumento de 75%, 192% e 159% respectivamente. Ao considerar os três casos, a laje nervurada tradicional aumentou em 84% frente um aumento de 192% da laje *bubbledeck* e 159% da laje *holedeck* no consumo de fôrma em média.

O alto consumo de fôrma pela laje *bubbledeck* é explicado pela necessidade de fôrma tanto na parte inferior da laje, quanto na parte interna da laje, fazendo com que seu consumo de fôrma seja demasiadamente maior (192% para todas faixas de vão em relação a maciça) ao se comparar com os outros sistemas construtivos de laje nervurada. Além disso, essa área de fôrma utilizada nas esferas da laje, são área de fôrma perdidas, ou seja, não há a possibilidade de reutilização. A laje *holedeck* apresenta maior consumo de fôrma ao se comparar com a laje

nervurada tradicional pelo fato da necessidade de utilização de fôrmas para criar os espaços vazios nas nervuras, aumentando-se assim seu consumo. A laje nervurada tradicional apresentou vantagem em relação aos sistemas construtivos de laje nervurada para todas as faixas de vão.

5.4 PESO PRÓPRIO

Foi possível analisar também o peso próprio gerado para cada caso estudado, encontrando a relação em peso por metro quadrado de laje. Os resultados encontrados são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Peso próprio [kN/m²]

Caso	Maciça	Nervurada	<i>Bubbledeck</i>	<i>Holedeck</i>
5,0 x 5,0	2,75	2,18	5,28	3,55
5,0 x 7,5	3,50	2,65	5,24	3,55
5,0 x 10,0	4,00	2,65	5,22	3,55
7,5 x 7,5	4,50	2,65	5,20	3,55
7,5 x 10,0	5,50	2,78	5,67	3,55
10,0 x 10,0	6,50	2,78	6,15	4,18

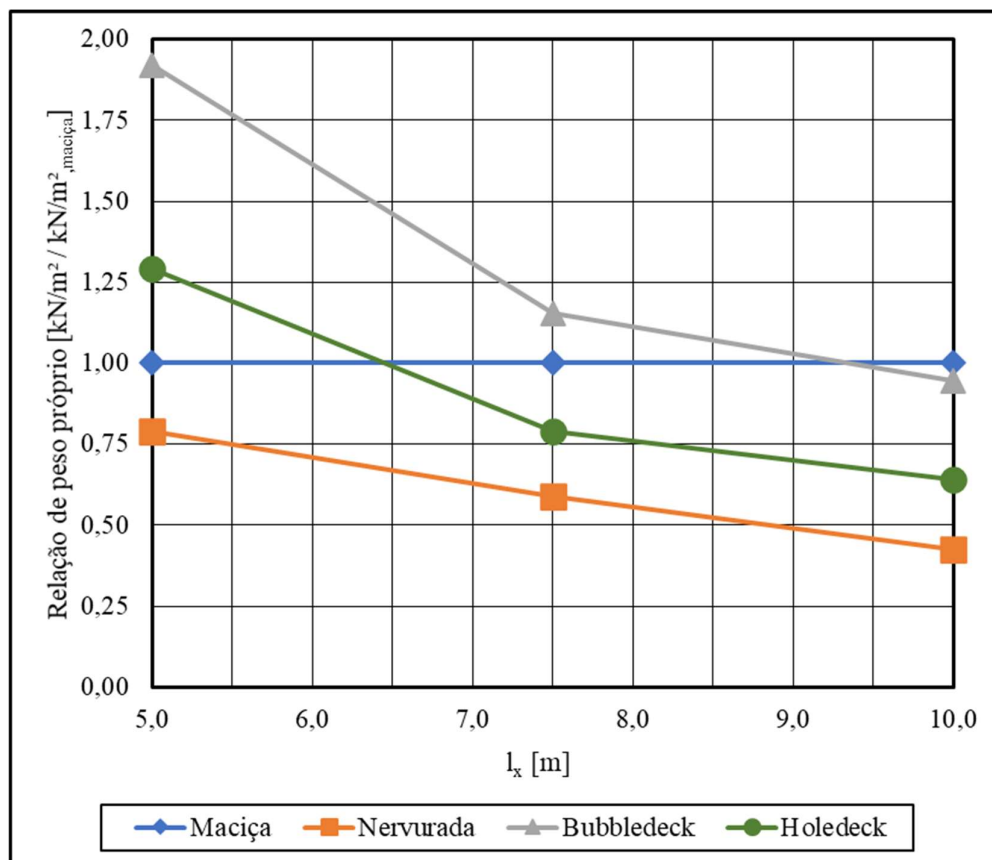
A fim de analisar a influência do vão em relação ao peso próprio, selecionou-se as lajes com $\lambda = 1,00$ e tornando a laje maciça como referência construiu-se a tabela 8.

Tabela 8 – Relação peso próprio pelo vão [kN/m² / kN/m²_{maciça}]

l_x	Maciça	Nervurada	<i>Bubbledeck</i>	<i>Holedeck</i>
5,0	1,00	0,79	1,92	1,29
7,5	1,00	0,59	1,15	0,79
10,0	1,00	0,43	0,95	0,64

Assim, construiu-se o gráfico que mostrado na figura 23.

Figura 23 – Gráfico da relação peso próprio pelo vão



Fonte: produzido pelo autor, 2020

Para o vão de 5,0 metros a laje nervurada apresentou uma redução de peso próprio de 21%, enquanto a laje *bubbledeck* e a laje *holedeck* apresentaram um aumento de 92% e 29% respectivamente, ao se comparar com a laje maciça. Para o vão de 7,5 metros a laje nervurada e a laje *holedeck* apresentaram uma redução de 41% e 21% respectivamente. Para o vão de 10,0 metros os três sistemas construtivos apresentaram redução no peso próprio, a laje nervurada tradicional reduziu em 57% frente a uma redução de 5% e 36% para laje *bubbledeck* e *holedeck* respectivamente. Ao considerar os três casos, a laje nervurada reduziu em média 40% o peso próprio, enquanto a laje *bubbledeck* aumentou em 34% e a laje *holedeck* diminuiu em 9%.

A laje nervurada tradicional mostrou-se mais efetiva em termos de peso próprio ao se comparar com todos os outros sistemas para todas as faixas de vão. Para o vão de 5,0 metros a própria laje maciça mostrou-se ser mais efetiva ao se comparar com a *bubbledeck* e *holedeck* em termos de peso próprio. Ao se comparar apenas os sistemas construtivos de laje nervurada, a laje *bubbledeck* mostrou-se a pior viabilidade para todas as faixas de vão.

5.5 ALTURA DA LAJE

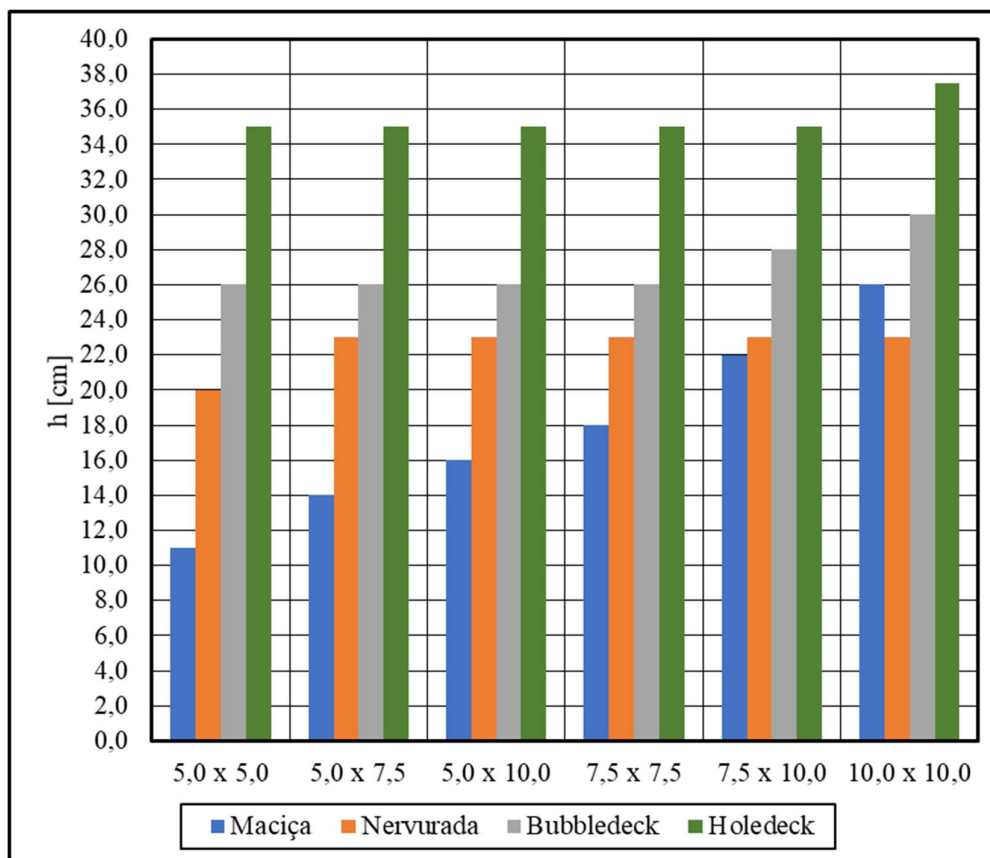
Os resultados encontrados para a altura total laje para caso são mostrados na tabela 9.

Tabela 9 – Altura total da laje para cada caso [cm]

Casos	Maciça	Nervurada	<i>Bubbledeck</i>	<i>Holedeck</i>
5,0 x 5,0	11,0	20,0	26,0	35,0
5,0 x 7,5	14,0	23,0	26,0	35,0
5,0 x 10,0	16,0	23,0	26,0	35,0
7,5 x 7,5	18,0	23,0	26,0	35,0
7,5 x 10,0	22,0	23,0	28,0	35,0
10,0 x 10,0	26,0	23,0	30,0	37,5

Assim, montou-se o gráfico apresentado na figura 24, visualizando a altura total da laje nos quatros sistemas construtivos para cada caso.

Figura 24 – Gráfico da altura das lajes para cada caso



Fonte: produzido pelo autor, 2020

Para todos os casos, a laje *holedeck* apresentou maior altura de laje, sendo de 35,0 centímetros para os cinco primeiros casos e de 37,5 centímetros para o último caso. A laje

bubbledeck apresentou a segunda maior altura para todos os casos estudados, sendo de 26,0 centímetros para os quatro primeiros casos e de 28,0 centímetros para o caso de 7,5 x 10,0 e de 30,0 centímetros para o caso 10,0 x 10,0. A laje nervurada tradicional apresentou 20,0 centímetros para o caso 5,0 x 5,0 e para todos os outros apresentou 23,0 centímetros de altura.

A laje nervurada tradicional mostrou-se a mais eficiente em termos de altura de laje entre os sistemas construtivos de laje nervurada. Isso deve-se ao fato pela alta disponibilidade de dimensões de cubetas no mercado, fazendo a fácil adaptação para cada caso necessário, não desperdiçando assim altura da laje. A altura da laje é importante para um edifício comercial, pois com uma altura menor ganha-se pé-direito e consequentemente a possibilidade de se construir mais andares com uma mesma altura de edifício.

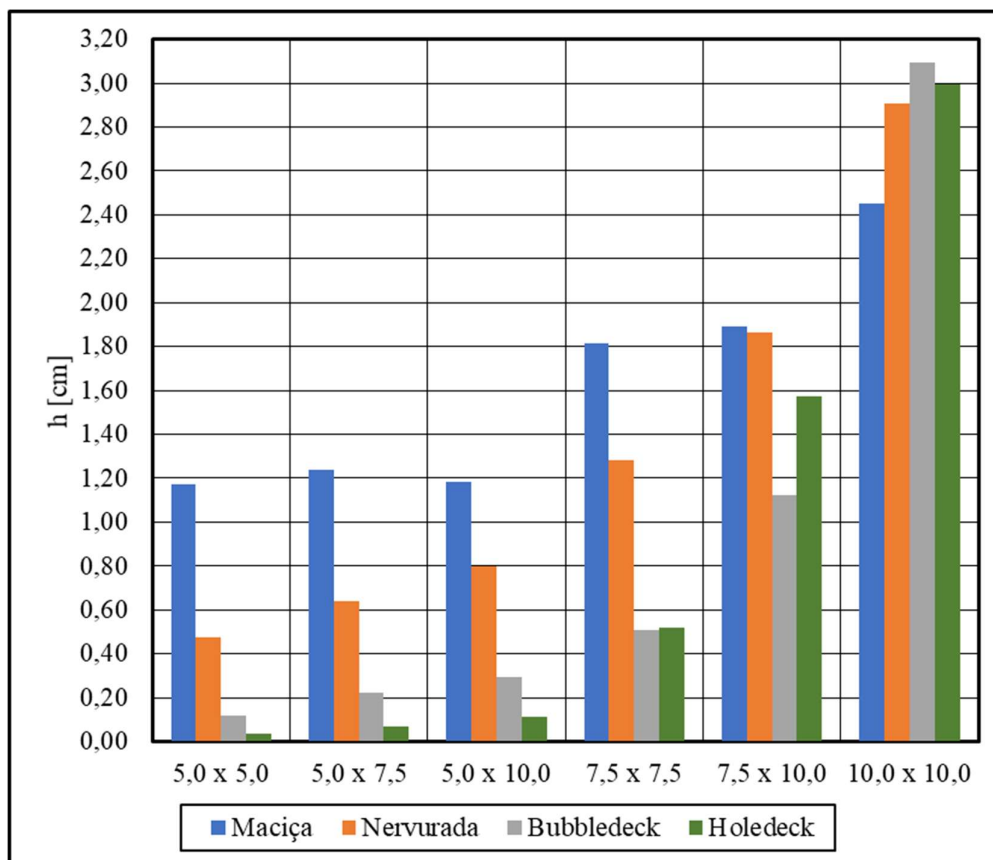
É pertinente analisar junto com a altura da laje as flechas encontradas para o tempo infinito de cada sistema construtivo para cada caso. A tabela 10 mostra os valores de flecha encontrado.

Tabela 10 – Flecha para cada caso [cm]

Casos	Maciça	Nervurada	<i>Bubbledeck</i>	<i>Holedeck</i>
5,0 x 5,0	1,17	0,47	0,12	0,04
5,0 x 7,5	1,24	0,64	0,22	0,07
5,0 x 10,0	1,18	0,80	0,29	0,11
7,5 x 7,5	1,81	1,28	0,62	0,52
7,5 x 10,0	1,89	1,86	1,43	1,57
10,0 x 10,0	2,45	2,91	3,10	2,99

Assim, montou-se o gráfico da figura 25 para visualizar as flechas dos sistemas construtivos para cada caso.

Figura 25 – Gráfico das flechas para cada caso



Fonte: produzido pelo autor, 2020

Percebeu-se que nos primeiros casos com menor vão igual a 5,0 metros, a laje maciça apresentou as maiores flechas, algo que já era esperado devido a sua menor altura para esses casos, comparando com os outros sistemas construtivos. Conforme o vão foi aumentando, os sistemas construtivos de laje nervurada também foram aumentando as flechas. Algo esperado, devido a maior efetividade do uso da altura da laje. Entre os sistemas construtivos de laje nervurada, a laje nervurada tradicional apresentou maiores flechas para todos os casos, exceto para o caso 10,0 x 10,0, em que as lajes *bubbledeck* e *holedeck* apresentaram flechas maiores.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da análise das variáveis estudadas, percebeu-se que os resultados se aproximaram de Mendes, Leite e Salomão (2019), pois a laje nervurada tradicional demonstrou ser a mais adequada frente aos outros sistemas construtivos. Mendes, Leite e Salomão (2019) também concluíram que para um vão de 8,0 metros a laje nervurada tradicional reduziu o consumo de aço e concreto ao se comparar com a laje *bubbledeck*. Os resultados discordaram

de Duarte Júnior (2014), pois ele conclui que a laje *bubbledeck* é a mais adequada para um vão de 10,0 metros, ao contrário dos resultados demonstrados nesse trabalho. Isso pode ser explicado pelo fato de Duarte Júnior (2014) ter considerado outros aspectos de custo, como a mão de obra, escoramento, montagem.

A análise de eficiência dos sistemas construtivos de laje é complexa, visto a necessidade da determinação de parâmetros iniciais e ainda não considerar todas as normas necessárias para um projeto. Assim, percebeu-se que a laje *bubbledeck* traria vantagens ao incorporar a ABNT NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio (2012) devido a mesa inferior de concreto reduzindo a área de contato com o fogo. Os outros sistemas construtivos de laje nervurada sofreriam maiores alterações em seu dimensionamento para atender os parâmetros requisitados pela NBR 15200 (2012), principalmente a laje *holedeck*, cuja função é manter aparente os vazios das nervuras, prejudicando ainda mais a resistência ao fogo. Ao se incorporar a norma ABNT NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho (2013) presume-se que seus efeitos serão menos críticos no dimensionamento das lajes, visto que por não haver dormitórios separado pelas lajes, os requisitos acústicos necessário não são tão críticos como os de incêndio.

6. CONCLUSÕES

Os estudos dos sistemas construtivos de laje nervurada se mostram cada vez mais pertinentes para o desenvolvimento da engenharia civil, pois através deles é possível melhorar a eficiência e produtividade da construção civil. Assim, reduz o consumo e o desperdício de materiais em edifícios.

Os resultados obtidos nesse estudo demonstraram que os novos sistemas construtivos de laje nervurada, a laje *bubbledeck* e a laje *holedeck*, não se mostraram mais eficientes do que a laje nervurada tradicional. Em termos de consumo de concreto, consumo de aço, consumo de fôrmas, peso próprio e altura de laje, a laje nervurada tradicional se mostrou como a mais adequada para os casos estudados, com vãos variando entre 5,0 e 10,0 metros e em um cenário de edifício comercial, desconsiderando as normas ABNT NBR 15200 (2012) e ABNT NBR 15575 (2013)

A laje *bubbledeck*, como sistema construtivo de laje nervurada moldado no local, não justificou sua escolha. Apesar disso, entende-se que sua maior vantagem está na possibilidade de industrialização. Dessa forma, a viabilidade técnica nesse caso deve ser comparada a sistemas construtivos de lajes pré-moldadas. A laje *holedeck*, apesar de não ter se mostrado a mais adequada para um edifício comercial, pode ter sua escolha como sistema construtivo de laje nervurada justificada pelo fato arquitetônico e estético apenas.

O objetivo desse trabalho em identificar o sistema construtivo de laje nervurada em concreto moldado no local para um edifício comercial foi alcançado. Além disso, pôde-se estudar as especificidades de cada um dos sistemas construtivos, dimensionar as lajes para cada caso proposto a luz da ABNT NBR 6118 (2014) e analisar o consumo de concreto, aço e fôrma, peso próprio e altura de laje para cada caso.

Sugestões para próximos trabalho:

- Considerar a norma brasileira de desempenho de edificações habitacionais, ABNT NBR 15575:2013, no dimensionamento das lajes nervuradas para cada sistema construtivo.
- Considerar a norma brasileira para projeto de estruturas em situação de incêndio no dimensionamento das lajes nervuradas para cada sistema construtivo.
- Estudar a variação da classe de agressividade ambiental na viabilidade técnica dos sistemas construtivos de laje nervurada.

REFERÊNCIAS

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

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

CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. B. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: volume 2**. São Paulo: Pini, 2009.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014**. 4.ed. São Carlos: EdUFSCar, 2017.

DALBEN, D.; BRIDI, M. E. Lajes Maciças Convencionais, Nervuradas Com Cubas Plásticas e Nervuradas Treliçadas: Análise Comparativa. XXIII Seminário de Iniciação Científica. **Anais...**Rio Grande do Sul: 2015: Salão do Conhecimento UNIJUI, 2015.

GUEDES, N. D.; ANDRADE, R. L. **Avaliação de Desempenho de Estruturas Utilizando Lajes do Tipo Bubbledeck**. Brasília, 2015. 106p. Monografia de projeto final em Engenharia Civil - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília.

DUARTE JÚNIOR, O. F. Laje Bubbledeck: Características gerais e viabilidade executiva. **Revista Especialize On-Line IPOG**, v. 01, p. 14, dez. 2014.

MENDES, R. F. G.; LEITE, F. L.; SALOMÃO, I. L. Análise do Desempenho da Laje Bubbledeck em Comparação a Laje Nervurada. CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA. **Anais...**Palmas: CONFEA, 2019

SILVA, M. A. F. DA. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. São Carlos, 2005. Dissertação para Mestre em Construção Civil. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil - Universidade Federal de São Carlos.

STOTT, R. **Sistema inovador de laje grelhada usa 55% menos concreto**. 04 Jan 2016. ArchDaily Brasil. (Trad. Baratto, Romullo). Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/779699/sistema-inovador-de-laje-grelhada-usa-55-percent-menos-concreto>. Acesso em: 24 maio 2020.

VIZOTTO, I.; SARTORTI, A. L. Soluções de lajes maciças, nervuradas com cuba plástica e nervuradas com vigotas treliçadas pré-moldadas: análise comparativa. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 15, p. 19–28, 2010.

ANEXO 1

Figura 26 – Quadro de coeficientes α , μ_x , μ_y , k_x , k_y , ψ_2

λ	Caso 1	Caso 1		Caso 1		Caso 1
	α	μ_x	μ_y	k_x	k_y	ψ_2
1,00	4,67	4,41	4,41	2,50	2,50	1,50
1,05	5,17	4,80	4,45	2,62	2,50	1,48
1,10	5,64	5,18	4,49	2,73	2,50	1,46
1,15	6,09	5,56	4,49	2,83	2,50	1,44
1,20	6,52	5,90	4,48	2,92	2,50	1,42
1,25	6,95	6,27	4,45	3,00	2,50	1,40
1,30	7,36	6,60	4,42	3,08	2,50	1,38
1,35	7,76	6,93	4,37	3,15	2,50	1,36
1,40	8,14	7,25	4,33	3,21	2,50	1,34
1,45	8,51	7,55	4,30	3,28	2,50	1,32
1,50	8,87	7,86	4,25	3,33	2,50	1,30
1,55	9,22	8,12	4,20	3,39	2,50	1,28
1,60	9,54	8,34	4,14	3,44	2,50	1,26
1,65	9,86	8,62	4,07	3,48	2,50	1,24
1,70	10,15	8,86	4,00	3,53	2,50	1,22
1,75	10,43	9,06	3,96	3,57	2,50	1,20
1,80	10,71	9,27	3,91	3,61	2,50	1,18
1,85	10,96	9,45	3,83	3,65	2,50	1,16
1,90	11,21	9,63	3,75	3,68	2,50	1,14
1,95	11,44	9,77	3,71	3,72	2,50	1,12
2,00	11,68	10,00	3,64	3,75	2,50	1,10

Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho, 2017. Adaptado.

APÊNDICE A – Planilhas de cálculo laje maciça

Figura 27 – Planilhas de cálculo laje maciça: 5,0 x 5,0m e 5,0 x 7,5m

Laje Maciça - 5,0 x 5,0 m						Laje Maciça - 5,0 x 7,5 m					
Parâmetros geométricos e coeficientes						Parâmetros geométricos e coeficientes					
l_x	500	cm	α	4,67	-	l_x	500	cm	α	8,87	-
l_y	500	cm	μ_x	4,41	-	l_y	750	cm	μ_x	7,86	-
λ	1,00	-	μ_y	4,41	-	λ	1,50	-	μ_y	4,25	-
c	2,50	cm	k_x	2,50	-	c	2,50	cm	k_x	3,33	-
Φ_{adotado}	12,5	mm	k_y	2,50	-	Φ_{adotado}	12,5	mm	k_y	2,50	-
ρ_{concreto}	25	kN/m ³	ψ_2	1,50	-	ρ_{concreto}	25	kN/m ³	ψ_2	1,30	-
f_{ck}	25	MPa	ψ_3	25	-	f_{ck}	25	MPa	ψ_3	25	-
f_{yd}	50	kN/cm ²				f_{yd}	50	kN/cm ²			
Alturas			Cargas atuantes			Alturas			Cargas atuantes		
d_{adotado}	6,63	cm	g_1	2,75	kN/m ²	d_{adotado}	9,63	cm	g_1	3,50	kN/m ²
h_{adotado}	11,00	cm	g_2	1,40	kN/m ²	h_{adotado}	14,00	cm	g_2	1,40	kN/m ²
			q	2,50	kN/m ²				q	2,50	kN/m ²
Flechas			Cisalhamento			Flechas			Cisalhamento		
$\delta_{\text{lim,CQP}}$	1,33	cm	q_x	8,31	kN/m	$\delta_{\text{lim,CQP}}$	1,33	cm	q_x	12,32	kN/m
$\delta_{\text{lim,Q}}$	0,95	cm	q_y	8,31	kN/m	$\delta_{\text{lim,Q}}$	0,95	cm	q_y	9,25	kN/m
E_{ci}	28000	MPa	V_s	8,31	kN/m	E_{ci}	28000	MPa	V_s	12,32	kN/m
E_{cs}	23800	MPa	V_{sd}	11,64	kN/m	E_{cs}	23800	MPa	V_{sd}	17,25	kN/m
$\delta_{\text{imed,CQP}}$	0,47	cm	τ_{Rd}	321	kN/m ²	$\delta_{\text{imed,CQP}}$	0,50	cm	τ_{Rd}	321	kN/m ²
t_0	0,47	-	k	1,53	cm	t_0	0,47	-	k	1,50	cm
$\varepsilon(t_0)$	0,53	-	ρ_1	0,006	-	$\varepsilon(t_0)$	0,53	-	ρ_1	0,003	-
$\varepsilon(\infty)$	2	-	σ_{cp}	0	-	$\varepsilon(\infty)$	2	-	σ_{cp}	0	-
α_f	1,47	-	V_{Rd1}	46,75	kN	α_f	1,47	-	V_{Rd1}	60,97	kN
$\delta_{\text{total},\infty}$	1,17	cm	α_{v1}	0,50	-	$\delta_{\text{total},\infty}$	1,24	cm	α_{v1}	0,50	-
δ_Q	0,23	cm	V_{Rd2}	266,18	kN	δ_Q	0,21	cm	V_{Rd2}	386,72	kN
Armadura longitudinal						Armadura longitudinal					
m_x	7,33	kN.m/m	m_y	7,33	kN.m/m	m_x	14,54	kN.m/m	m_y	7,86	kN.m/m
$d_{\text{min},x}$	0,048	m	$d_{\text{min},y}$	0,048	m	$d_{\text{min},x}$	0,068	m	$d_{\text{min},y}$	0,050	m
KMD	0,131	-	KMD	0,131	-	KMD	0,123	-	KMD	0,067	-
KX	0,210	-	KX	0,210	-	KX	0,196	-	KX	0,102	-
KZ	0,916	-	KZ	0,916	-	KZ	0,921	-	KZ	0,959	-
$A_{s,x}$	3,89	cm ² /m	$A_{s,y}$	3,89	cm ² /m	$A_{s,x}$	5,28	cm ² /m	$A_{s,y}$	2,74	cm ² /m
$A_{s,\text{min},x}$	1,65	cm ² /m	$A_{s,\text{min},y}$	1,65	cm ² /m	$A_{s,\text{min},x}$	2,1	cm ² /m	$A_{s,\text{min},y}$	2,1	cm ² /m
$A_{s,\text{adot},x}$	3,89	cm ² /m	$A_{s,\text{adot},y}$	3,89	cm ² /m	$A_{s,\text{adot},x}$	5,28	cm ² /m	$A_{s,\text{adot},y}$	2,74	cm ² /m
Consumo de materiais						Consumo de materiais					
V_{concreto}	0,110	m ³ /m ²	A_s	7,781	cm ² /m	V_{concreto}	0,140	m ³ /m ²	A_s	8,022	cm ² /m
A_{forma}	1,000	m ² /m ²				A_{forma}	1,000	m ² /m ²			

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 28 – Planilhas de cálculo laje maciça: 5,0 x 10,0m e 7,5 x 7,5m

Laje Maciça - 5,0 x 10,0 m						Laje Maciça - 7,5 x 7,5 m					
Parâmetros geométricos e coeficientes						Parâmetros geométricos e coeficientes					
l_x	500	cm	α	11,68	-	l_x	750	cm	α	4,67	-
l_y	1000	cm	μ_x	10	-	l_y	750	cm	μ_x	4,41	-
λ	2,00	-	μ_y	3,64	-	λ	1,00	-	μ_y	4,41	-
c	2,50	cm	k_x	3,75	-	c	2,50	cm	k_x	2,50	-
$\Phi_{adotado}$	12,5	mm	k_y	2,50	-	$\Phi_{adotado}$	12,5	mm	k_y	2,50	-
$\rho_{concreto}$	25	kN/m ³	ψ_2	1,10	-	$\rho_{concreto}$	25	kN/m ³	ψ_2	1,50	-
f_{ck}	25	MPa	ψ_3	25	-	f_{ck}	25	MPa	ψ_3	25	-
f_{yd}	50	kN/cm ²				f_{yd}	50	kN/cm ²			
Alturas			Cargas atuantes			Alturas			Cargas atuantes		
$d_{adotado}$	11,63	cm	g_1	4,00	kN/m ²	$d_{adotado}$	13,63	cm	g_1	4,50	kN/m ²
$h_{adotado}$	16,00	cm	g_2	1,40	kN/m ²	$h_{adotado}$	18,00	cm	g_2	1,40	kN/m ²
			q	2,50	kN/m ²				q	2,50	kN/m ²
Flechas			Cisalhamento			Flechas			Cisalhamento		
$\delta_{lim,CQP}$	1,33	cm	q_x	14,81	kN/m	$\delta_{lim,CQP}$	2,00	cm	q_x	15,75	kN/m
$\delta_{lim,Q}$	0,95	cm	q_y	9,88	kN/m	$\delta_{lim,Q}$	1,43	cm	q_y	15,75	kN/m
E_{ci}	28000	MPa	V_s	14,81	kN/m	E_{ci}	28000	MPa	V_s	15,75	kN/m
E_{cs}	23800	MPa	V_{sd}	20,74	kN/m	E_{cs}	23800	MPa	V_{sd}	22,05	kN/m
$\delta_{imed,CQP}$	0,48	cm	τ_{Rd}	321	kN/m ²	$\delta_{imed,CQP}$	0,73	cm	τ_{Rd}	321	kN/m ²
t_0	0,47	-	k	1,48	cm	t_0	0,47	-	k	1,46	cm
$\varepsilon(t_0)$	0,53	-	ρ_1	0,002	-	$\varepsilon(t_0)$	0,53	-	ρ_1	0,004	-
$\varepsilon(\infty)$	2	-	σ_{cp}	0	-	$\varepsilon(\infty)$	2	-	σ_{cp}	0	-
α_f	1,47	-	V_{Rd1}	70,25	kN	α_f	1,47	-	V_{Rd1}	86,51	kN
$\delta_{total,\infty}$	1,18	cm	α_{v1}	0,50	-	$\delta_{total,\infty}$	1,81	cm	α_{v1}	0,50	-
δ_Q	0,19	cm	V_{Rd2}	467,08	kN	δ_Q	0,27	cm	V_{Rd2}	547,43	kN
Armadura longitudinal						Armadura longitudinal					
m_x	19,75	kN.m/m	m_y	7,19	kN.m/m	m_x	20,84	kN.m/m	m_y	20,84	kN.m/m
$d_{min,x}$	0,079	m	$d_{min,y}$	0,047	m	$d_{min,x}$	0,081	m	$d_{min,y}$	0,081	m
KMD	0,115	-	KMD	0,042	-	KMD	0,088	-	KMD	0,088	-
KX	0,182	-	KX	0,063	-	KX	0,137	-	KX	0,137	-
KZ	0,927	-	KZ	0,975	-	KZ	0,945	-	KZ	0,945	-
$A_{s,x}$	5,90	cm ² /m	$A_{s,y}$	2,04	cm ² /m	$A_{s,x}$	5,21	cm ² /m	$A_{s,y}$	5,21	cm ² /m
$A_{s,min,x}$	2,4	cm ² /m	$A_{s,min,y}$	2,4	cm ² /m	$A_{s,min,x}$	2,7	cm ² /m	$A_{s,min,y}$	2,7	cm ² /m
$A_{s,adot,x}$	5,90	cm ² /m	$A_{s,adot,y}$	2,40	cm ² /m	$A_{s,adot,x}$	5,21	cm ² /m	$A_{s,adot,y}$	5,21	cm ² /m
Consumo de materiais						Consumo de materiais					
$V_{concreto}$	0,160	m ³ /m ²	A_s	8,299	cm ² /m	$V_{concreto}$	0,180	m ³ /m ²	A_s	10,420	cm ² /m
A_{forma}	1,000	m ² /m ²				A_{forma}	1,000	m ² /m ²			

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 29 – Planilhas de cálculo laje maciça: 7,5 x 10,0m e 10,0 x 10,0m

Laje Maciça - 7,5 x 10,0 m						Laje Maciça - 10,0 x 10,0 m					
Parâmetros geométricos e coeficientes						Parâmetros geométricos e coeficientes					
l_x	750	cm	α	7,76	-	l_x	1000	cm	α	4,67	-
l_y	1000	cm	μ_x	6,93	-	l_y	1000	cm	μ_x	4,41	-
λ	1,35	-	μ_y	4,37	-	λ	1,00	-	μ_y	4,41	-
c	2,50	cm	k_x	3,15	-	c	2,50	cm	k_x	2,50	-
$\Phi_{adotado}$	12,5	mm	k_y	2,50	-	$\Phi_{adotado}$	12,5	mm	k_y	2,50	-
$\rho_{concreto}$	25	kN/m ³	ψ_2	1,36	-	$\rho_{concreto}$	25	kN/m ³	ψ_2	1,50	-
f_{ck}	25	MPa	ψ_3	25	-	f_{ck}	25	MPa	ψ_3	25	-
f_{yd}	50	kN/cm ²				f_{yd}	50	kN/cm ²			
Alturas			Cargas atuantes			Alturas			Cargas atuantes		
$d_{adotado}$	17,63	cm	g_1	5,50	kN/m ²	$d_{adotado}$	21,63	cm	g_1	6,50	kN/m ²
$h_{adotado}$	22,00	cm	g_2	1,40	kN/m ²	$h_{adotado}$	26,00	cm	g_2	1,40	kN/m ²
			q	2,50	kN/m ²				q	2,50	kN/m ²
Flechas			Cisalhamento			Flechas			Cisalhamento		
$\delta_{lim,CQP}$	2,00	cm	q_x	22,21	kN/m	$\delta_{lim,CQP}$	2,67	cm	q_x	26,00	kN/m
$\delta_{lim,Q}$	1,43	cm	q_y	17,63	kN/m	$\delta_{lim,Q}$	1,90	cm	q_y	26,00	kN/m
E_{ci}	28000	MPa	V_s	22,21	kN/m	E_{ci}	28000	MPa	V_s	26,00	kN/m
E_{cs}	23800	MPa	V_{sd}	31,09	kN/m	E_{cs}	23800	MPa	V_{sd}	36,40	kN/m
$\delta_{imed,CQP}$	0,77	cm	τ_{Rd}	321	kN/m ²	$\delta_{imed,CQP}$	0,99	cm	τ_{Rd}	321	kN/m ²
t_0	0,47	-	k	1,42	cm	t_0	0,47	-	k	1,38	cm
$\varepsilon(t_0)$	0,53	-	ρ_1	0,002	-	$\varepsilon(t_0)$	0,53	-	ρ_1	0,003	-
$\varepsilon(\infty)$	2	-	σ_{cp}	0	-	$\varepsilon(\infty)$	2	-	σ_{cp}	0	-
α_f	1,47	-	V_{Rd1}	104,54	kN	α_f	1,47	-	V_{Rd1}	127,85	kN
$\delta_{total,\infty}$	1,89	cm	α_{v1}	0,50	-	$\delta_{total,\infty}$	2,45	cm	α_{v1}	0,50	-
δ_Q	0,24	cm	V_{Rd2}	708,15	kN	δ_Q	0,28	cm	V_{Rd2}	868,86	kN
Armadura longitudinal						Armadura longitudinal					
m_x	36,64	kN.m/m	m_y	23,11	kN.m/m	m_x	45,86	kN.m/m	m_y	45,86	kN.m/m
$d_{min,x}$	0,107	m	$d_{min,y}$	0,085	m	$d_{min,x}$	0,120	m	$d_{min,y}$	0,120	m
KMD	0,092	-	KMD	0,058	-	KMD	0,077	-	KMD	0,077	-
KX	0,144	-	KX	0,089	-	KX	0,119	-	KX	0,119	-
KZ	0,942	-	KZ	0,964	-	KZ	0,953	-	KZ	0,953	-
$A_{s,x}$	7,10	cm ² /m	$A_{s,y}$	4,38	cm ² /m	$A_{s,x}$	7,17	cm ² /m	$A_{s,y}$	7,17	cm ² /m
$A_{s,min,x}$	3,3	cm ² /m	$A_{s,min,y}$	3,3	cm ² /m	$A_{s,min,x}$	3,9	cm ² /m	$A_{s,min,y}$	3,9	cm ² /m
$A_{s,adot,x}$	7,10	cm ² /m	$A_{s,adot,y}$	4,38	cm ² /m	$A_{s,adot,x}$	7,17	cm ² /m	$A_{s,adot,y}$	7,17	cm ² /m
Consumo de materiais						Consumo de materiais					
$V_{concreto}$	0,220	m ³ /m ²	A_s	11,482	cm ² /m	$V_{concreto}$	0,260	m ³ /m ²	A_s	14,339	cm ² /m
A_{forma}	1,000	m ² /m ²				A_{forma}	1,000	m ² /m ²			

Fonte: produzido pelo autor, 2020

APÊNDICE B – Planilhas de cálculo laje nervurada tradicional

Figura 30 – Planilha de cálculo laje tradicional: 5,0 x 5,0m

Laje nervurada - 5,0 x 5,0 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l _x	500	cm	α	4,67	-	d	15,63	cm	c	2,50	cm
l _y	500	cm	μ _x	4,41	-	a _x	60,0	cm	a _y	60,0	cm
λ	1,00	-	μ _y	4,41	-	b _{1,x}	30,0	cm	b _{1,y}	30,0	cm
b _w	6,0	cm	k _x	2,50	-	b _{fx}	66,0	cm	b _{fy}	66,0	cm
h _f	5,0	cm	k _y	2,50	-	ρ _{concreto}	25	kN/m²	f _{ck}	25	MPa
h _n	15,0	cm	ψ ₂	1,50	-	Φ _{adotado}	12,50	mm	f _{yk}	50	kN/cm²
h	20,0	cm	ψ ₃	25	-						
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g ₁	2,18	kN/m²	q	2,50	kN/m²	E _{cs}	24150	MPa	CAA	II	-
g ₂	1,40	kN/m²				α _e	8,70	-	pCF	3,02	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I _o	9,45E-05	m ⁴	pCR	4,01	kN/m/nerv
ε	1,00	-	δ _{Hahn}	1,71	-	α	1,20	-	σ _{si}	233,88	MPa
M _{Sk,ELU,x}	6,70	kN.m/m	M _{Sk,ELU,y}	6,70	kN.m/m	f _{ct,m}	2,56	MPa	w _k	0,14	mm
M _{Sk,ELU,x}	7,58	kN.m/nerv	M _{Sk,ELU,y}	7,58	kN.m/nerv	M _r	1,89	kN.m/nerv	w _{k,lim}	0,30	mm
KMD	0,037	-	KMD	0,037	-	M _{Sk,CQP,x}	5,40	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,055	-	KX	0,055	-	a ₁	33,00	cm	q _x	7,59	kN/m
KZ	0,978	-	KZ	0,978	-	a ₂	13,89	cm	V _{sd,x}	7,02	kN/nerv
x	0,87	cm	x	0,87	cm	a ₃	-217,00	cm	τ _{sd,x}	748,44	kN/m²/nerv
A _{s,x}	1,60	cm²/nerv	A _{s,y}	1,60	cm²/nerv	α _{II}	2,36	cm	τ _{Rd}	320,62	kN/m²
A _{s,adot,x}	1,60	cm²/nerv	A _{s,adot,y}	1,60	cm²/nerv	I _{II}	2,73E-05	m ⁴	k	1,44	-
Verificação da Área de Armadura						I _m	3,02E-05	m ⁴	ρ _{1,x}	0,017	-
A _{s,min,x}	0,63	cm²/nerv	A _{s,min,y}	0,63	cm²/nerv	δ _{imed,CQP}	0,07	cm	V _{Rd1,x}	8,16	kN/nerv
y _{cg,x}	15,36	cm	y _{cg,y}	15,36	cm	δ _{fiss,CQP}	0,20	cm	q _y	7,59	kN/m
I _{o,x}	9446	cm ⁴	I _{o,y}	9446	cm ⁴	α _f	1,323	-	V _{sd,y}	7,02	kN/nerv
y _{t,x}	15,36	cm	y _{t,y}	15,36	cm	δ _{total,∞}	0,47	cm	τ _{sd,y}	748,44	kN/m²/nerv
M _{d,min,x}	1,64	kN.m/nerv	M _{d,min,y}	1,64	kN.m/nerv	δ _{lim,CQP}	2,00	cm	τ _{Rd}	320,62	kN/m²
KMD	0,004	-	KMD	0,004	-	Consumo de materiais			k	1,44	-
KX	0,006	-	KX	0,006	-	V _{concreto}	0,087	m³/m²	ρ _{1,y}	0,017	-
KZ	0,998	-	KZ	0,998	-	A _s	4,840	cm²/m	V _{Rd1,y}	8,16	kN/nerv
A _{s,min,x}	0,34	cm²/nerv	A _{s,min,y}	0,34	cm²/nerv	A _{forma}	1,826	m²/m²			
A _{s,max,x}	16,80	cm²/nerv	A _{s,max,y}	16,80	cm²/nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 31 – Planilha de cálculo laje tradicional: 5,0 x 7,5m

Laje nervurada - 5,0 x 7,5 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l _k	500	cm	α	8,87	-	d	18,63	cm	c	2,50	cm
l _y	750	cm	μ _x	7,86	-	a _x	60,0	cm	a _y	60,0	cm
λ	1,50	-	μ _y	4,25	-	b _{l,x}	30,0	cm	b _{l,y}	30,0	cm
b _w	8,0	cm	k _x	3,33	-	b _{fx}	68,0	cm	b _{fy}	68,0	cm
h _f	5,0	cm	k _y	2,50	-	ρconcreto	25	kN/m³	f _{ck}	25	MPa
h _n	18,0	cm	ψ ₂	1,30	-	Φadotado	12,50	mm	f _{yk}	50	kN/cm²
h	23,0	cm	ψ ₃	25	-						
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g ₁	2,65	kN/m²	q	2,50	kN/m²	E _{cs}	24150	MPa	CAA	II	-
g ₂	1,40	kN/m²				α _e	8,70	-	p _{CF}	3,43	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I _o	1,80E-04	m ⁴	p _{CR}	4,45	kN/m/nerv
ε	0,67	-	δ _{Hahn}	1,45	-	α	1,20	-	σ _{si}	239,44	MPa
M _{Sk,ELU,x}	12,87	kN.m/m	M _{Sk,ELU,y}	6,96	kN.m/m	f _{ct,m}	2,56	MPa	w _k	0,14	mm
M _{Sk,ELU,x}	12,67	kN.m/nerv	M _{Sk,ELU,y}	6,85	kN.m/nerv	M _r	3,24	kN.m/nerv	w _{k,lim}	0,30	mm
KMD	0,042	-	KMD	0,023	-	M _{Sk,CQP,x}	9,29	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,064	-	KX	0,034	-	a ₁	34,00	cm	q _x	10,91	kN/m
KZ	0,975	-	KZ	0,986	-	a ₂	19,55	cm	V _{sd,x}	10,38	kN/nerv
x	1,18	cm	x	0,63	cm	a ₃	-364,04	cm	τ _{sd,x}	696,80	kN/m²/nerv
A _{s,x}	2,25	cm²/nerv	A _{s,y}	1,20	cm²/nerv	χ _{II}	3,00	cm	τ _{Rd}	320,62	kN/m²
A _{s,adot,x}	2,25	cm²/nerv	A _{s,adot,y}	1,20	cm²/nerv	I _{II}	5,38E-05	m ⁴	k	1,41	-
Verificação da Área de Armadura						I _m	5,92E-05	m ⁴	ρ _{l,x}	0,015	-
A _{s,min,x}	0,73	cm²/nerv	A _{s,min,y}	0,73	cm²/nerv	δ _{imed,CQP}	0,09	cm	V _{Rd1,x}	12,18	kN/nerv
y _{cg,x}	17,08	cm	y _{cg,y}	17,08	cm	δ _{fiss,CQP}	0,28	cm	q _y	8,19	kN/m
I _{o,x}	17974	cm ⁴	I _{o,y}	17974	cm ⁴	α _f	1,323	-	V _{sd,y}	7,79	kN/nerv
y _{t,x}	17,08	cm	y _{t,y}	17,08	cm	δ _{total,∞}	0,64	cm	τ _{sd,y}	523,12	kN/m²/nerv
M _{d,min,x}	2,81	kN.m/nerv	M _{d,min,y}	2,81	kN.m/nerv	δ _{limCQP}	2,00	cm	τ _{Rd}	320,62	kN/m²
KMD	0,005	-	KMD	0,005	-	Consumo de materiais			k	1,41	-
KX	0,007	-	KX	0,007	-	V _{concreto}	0,106	m³/m²	ρ _{l,y}	0,008	-
KZ	0,997	-	KZ	0,997	-	A _s	5,071	cm²/m	V _{Rd1,y}	10,28	kN/nerv
A _{s,min,x}	0,49	cm²/nerv	A _{s,min,y}	0,49	cm²/nerv	A _{forma}	1,934	m²/m²			
A _{s,max,x}	19,36	cm²/nerv	A _{s,max,y}	19,36	cm²/nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 32 – Planilha de cálculo laje tradicional: 5,0 x 10,0m

Laje nervurada - 5,0 x 10,0 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l _x	500	cm	α	11,68	-	d	18,63	cm	c	2,50	cm
l _y	1000	cm	μ _x	10	-	a _x	60,0	cm	a _y	60,0	cm
λ	2,00	-	μ _y	3,64	-	b _{1,x}	30,0	cm	b _{1,y}	30,0	cm
b _w	8,0	cm	k _x	3,75	-	b _{fx}	68,0	cm	b _{fy}	68,0	cm
h _f	5,0	cm	k _y	2,50	-	ρ _{concreto}	25	kN/m³	f _{ck}	25	MPa
h _n	18,0	cm	ψ ₂	1,10	-	Φ _{adotado}	12,50	mm	f _{yk}	50	kN/cm²
h	23,0	cm	ψ ₃	25	-						
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g ₁	2,65	kN/m²	q	2,50	kN/m²	E _{cs}	24150	MPa	CAA	II	-
g ₂	1,40	kN/m²				α _e	8,70	-	p _{CF}	3,43	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I _o	1,80E-04	m ⁴	p _{CR}	4,45	kN/m/nerv
ε	0,50	-	δ _{Hahn}	1,24	-	α	1,20	-	σ _{si}	239,44	MPa
M _{Sk,ELU,x}	16,38	kN.m/m	M _{Sk,ELU,y}	5,96	kN.m/m	f _{ct,m}	2,56	MPa	w _k	0,14	mm
M _{Sk,ELU,x}	13,85	kN.m/nerv	M _{Sk,ELU,y}	5,04	kN.m/nerv	M _r	3,24	kN.m/nerv	w _{k,lim}	0,30	mm
KMD	0,046	-	KMD	0,017	-	M _{Sk,CQP,x}	10,15	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,070	-	KX	0,025	-	a ₁	34,00	cm	q _x	12,28	kN/m
KZ	0,972	-	KZ	0,990	-	a ₂	21,42	cm	V _{sd,x}	11,69	kN/nerv
x	1,30	cm	x	0,46	cm	a ₃	-398,94	cm	τ _{sd,x}	784,68	kN/m²/nerv
A _{s,x}	2,46	cm²/nerv	A _{s,y}	0,88	cm²/nerv	χ _{II}	3,12	cm	τ _{Rd}	320,62	kN/m²
A _{s,adot,x}	2,46	cm²/nerv	A _{s,adot,y}	0,88	cm²/nerv	I _{II}	5,84E-05	m ⁴	k	1,41	-
Verificação da Área de Armadura						I _m	6,23E-05	m ⁴	ρ _{1,x}	0,017	-
A _{s,min,x}	0,73	cm²/nerv	A _{s,min,y}	0,73	cm²/nerv	δ _{imed,CQP}	0,12	cm	V _{Rd1,x}	12,57	kN/nerv
y _{cg,x}	17,08	cm	y _{cg,y}	17,08	cm	δ _{fiss,CQP}	0,34	cm	q _y	8,19	kN/m
I _{o,x}	17974	cm ⁴	I _{o,y}	17974	cm ⁴	α _f	1,323	-	V _{sd,y}	7,79	kN/nerv
y _{t,x}	17,08	cm	y _{t,y}	17,08	cm	δ _{total,∞}	0,80	cm	τ _{sd,y}	523,12	kN/m²/nerv
M _{d,min,x}	2,81	kN.m/nerv	M _{d,min,y}	2,81	kN.m/nerv	δ _{lim,CQP}	2,00	cm	τ _{Rd}	320,62	kN/m²
KMD	0,005	-	KMD	0,005	-	Consumo de materiais			k	1,41	-
KX	0,007	-	KX	0,007	-	V _{concreto}	0,106	m³/m²	ρ _{1,y}	0,006	-
KZ	0,997	-	KZ	0,997	-	A _s	4,917	cm²/m	V _{Rd1,y}	9,70	kN/nerv
A _{s,min,x}	0,49	cm²/nerv	A _{s,min,y}	0,49	cm²/nerv	A _{forma}	1,934	m²/m²			
A _{s,max,x}	19,36	cm²/nerv	A _{s,max,y}	19,36	cm²/nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 33 – Planilha de cálculo laje tradicional: 7,5 x 7,5m

Laje nervurada - 7,5 x 7,5 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l _k	750	cm	α	4,67	-	d	18,63	cm	c	2,50	cm
l _y	750	cm	μ _x	4,41	-	a _x	60,0	cm	a _y	60,0	cm
λ	1,00	-	μ _y	4,41	-	b _{1,x}	30,0	cm	b _{1,y}	30,0	cm
b _w	8,0	cm	k _x	2,50	-	b _{fx}	68,0	cm	b _{fy}	68,0	cm
h _f	5,0	cm	k _y	2,50	-	ρconcreto	25	kN/m³	f _{ck}	25	MPa
h _n	18,0	cm	ψ ₂	1,50	-	Φadotado	12,50	mm	f _{yk}	50	kN/cm²
h	23,0	cm	ψ ₃	25	-						
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g ₁	2,65	kN/m²	q	2,50	kN/m²	E _{cs}	24150	MPa	CAA	II	-
g ₂	1,40	kN/m²				α _e	8,70	-	p _{CF}	3,43	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I _o	1,80E-04	m ⁴	p _{CR}	4,45	kN/m/nerv
ε	1,00	-	δ _{Hahn}	1,71	-	α	1,20	-	σ _{si}	239,44	MPa
M _{Sk,ELU,x}	16,25	kN.m/m	M _{Sk,ELU,y}	16,25	kN.m/m	f _{ct,m}	2,56	MPa	w _k	0,14	mm
M _{Sk,ELU,x}	18,94	kN.m/nerv	M _{Sk,ELU,y}	18,94	kN.m/nerv	M _r	3,24	kN.m/nerv	w _{k,lim}	0,30	mm
KMD	0,063	-	KMD	0,063	-	M _{Sk,CQP,x}	13,88	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,096	-	KX	0,096	-	a ₁	34,00	cm	q _x	12,28	kN/m
KZ	0,961	-	KZ	0,961	-	a ₂	29,62	cm	V _{Sd,x}	11,69	kN/nerv
x	1,79	cm	x	1,79	cm	a ₃	-551,58	cm	τ _{Sd,x}	784,68	kN/n²/nerv
A _{s,x}	3,41	cm²/nerv	A _{s,y}	3,41	cm²/nerv	α _l	3,62	cm	τ _{Rd}	320,62	kN/m²
A _{s,adot,x}	3,41	cm²/nerv	A _{s,adot,y}	3,41	cm²/nerv	I _{II}	7,74E-05	m ⁴	k	1,41	-
Verificação da Área de Armadura						I _m	7,87E-05	m ⁴	ρ _{1,x}	0,020	-
A _{s,min,x}	0,73	cm²/nerv	A _{s,min,y}	0,73	cm²/nerv	δ _{imed,CQP}	0,24	cm	V _{Rd1,x}	13,51	kN/nerv
y _{cg,x}	17,08	cm	y _{cg,y}	17,08	cm	δ _{fiss,CQP}	0,55	cm	q _y	12,28	kN/m
I _{o,x}	17974	cm4	I _{o,y}	17974	cm4	α _f	1,323	-	V _{Sd,y}	11,69	kN/nerv
y _{t,x}	17,08	cm	y _{t,y}	17,08	cm	δ _{total,∞}	1,28	cm	τ _{Sd,y}	784,68	kN/n²/nerv
M _{d,min,x}	2,81	kN.m/nerv	M _{d,min,y}	2,81	kN.m/nerv	δ _{limCQP}	3,00	cm	τ _{Rd}	320,62	kN/m²
KMD	0,005	-	KMD	0,005	-	Consumo de materiais			k	1,41	-
KX	0,007	-	KX	0,007	-	V _{concreto}	0,106	m³/m²	ρ _{1,y}	0,020	-
KZ	0,997	-	KZ	0,997	-	A _s	10,017	cm²/m	V _{Rd1,y}	13,51	kN/nerv
A _{s,min,x}	0,49	cm²/nerv	A _{s,min,y}	0,49	cm²/nerv	A _{forma}	1,934	m²/m²			
A _{s,max,x}	19,36	cm²/nerv	A _{s,max,y}	19,36	cm²/nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 34 – Planilha de cálculo laje tradicional: 7,5 x 10,0m

Laje nervurada - 7,5 x 10,0 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l _k	750	cm	α	7,76	-	d	18,63	cm	c	2,50	cm
l _y	1000	cm	μ _x	6,93	-	a _x	70,0	cm	a _y	70,0	cm
λ	1,35	-	μ _y	4,37	-	b _{1,x}	35,0	cm	b _{1,y}	35,0	cm
b _w	12,0	cm	k _x	3,15	-	b _{fx}	82,0	cm	b _{fy}	82,0	cm
h _f	5,0	cm	k _y	2,50	-	ρ _{concreto}	25	kN/m³	f _{ck}	25	MPa
h _n	18,0	cm	ψ ₂	1,36	-	Φ _{adotado}	12,50	mm	f _{yk}	50	kN/cm²
h	23,0	cm	ψ ₃	25	-						
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g ₁	2,78	kN/m²	q	2,50	kN/m²	E _{cs}	24150	MPa	CAA	II	-
g ₂	1,40	kN/m²				α _e	8,70	-	p _{CF}	4,24	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I _o	2,54E-04	m ⁴	p _{CR}	5,47	kN/m/nerv
ε	0,74	-	δ _{Hahn}	1,54	-	α	1,20	-	σ _{si}	240,77	MPa
M _{Sk,ELU,x}	26,02	kN.m/m	M _{Sk,ELU,y}	16,41	kN.m/m	f _{ct,m}	2,56	MPa	w _k	0,14	mm
M _{Sk,ELU,x}	32,90	kN.m/nerv	M _{Sk,ELU,y}	20,75	kN.m/nerv	M _r	4,73	kN.m/nerv	w _{k,lim}	0,30	mm
KMD	0,091	-	KMD	0,057	-	M _{Sk,CQP,x}	24,27	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,141	-	KX	0,087	-	a ₁	41,00	cm	q _x	15,77	kN/m
KZ	0,943	-	KZ	0,965	-	a ₂	52,42	cm	V _{sd,x}	18,10	kN/nerv
x	2,63	cm	x	1,62	cm	a ₃	-976,34	cm	τ _{sd,x}	810,00	kN/m²/nerv
A _{s,x}	6,03	cm²/nerv	A _{s,y}	3,72	cm²/nerv	α _l	4,28	cm	τ _{Rd}	320,62	kN/m²
A _{s,adot,x}	6,03	cm²/nerv	A _{s,adot,y}	3,72	cm²/nerv	I _{II}	1,29E-04	m ⁴	k	1,41	-
Verificação da Área de Armadura						I _m	1,30E-04	m ⁴	ρ _{1,x}	0,020	-
A _{s,min,x}	0,94	cm²/nerv	A _{s,min,y}	0,94	cm²/nerv	δ _{imed,CQP}	0,41	cm	V _{Rd1,x}	20,26	kN/nerv
y _{cg,x}	16,53	cm	y _{cg,y}	16,53	cm	δ _{fiss,CQP}	0,80	cm	q _y	12,52	kN/m
I _{o,x}	25396	cm ⁴	I _{o,y}	25396	cm ⁴	α _f	1,323	-	V _{sd,y}	14,37	kN/nerv
y _{t,x}	16,53	cm	y _{t,y}	16,53	cm	δ _{total,∞}	1,86	cm	τ _{sd,y}	642,86	kN/m²/nerv
M _{d,min,x}	4,10	kN.m/nerv	M _{d,min,y}	4,10	kN.m/nerv	δ _{limCQP}	3,00	cm	τ _{Rd}	320,62	kN/m²
KMD	0,006	-	KMD	0,006	-	Consumo de materiais			k	1,41	-
KX	0,008	-	KX	0,008	-	V _{concreto}	0,111	m³/m²	ρ _{1,y}	0,017	-
KZ	0,997	-	KZ	0,997	-	A _s	11,884	cm²/m	V _{Rd1,y}	18,89	kN/nerv
A _{s,min,x}	0,71	cm²/nerv	A _{s,min,y}	0,71	cm²/nerv	A _{fôrma}	1,750	m²/m²			
A _{s,max,x}	25,04	cm²/nerv	A _{s,max,y}	25,04	cm²/nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 35 – Planilha de cálculo laje tradicional: 10,0 x 10,0m

Laje nervurada - 10,0 x 10,0 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l _k	1000	cm	α	4,67	-	d	18,63	cm	c	2,50	cm
l _y	1000	cm	μ _x	4,41	-	a _x	70,0	cm	a _y	70,0	cm
λ	1,00	-	μ _y	4,41	-	b _{1,x}	35,0	cm	b _{1,y}	35,0	cm
b _w	12,0	cm	k _x	2,50	-	b _{fx}	82,0	cm	b _{fy}	82,0	cm
h _f	5,0	cm	k _y	2,50	-	ρ _{concreto}	25	kN/m³	f _{ck}	25	MPa
h _n	18,0	cm	ψ ₂	1,50	-	Φ _{adotado}	12,50	mm	f _{yk}	50	kN/cm²
h	23,0	cm	ψ ₃	25	-						
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g ₁	2,78	kN/m²	q	2,50	kN/m²	E _{cs}	24150	MPa	CAA	II	-
g ₂	1,40	kN/m²				α _e	8,70	-	PCF	4,24	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I _o	2,54E-04	m ⁴	p _{CR}	5,47	kN/m/nerv
ε	1,00	-	δ _{Hahn}	1,71	-	α	1,20	-	σ _{si}	240,77	MPa
M _{Sk,ELU,x}	29,44	kN.m/m	M _{Sk,ELU,y}	29,44	kN.m/m	f _{ct,m}	2,56	MPa	w _k	0,14	mm
M _{Sk,ELU,x}	41,38	kN.m/nerv	M _{Sk,ELU,y}	41,38	kN.m/nerv	M _r	4,73	kN.m/nerv	w _{k,lim}	0,30	mm
KMD	0,114	-	KMD	0,114	-	M _{Sk,CQP,x}	30,53	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,181	-	KX	0,181	-	a ₁	41,00	cm	q _x	16,69	kN/m
KZ	0,928	-	KZ	0,928	-	a ₂	67,06	cm	V _{Sd,x}	19,16	kN/nerv
x	3,37	cm	x	3,37	cm	a ₃	-1248,95	cm	τ _{Sd,x}	857,15	kN/n²/nerv
A _{s,x}	7,71	cm²/nerv	A _{s,y}	7,71	cm²/nerv	α _{II}	4,76	cm	τ _{Rd}	320,62	kN/m²
A _{s,adot,x}	7,71	cm²/nerv	A _{s,adot,y}	7,71	cm²/nerv	I _{II}	1,58E-04	m ⁴	k	1,41	-
Verificação da Área de Armadura						I _m	1,59E-04	m ⁴	ρ _{1,x}	0,020	-
A _{s,min,x}	0,94	cm²/nerv	A _{s,min,y}	0,94	cm²/nerv	δ _{imed,CQP}	0,78	cm	V _{Rd1,x}	20,26	kN/nerv
y _{cg,x}	16,53	cm	y _{cg,y}	16,53	cm	δ _{fiss,CQP}	1,25	cm	q _y	16,69	kN/m
I _{o,x}	25396	cm ⁴	I _{o,y}	25396	cm ⁴	α _f	1,323	-	V _{Sd,y}	19,16	kN/nerv
y _{t,x}	16,53	cm	y _{t,y}	16,53	cm	δ _{total,∞}	2,91	cm	τ _{Sd,y}	857,15	kN/n²/nerv
M _{d,min,x}	4,10	kN.m/nerv	M _{d,min,y}	4,10	kN.m/nerv	δ _{limCQP}	4,00	cm	τ _{Rd}	320,62	kN/m²
KMD	0,006	-	KMD	0,006	-	Consumo de materiais			k	1,41	-
KX	0,008	-	KX	0,008	-	V _{concreto}	0,111	m³/m²	ρ _{1,y}	0,020	-
KZ	0,997	-	KZ	0,997	-	A _s	18,809	cm²/m	V _{Rd1,y}	20,26	kN/nerv
A _{s,min,x}	0,71	cm²/nerv	A _{s,min,y}	0,71	cm²/nerv	A _{fôrma}	1,750	m²/m²			
A _{s,max,x}	25,04	cm²/nerv	A _{s,max,y}	25,04	cm²/nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

APÊNDICE C – Planilhas de cálculo laje *bubbledeck*

Figura 36 – Planilha de cálculo laje *bubbledeck*: 5,0 x 5,0m

Laje <i>bubbledeck</i> - 5,0 x 5,0 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l_x	500	cm	α	4,67	-	d	21,63	cm	c	2,50	cm
l_y	500	cm	μ_x	4,41	-	a_x	18,0	cm	a_y	18,0	cm
λ	1,00	-	μ_y	4,41	-	$b_{1,x}$	9,0	cm	$b_{1,y}$	9,0	cm
b_w	5,0	cm	k_x	2,50	-	b_{fx}	23,0	cm	b_{fy}	23,0	cm
h_f	4,0	cm	k_y	2,50	-	$\rho_{concreto}$	25	kN/m ³	f_{ck}	25	MPa
h_n	18,0	cm	ψ_2	1,50	-	$\Phi_{adotado}$	12,5	mm	f_{yk}	50	kN/cm ²
h	26,0	cm	ψ_3	25	-	$\Phi_{esferas}$	18,0	cm	$N_{esferas}$	400	unid.
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g_1	5,28	kN/m ²	q	2,50	kN/m ²	E_{cs}	24150	MPa	CAA	II	-
g_2	1,40	kN/m ²				α_e	8,70	-	p_{CF}	1,77	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I_o	2,49E-04	m ⁴	p_{CR}	2,11	kN/m/nerv
ε	1,00	-	δ_{Hahn}	1,71	-	α	1,30	-	σ_{si}	259,81	MPa
$M_{Sk,ELU,x}$	10,12	kN.m/m	$M_{Sk,ELU,y}$	10,12	kN.m/m	$f_{ct,m}$	2,56	MPa	w_k	0,17	mm
$M_{Sk,ELU,x}$	3,99	kN.m/nerv	$M_{Sk,ELU,y}$	3,99	kN.m/nerv	M_r	6,40	kN.m/nerv	$w_{k,lim}$	0,30	mm
KMD	0,029	-	KMD	0,029	-	$M_{Sk,CQP,x}$	3,23	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,044	-	KX	0,044	-	a_1	11,50	cm	q_x	11,47	kN/m
KZ	0,983	-	KZ	0,983	-	a_2	5,26	cm	$V_{sd,x}$	3,69	kN/nerv
x	0,94	cm	x	0,94	cm	a_3	-113,70	cm	$\tau_{sd,x}$	341,68	kN/m ² /nerv
$A_{s,x}$	0,60	cm ² /nerv	$A_{s,y}$	0,60	cm ² /nerv	χ_{II}	2,92	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
$A_{s,adot,x}$	0,77	cm ² /nerv	$A_{s,adot,y}$	0,77	cm ² /nerv	I_{III}	2,03E-05	m ⁴	k	1,38	-
Verificação da Área de Armadura						I_m	1,80E-03	m ⁴	$\rho_{1,x}$	0,006	-
$A_{s,min,x}$	0,27	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	0,27	cm ² /nerv	$\delta_{imed,CQP}$	0,05	cm	$V_{Rd1,x}$	6,83	kN/nerv
$y_{cg,x}$	13,00	cm	$y_{cg,y}$	13,00	cm	$\delta_{fiss,CQP}$	0,01	cm	q_y	11,47	kN/m
$I_{o,x}$	24939	cm ⁴	$I_{o,y}$	24939	cm ⁴	α_f	1,323	-	$V_{sd,y}$	3,69	kN/nerv
$y_{t,x}$	13,00	cm	$y_{t,y}$	13,00	cm	$\delta_{total,\infty}$	0,12	cm	$\tau_{sd,y}$	341,68	kN/m ² /nerv
$M_{d,min,x}$	5,12	kN.m/nerv	$M_{d,min,y}$	5,12	kN.m/nerv	$\delta_{lim,CQP}$	2,00	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
KMD	0,019	-	KMD	0,019	-	Consumo de materiais			k	1,38	-
KX	0,028	-	KX	0,028	-	$V_{concreto}$	0,211	m ³ /m ²	$\rho_{1,y}$	0,006	-
KZ	0,989	-	KZ	0,989	-	A_s	6,700	cm ² /m	$V_{Rd1,y}$	6,83	kN/nerv
$A_{s,min,x}$	0,77	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	0,77	cm ² /nerv	A_{forma}	2,924	m ² /m ²			
$A_{s,max,x}$	7,28	cm ² /nerv	$A_{s,max,y}$	7,28	cm ² /nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 37 – Planilha de cálculo laje *bubbledeck*: 5,0 x 7,5m

Laje <i>bubbledeck</i> - 5,0 x 7,5 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l_x	500	cm	α	8,87	-	d	21,63	cm	c	2,50	cm
l_y	750	cm	μ_x	7,86	-	a_x	18,0	cm	a_y	18,0	cm
λ	1,50	-	μ_y	4,25	-	$b_{1,x}$	9,0	cm	$b_{1,y}$	9,0	cm
b_w	5,0	cm	k_x	3,33	-	b_{fx}	23,0	cm	b_{fy}	23,0	cm
h_f	4,0	cm	k_y	2,50	-	$\rho_{concreto}$	25	kN/m ³	f_{ck}	25	MPa
h_n	18,0	cm	ψ_2	1,30	-	$\Phi_{adotado}$	12,5	mm	f_{yk}	50	kN/cm ²
h	26,0	cm	ψ_3	25	-	$\Phi_{esferas}$	18,0	cm	$N_{esferas}$	620	unid.
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g_1	5,24	kN/m ²	q	2,50	kN/m ²	E_{cs}	24150	MPa	CAA	II	-
g_2	1,40	kN/m ²				α_e	8,70	-	PCF	1,76	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I_o	2,49E-04	m ⁴	p_{CR}	2,10	kN/m/nerv
ε	0,67	-	δ_{Hahn}	1,45	-	α	1,30	-	σ_{si}	259,58	MPa
$M_{Sk,ELU,x}$	17,96	kN.m/m	$M_{Sk,ELU,y}$	9,71	kN.m/m	$f_{ct,m}$	2,56	MPa	w_k	0,17	mm
$M_{Sk,ELU,x}$	5,98	kN.m/nerv	$M_{Sk,ELU,y}$	3,23	kN.m/nerv	M_r	6,40	kN.m/nerv	$w_{k,lim}$	0,30	mm
KMD	0,044	-	KMD	0,024	-	$M_{Sk,CQP,x}$	4,83	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,066	-	KX	0,035	-	a_1	11,50	cm	q_x	15,21	kN/m
KZ	0,974	-	KZ	0,986	-	a_2	7,95	cm	$V_{sd,x}$	4,90	kN/nerv
x	1,42	cm	x	0,76	cm	a_3	-171,94	cm	$\tau_{sd,x}$	453,09	kN/m ² /nerv
$A_{s,x}$	0,91	cm ² /nerv	$A_{s,y}$	0,49	cm ² /nerv	χ_{II}	3,54	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
$A_{s,adot,x}$	0,91	cm ² /nerv	$A_{s,adot,y}$	0,77	cm ² /nerv	I_{II}	2,94E-05	m ⁴	k	1,38	-
Verificação da Área de Armadura						I_m	5,39E-04	m ⁴	$\rho_{1,x}$	0,008	-
$A_{s,min,x}$	0,27	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	0,27	cm ² /nerv	$\delta_{imed,CQP}$	0,10	cm	$V_{Rd1,x}$	7,38	kN/nerv
$y_{cg,x}$	13,00	cm	$y_{cg,y}$	13,00	cm	$\delta_{fiss,CQP}$	0,04	cm	q_y	11,42	kN/m
$I_{o,x}$	24939	cm ⁴	$I_{o,y}$	24939	cm ⁴	α_f	1,323	-	$V_{sd,y}$	3,68	kN/nerv
$y_{t,x}$	13,00	cm	$y_{t,y}$	13,00	cm	$\delta_{total,\infty}$	0,22	cm	$\tau_{sd,y}$	340,16	kN/m ² /nerv
$M_{d,min,x}$	5,12	kN.m/nerv	$M_{d,min,y}$	5,12	kN.m/nerv	$\delta_{lim,CQP}$	2,00	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
KMD	0,019	-	KMD	0,019	-	Consumo de materiais			k	1,38	-
KX	0,028	-	KX	0,028	-	$V_{concreto}$	0,210	m ³ /m ²	$\rho_{1,y}$	0,005	-
KZ	0,989	-	KZ	0,989	-	A_s	7,326	cm ² /m	$V_{Rd1,y}$	6,62	kN/nerv
$A_{s,min,x}$	0,77	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	0,77	cm ² /nerv	A_{forma}	2,924	m ² /m ²			
$A_{s,max,x}$	7,28	cm ² /nerv	$A_{s,max,y}$	7,28	cm ² /nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 38 – Planilha de cálculo laje *bubbledeck*: 5,0 x 10,0m

Laje <i>bubbledeck</i> - 5,0 x 10,0 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l_x	500	cm	α	11,68	-	d	21,63	cm	c	2,50	cm
l_y	1000	cm	μ_x	10	-	a_x	18,0	cm	a_y	18,0	cm
λ	2,00	-	μ_y	3,64	-	$b_{1,x}$	9,0	cm	$b_{1,y}$	9,0	cm
b_w	5,0	cm	k_x	3,75	-	b_{fx}	23,0	cm	b_{fy}	23,0	cm
h_f	4,0	cm	k_y	2,50	-	$\rho_{concreto}$	25	kN/m ³	f_{ck}	25	MPa
h_n	18,0	cm	ψ_2	1,10	-	$\Phi_{adotado}$	12,5	mm	f_{yk}	50	kN/cm ²
h	26,0	cm	ψ_3	25	-	$\Phi_{esferas}$	18,0	cm	$N_{esferas}$	840	unid.
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g_1	5,22	kN/m ²	q	2,50	kN/m ²	E_{cs}	24150	MPa	CAA	II	-
g_2	1,40	kN/m ²				α_e	8,70	-	PCF	1,75	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I_o	2,49E-04	m ⁴	p_{CR}	2,10	kN/m/nerv
ε	0,50	-	δ_{Hahn}	1,24	-	α	1,30	-	σ_{si}	259,47	MPa
$M_{Sk,ELU,x}$	22,79	kN.m/m	$M_{Sk,ELU,y}$	8,30	kN.m/m	$f_{ct,m}$	2,56	MPa	w_k	0,17	mm
$M_{Sk,ELU,x}$	6,52	kN.m/nerv	$M_{Sk,ELU,y}$	2,37	kN.m/nerv	M_r	6,40	kN.m/nerv	$w_{k,lim}$	0,30	mm
KMD	0,048	-	KMD	0,017	-	$M_{Sk,CQP,x}$	5,27	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,072	-	KX	0,026	-	a_1	11,50	cm	q_x	17,10	kN/m
KZ	0,971	-	KZ	0,990	-	a_2	8,69	cm	$V_{sd,x}$	5,50	kN/nerv
x	1,56	cm	x	0,56	cm	a_3	-188,01	cm	$\tau_{sd,x}$	509,10	kN/m ² /nerv
$A_{s,x}$	1,00	cm ² /nerv	$A_{s,y}$	0,36	cm ² /nerv	χ_{II}	3,68	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
$A_{s,adot,x}$	1,00	cm ² /nerv	$A_{s,adot,y}$	0,77	cm ² /nerv	I_{II}	3,18E-05	m ⁴	k	1,38	-
Verificação da Área de Armadura						I_m	4,21E-04	m ⁴	$\rho_{1,x}$	0,009	-
$A_{s,min,x}$	0,27	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	0,27	cm ² /nerv	$\delta_{imed,CQP}$	0,13	cm	$V_{Rd1,x}$	7,53	kN/nerv
$y_{cg,x}$	13,00	cm	$y_{cg,y}$	13,00	cm	$\delta_{fiss,CQP}$	0,08	cm	q_y	11,40	kN/m
$I_{o,x}$	24939	cm ⁴	$I_{o,y}$	24939	cm ⁴	α_f	1,323	-	$V_{sd,y}$	3,67	kN/nerv
$y_{t,x}$	13,00	cm	$y_{t,y}$	13,00	cm	$\delta_{total,\infty}$	0,29	cm	$\tau_{sd,y}$	339,40	kN/m ² /nerv
$M_{d,min,x}$	5,12	kN.m/nerv	$M_{d,min,y}$	5,12	kN.m/nerv	$\delta_{lim,CQP}$	2,00	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
KMD	0,019	-	KMD	0,019	-	Consumo de materiais			k	1,38	-
KX	0,028	-	KX	0,028	-	$V_{concreto}$	0,209	m ³ /m ²	$\rho_{1,y}$	0,003	-
KZ	0,989	-	KZ	0,989	-	A_s	7,697	cm ² /m	$V_{Rd1,y}$	6,39	kN/nerv
$A_{s,min,x}$	0,77	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	0,77	cm ² /nerv	A_{forma}	2,924	m ² /m ²			
$A_{s,max,x}$	7,28	cm ² /nerv	$A_{s,max,y}$	7,28	cm ² /nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 39 – Planilha de cálculo laje *bubbledeck*: 7,5 x 7,5m

Laje <i>bubbledeck</i> - 7,5 x 7,5 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l_x	750	cm	α	4,67	-	d	21,63	cm	c	2,50	cm
l_y	750	cm	μ_x	4,41	-	a_x	18,0	cm	a_y	18,0	cm
λ	1,00	-	μ_y	4,41	-	$b_{1,x}$	9,0	cm	$b_{1,y}$	9,0	cm
b_w	5,0	cm	k_x	2,50	-	b_{fx}	23,0	cm	b_{fy}	23,0	cm
h_f	5,0	cm	k_y	2,50	-	$\rho_{concreto}$	25	kN/m ³	f_{ck}	25	MPa
h_n	16,0	cm	ψ_2	1,50	-	$\Phi_{adotado}$	12,5	mm	f_{yk}	50	kN/cm ²
h	26,0	cm	ψ_3	25	-	$\Phi_{esferas}$	18,0	cm	$N_{esferas}$	961	unid.
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g_1	5,20	kN/m ²	q	2,50	kN/m ²	E_{cs}	24150	MPa	CAA	II	-
g_2	1,40	kN/m ²				α_e	8,70	-	PCF	1,75	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I_o	2,75E-04	m ⁴	p_{CR}	2,09	kN/m/nerv
ε	1,00	-	δ_{Hahn}	1,71	-	α	1,30	-	σ_{si}	259,34	MPa
$M_{Sk,ELU,x}$	22,56	kN.m/m	$M_{Sk,ELU,y}$	22,56	kN.m/m	$f_{ct,m}$	2,56	MPa	w_k	0,17	mm
$M_{Sk,ELU,x}$	8,90	kN.m/nerv	$M_{Sk,ELU,y}$	8,90	kN.m/nerv	M_r	7,06	kN.m/nerv	$w_{k,lim}$	0,30	mm
KMD	0,065	-	KMD	0,065	-	$M_{Sk,CQP,x}$	7,18	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,099	-	KX	0,099	-	a_1	11,50	cm	q_x	17,05	kN/m
KZ	0,960	-	KZ	0,960	-	a_2	12,00	cm	$V_{sd,x}$	5,49	kN/nerv
x	2,15	cm	x	2,15	cm	a_3	-259,40	cm	$\tau_{sd,x}$	507,89	kN/m ² /nerv
$A_{s,x}$	1,38	cm ² /nerv	$A_{s,y}$	1,38	cm ² /nerv	χ_{II}	4,26	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
$A_{s,adot,x}$	1,38	cm ² /nerv	$A_{s,adot,y}$	1,38	cm ² /nerv	I_{II}	4,21E-05	m ⁴	k	1,38	-
Verificação da Área de Armadura						I_m	2,64E-04	m ⁴	$\rho_{1,x}$	0,013	-
$A_{s,min,x}$	0,29	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	0,29	cm ² /nerv	$\delta_{imed,CQP}$	0,26	cm	$V_{Rd1,x}$	8,20	kN/nerv
$y_{cg,x}$	13,00	cm	$y_{cg,y}$	13,00	cm	$\delta_{fiss,CQP}$	0,27	cm	q_y	17,05	kN/m
$I_{o,x}$	27543	cm ⁴	$I_{o,y}$	27543	cm ⁴	α_f	1,323	-	$V_{sd,y}$	5,49	kN/nerv
$y_{t,x}$	13,00	cm	$y_{t,y}$	13,00	cm	$\delta_{total,\infty}$	0,62	cm	$\tau_{sd,y}$	507,89	kN/m ² /nerv
$M_{d,min,x}$	5,65	kN.m/nerv	$M_{d,min,y}$	5,65	kN.m/nerv	$\delta_{lim,CQP}$	3,00	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
KMD	0,021	-	KMD	0,021	-	Consumo de materiais			k	1,38	-
KX	0,031	-	KX	0,031	-	$V_{concreto}$	0,208	m ³ /m ²	$\rho_{1,y}$	0,013	-
KZ	0,988	-	KZ	0,988	-	A_s	11,995	cm ² /m	$V_{Rd1,y}$	8,20	kN/nerv
$A_{s,min,x}$	0,85	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	0,85	cm ² /nerv	A_{forma}	2,924	m ² /m ²			
$A_{s,max,x}$	7,8	cm ² /nerv	$A_{s,max,y}$	7,8	cm ² /nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 40 – Planilha de cálculo laje *bubbledeck*: 7,5 x 10,0m

Laje <i>bubbledeck</i> - 7,5 x 10,0 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l_x	750	cm	α	7,76	-	d	23,63	cm	c	2,50	cm
l_y	1000	cm	μ_x	6,93	-	a_x	18,0	cm	a_y	18,0	cm
λ	1,35	-	μ_y	4,37	-	$b_{1,x}$	9,0	cm	$b_{1,y}$	9,0	cm
b_w	5,0	cm	k_x	3,15	-	b_{fx}	23,0	cm	b_{fy}	23,0	cm
h_f	6,0	cm	k_y	2,50	-	$\rho_{concreto}$	25	kN/m ³	f_{ck}	25	MPa
h_n	16,0	cm	ψ_2	1,36	-	$\Phi_{adotado}$	12,5	mm	f_{yk}	50	kN/cm ²
h	28,0	cm	ψ_3	25	-	$\Phi_{esferas}$	18,0	cm	$N_{esferas}$	1302	unid.
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g_1	5,67	kN/m ²	q	2,50	kN/m ²	E_{cs}	24150	MPa	CAA	II	-
g_2	1,40	kN/m ²				α_e	8,70	-	PCF	1,86	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I_o	3,59E-04	m ⁴	p_{CR}	2,20	kN/m/nerv
ε	0,74	-	δ_{Hahn}	1,54	-	α	1,30	-	σ_{si}	261,91	MPa
$M_{Sk,ELU,x}$	37,32	kN.m/m	$M_{Sk,ELU,y}$	23,54	kN.m/m	$f_{ct,m}$	2,56	MPa	w_k	0,17	mm
$M_{Sk,ELU,x}$	13,24	kN.m/nerv	$M_{Sk,ELU,y}$	8,35	kN.m/nerv	M_r	8,56	kN.m/nerv	$w_{k,lim}$	0,30	mm
KMD	0,081	-	KMD	0,051	-	$M_{Sk,CQP,x}$	10,82	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,125	-	KX	0,077	-	a_1	11,50	cm	q_x	22,62	kN/m
KZ	0,950	-	KZ	0,969	-	a_2	16,51	cm	$V_{sd,x}$	7,28	kN/nerv
x	2,96	cm	x	1,83	cm	a_3	-390,14	cm	$\tau_{sd,x}$	616,61	kN/m ² /nerv
$A_{s,x}$	1,90	cm ² /nerv	$A_{s,y}$	1,17	cm ² /nerv	χ_{II}	5,15	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
$A_{s,adot,x}$	1,90	cm ² /nerv	$A_{s,adot,y}$	1,17	cm ² /nerv	I_{II}	6,68E-05	m ⁴	k	1,36	-
Verificação da Área de Armadura						I_m	2,12E-04	m ⁴	$\rho_{1,x}$	0,016	-
$A_{s,min,x}$	0,33	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	0,33	cm ² /nerv	$\delta_{imed,CQP}$	0,36	cm	$V_{Rd1,x}$	9,52	kN/nerv
$y_{cg,x}$	14,00	cm	$y_{cg,y}$	14,00	cm	$\delta_{fiss,CQP}$	0,62	cm	q_y	17,95	kN/m
$I_{o,x}$	35931	cm ⁴	$I_{o,y}$	35931	cm ⁴	α_f	1,323	-	$V_{sd,y}$	5,78	kN/nerv
$y_{t,x}$	14,00	cm	$y_{t,y}$	14,00	cm	$\delta_{total,\infty}$	1,43	cm	$\tau_{sd,y}$	489,37	kN/m ² /nerv
$M_{d,min,x}$	6,85	kN.m/nerv	$M_{d,min,y}$	6,85	kN.m/nerv	$\delta_{lim,CQP}$	3,00	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
KMD	0,021	-	KMD	0,021	-	Consumo de materiais			k	1,36	-
KX	0,031	-	KX	0,031	-	$V_{concreto}$	0,227	m ³ /m ²	$\rho_{1,y}$	0,010	-
KZ	0,988	-	KZ	0,988	-	A_s	13,361	cm ² /m	$V_{Rd1,y}$	8,25	kN/nerv
$A_{s,min,x}$	0,94	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	0,94	cm ² /nerv	A_{forma}	2,924	m ² /m ²			
$A_{s,max,x}$	8,72	cm ² /nerv	$A_{s,max,y}$	8,72	cm ² /nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 41 – Planilha de cálculo laje *bubbledeck*: 10,0 x 10,0m

Laje <i>bubbledeck</i> - 10,0 x 10,0 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l_x	1000	cm	α	4,67	-	d	25,63	cm	c	2,50	cm
l_y	1000	cm	μ_x	4,41	-	a_x	18,0	cm	a_y	18,0	cm
λ	1,00	-	μ_y	4,41	-	$b_{1,x}$	9,0	cm	$b_{1,y}$	9,0	cm
b_w	5,0	cm	k_x	2,50	-	b_{fx}	23,0	cm	b_{fy}	23,0	cm
h_f	6,0	cm	k_y	2,50	-	$\rho_{concreto}$	25	kN/m ³	f_{ck}	25	MPa
h_n	18,0	cm	ψ_2	1,50	-	$\Phi_{adotado}$	12,5	mm	f_{yk}	50	kN/cm ²
h	30,0	cm	ψ_3	25	-	$\Phi_{esferas}$	18,0	cm	$N_{esferas}$	1764	unid.
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g_1	6,15	kN/m ²	q	2,50	kN/m ²	E_{cs}	24150	MPa	CAA	II	-
g_2	1,40	kN/m ²				α_e	8,70	-	pcf	1,97	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I_o	4,30E-04	m ⁴	p_{CR}	2,31	kN/m/nerv
ε	1,00	-	δ_{Hahn}	1,71	-	α	1,30	-	σ_{si}	264,22	MPa
$M_{Sk,ELU,x}$	44,34	kN.m/m	$M_{Sk,ELU,y}$	44,34	kN.m/m	$f_{ct,m}$	2,56	MPa	w_k	0,17	mm
$M_{Sk,ELU,x}$	17,48	kN.m/nerv	$M_{Sk,ELU,y}$	17,48	kN.m/nerv	M_r	9,56	kN.m/nerv	$w_{k,lim}$	0,30	mm
KMD	0,091	-	KMD	0,091	-	$M_{Sk,CQP,x}$	14,44	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,141	-	KX	0,141	-	a_1	11,50	cm	q_x	25,13	kN/m
KZ	0,943	-	KZ	0,943	-	a_2	20,25	cm	$V_{sd,x}$	8,09	kN/nerv
x	3,62	cm	x	3,62	cm	a_3	-518,82	cm	$\tau_{sd,x}$	631,64	kN/m ² /nerv
$A_{s,x}$	2,33	cm ² /nerv	$A_{s,y}$	2,33	cm ² /nerv	χ_{II}	5,89	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
$A_{s,adot,x}$	2,33	cm ² /nerv	$A_{s,adot,y}$	2,33	cm ² /nerv	I_{II}	9,45E-05	m ⁴	k	1,34	-
Verificação da Área de Armadura						I_m	1,92E-04	m ⁴	$\rho_{1,x}$	0,018	-
$A_{s,min,x}$	0,34	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	0,34	cm ² /nerv	$\delta_{imed,CQP}$	0,59	cm	$V_{Rd1,x}$	10,64	kN/nerv
$y_{cg,x}$	15,00	cm	$y_{cg,y}$	15,00	cm	$\delta_{fiss,CQP}$	1,33	cm	q_y	25,13	kN/m
$I_{o,x}$	43002	cm ⁴	$I_{o,y}$	43002	cm ⁴	α_f	1,323	-	$V_{sd,y}$	8,09	kN/nerv
$y_{t,x}$	15,00	cm	$y_{t,y}$	15,00	cm	$\delta_{total,\infty}$	3,10	cm	$\tau_{sd,y}$	631,64	kN/m ² /nerv
$M_{d,min,x}$	7,65	kN.m/nerv	$M_{d,min,y}$	7,65	kN.m/nerv	$\delta_{lim,CQP}$	4,00	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
KMD	0,020	-	KMD	0,020	-	Consumo de materiais			k	1,34	-
KX	0,030	-	KX	0,030	-	$V_{concreto}$	0,246	m ³ /m ²	$\rho_{1,y}$	0,018	-
KZ	0,988	-	KZ	0,988	-	A_s	20,246	cm ² /m	$V_{Rd1,y}$	10,64	kN/nerv
$A_{s,min,x}$	0,97	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	0,97	cm ² /nerv	A_{forma}	2,924	m ² /m ²			
$A_{s,max,x}$	9,12	cm ² /nerv	$A_{s,max,y}$	9,12	cm ² /nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

APÊNDICE D – Planilhas de cálculo laje *holedeck*

Figura 42 – Planilha de cálculo laje *holedeck*: 5,0 x 5,0m

Laje <i>holedeck</i> - 5,0 x 5,0 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l_x	500	cm	α	4,67	-	d	14,13	cm	c	2,5	cm
l_y	500	cm	μ_x	4,41	-	a_x	65,0	cm	a_y	65,0	cm
λ	1,00	-	μ_y	4,41	-	$b_{1,x}$	32,5	cm	$b_{1,y}$	32,5	cm
b_w	15,0	cm	k_x	2,50	-	b_{fx}	80,0	cm	b_{fy}	80,0	cm
h_f	5,0	cm	k_y	2,50	-	$\rho_{concreto}$	25	kN/m ³	f_{ck}	25	MPa
h_n	30,0	cm	ψ_2	1,50	-	$\Phi_{adotado}$	12,5	mm	f_{yd}	50	kN/cm ²
h	35,0	cm	ψ_3	25	-	$A_{abertura}$	500,7	cm ²	$N_{abertura}$	60	unid.
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g_1	3,55	kN/m ²	q	2,50	kN/m ²	E_{cs}	24150,00	MPa	CAA	II	-
g_2	1,40	kN/m ²				α_e	8,70	-	pcf	4,76	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I_o	9,94E-04	m ⁴	p_{CR}	5,96	kN/m/nerv
ε	1,00	-	δ_{Hahn}	1,71	-	α	1,20	-	σ_{si}	248,03	MPa
$M_{Sk,ELU,x}$	8,21	kN.m/m	$M_{Sk,ELU,y}$	8,21	kN.m/m	$f_{ct,m}$	2,56	MPa	w_k	0,15	mm
$M_{Sk,ELU,x}$	11,26	kN.m/nerv	$M_{Sk,ELU,y}$	11,26	kN.m/nerv	M_r	13,17	kN.m/nerv	$w_{k,lim}$	0,30	mm
KMD	0,055	-	KMD	0,055	-	$M_{Sk,CQP,x}$	8,62	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,084	-	KX	0,084	-	a_1	40,00	cm	q_x	9,31	kN/m
KZ	0,966	-	KZ	0,966	-	a_2	23,11	cm	$V_{sd,x}$	10,43	kN/nerv
x	1,19	cm	x	1,19	cm	a_3	-326,40	cm	$\tau_{sd,x}$	492,27	kN/m ² /nerv
$A_{s,x}$	2,66	cm ² /nerv	$A_{s,y}$	2,66	cm ² /nerv	χ_I	2,58	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
$A_{s,adot,x}$	2,66	cm ² /nerv	$A_{s,adot,y}$	2,66	cm ² /nerv	I_{II}	3,54E-05	m ⁴	k	1,46	-
Verificação da Área de Armadura						I_m	3,46E-03	m ⁴	$\rho_{1,x}$	0,013	-
$A_{s,min,x}$	1,28	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	1,28	cm ² /nerv	$\delta_{imed,CQP}$	0,02	cm	$V_{Rd1,x}$	16,86	kN/nerv
$y_{cg,x}$	23,24	cm	$y_{cg,y}$	23,24	cm	$\delta_{fiss,CQP}$	0,00	cm	q_y	9,31	kN/m
$I_{o,x}$	99436	cm ⁴	$I_{o,y}$	99436	cm ⁴	α_f	1,323	-	$V_{sd,y}$	10,43	kN/nerv
$y_{t,x}$	23,24	cm	$y_{t,y}$	23,24	cm	$\delta_{total,\infty}$	0,04	cm	$\tau_{sd,y}$	492,27	kN/m ² /nerv
$M_{d,min,x}$	11,42	kN.m/nerv	$M_{d,min,y}$	11,42	kN.m/nerv	$\delta_{lim,CQP}$	2,00	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
KMD	0,028	-	KMD	0,028	-	Consumo de materiais			k	1,46	-
KX	0,042	-	KX	0,042	-	$V_{concreto}$	0,142	m ³ /m ²	$\rho_{1,y}$	0,013	-
KZ	0,983	-	KZ	0,983	-	A_s	6,643	cm ² /m	$V_{Rd1,y}$	16,86	kN/nerv
$A_{s,min,x}$	2,65	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	2,65	cm ² /nerv	A_{forma}	2,591	m ² /m ²			
$A_{s,max,x}$	34,00	cm ² /nerv	$A_{s,max,y}$	34,00	cm ² /nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 43 – Planilha de cálculo laje *holedeck*: 5,0 x 7,5m

Laje <i>holedeck</i> - 5,0 x 7,5 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l_x	500	cm	α	8,87	-	d	14,13	cm	c	2,5	cm
l_y	750	cm	μ_x	7,86	-	a_x	65,0	cm	a_y	65,0	cm
λ	1,50	-	μ_y	4,25	-	$b_{1,x}$	32,5	cm	$b_{1,y}$	32,5	cm
b_w	15,0	cm	k_x	3,33	-	b_{fx}	80,0	cm	b_{fy}	80,0	cm
h_f	5,0	cm	k_y	2,50	-	$\rho_{concreto}$	25	kN/m ³	f_{ck}	25	MPa
h_n	30,0	cm	ψ_2	1,30	-	$\Phi_{adotado}$	12,5	mm	f_{yd}	50	kN/cm ²
h	35,0	cm	ψ_3	25	-	$A_{abertura}$	500,7	cm ²	$N_{abertura}$	102	unid.
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g_1	3,55	kN/m ²	q	2,50	kN/m ²	E_{cs}	24150,00	MPa	CAA	II	-
g_2	1,40	kN/m ²				α_e	8,70	-	p_{CF}	4,76	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I_o	9,94E-04	m ⁴	p_{CR}	5,96	kN/m/nerv
ε	0,67	-	δ_{Hahn}	1,45	-	α	1,20	-	σ_{si}	248,03	MPa
$M_{Sk,ELU,x}$	14,64	kN.m/m	$M_{Sk,ELU,y}$	7,92	kN.m/m	$f_{ct,m}$	2,56	MPa	w_k	0,15	mm
$M_{Sk,ELU,x}$	16,96	kN.m/nerv	$M_{Sk,ELU,y}$	9,17	kN.m/nerv	M_r	13,17	kN.m/nerv	$w_{k,lim}$	0,30	mm
KMD	0,083	-	KMD	0,045	-	$M_{Sk,CQP,x}$	12,97	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,129	-	KX	0,068	-	a_1	40,00	cm	q_x	12,40	kN/m
KZ	0,948	-	KZ	0,973	-	a_2	35,44	cm	$V_{sd,x}$	13,89	kN/nerv
x	1,82	cm	x	0,96	cm	a_3	-500,61	cm	$\tau_{sd,x}$	655,71	kN/m ² /nerv
$A_{s,x}$	4,08	cm ² /nerv	$A_{s,y}$	2,15	cm ² /nerv	x_{II}	3,12	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
$A_{s,adot,x}$	4,08	cm ² /nerv	$A_{s,adot,y}$	2,65	cm ² /nerv	I_{II}	5,10E-05	m ⁴	k	1,46	-
Verificação da Área de Armadura						I_m	1,04E-03	m ⁴	$\rho_{1,x}$	0,019	-
$A_{s,min,x}$	1,28	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	1,28	cm ² /nerv	$\delta_{imed,CQP}$	0,03	cm	$V_{Rd1,x}$	19,52	kN/nerv
$y_{cg,x}$	23,24	cm	$y_{cg,y}$	23,24	cm	$\delta_{fiss,CQP}$	0,03	cm	q_y	9,31	kN/m
$I_{o,x}$	99436	cm ⁴	$I_{o,y}$	99436	cm ⁴	α_f	1,323	-	$V_{sd,y}$	10,43	kN/nerv
$y_{t,x}$	23,24	cm	$y_{t,y}$	23,24	cm	$\delta_{total,\infty}$	0,07	cm	$\tau_{sd,y}$	492,27	kN/m ² /nerv
$M_{d,min,x}$	11,42	kN.m/nerv	$M_{d,min,y}$	11,42	kN.m/nerv	$\delta_{lim,CQP}$	2,00	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
KMD	0,028	-	KMD	0,028	-	Consumo de materiais			k	1,46	-
KX	0,042	-	KX	0,042	-	$V_{concreto}$	0,142	m ³ /m ²	$\rho_{1,y}$	0,010	-
KZ	0,983	-	KZ	0,983	-	A_s	8,403	cm ² /m	$V_{Rd1,y}$	15,91	kN/nerv
$A_{s,min,x}$	2,65	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	2,65	cm ² /nerv	A_{forma}	2,591	m ² /m ²			
$A_{s,max,x}$	34,00	cm ² /nerv	$A_{s,max,y}$	34,00	cm ² /nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 44 – Planilha de cálculo laje *holedeck*: 5,0 x 10,0m

Laje <i>holedeck</i> - 5,0 x 10,0 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l_x	500	cm	α	11,68	-	d	14,13	cm	c	2,5	cm
l_y	1000	cm	μ_x	10	-	a_x	65,0	cm	a_y	65,0	cm
λ	2,00	-	μ_y	3,64	-	$b_{1,x}$	32,5	cm	$b_{1,y}$	32,5	cm
b_w	15,0	cm	k_x	3,75	-	b_{fx}	80,0	cm	b_{fy}	80,0	cm
h_f	5,0	cm	k_y	2,50	-	$\rho_{concreto}$	25	kN/m ³	f_{ck}	25	MPa
h_n	30,0	cm	ψ_2	1,10	-	$\Phi_{adotado}$	12,5	mm	f_{yd}	50	kN/cm ²
h	35,0	cm	ψ_3	25	-	$A_{abertura}$	500,7	cm ²	$N_{abertura}$	162	unid.
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g_1	3,55	kN/m ²	q	2,50	kN/m ²	E_{cs}	24150,00	MPa	CAA	II	-
g_2	1,40	kN/m ²				α_e	8,70	-	p_{CF}	4,76	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I_o	9,94E-04	m ⁴	p_{CR}	5,96	kN/m/nerv
ε	0,50	-	δ_{Hahn}	1,24	-	α	1,20	-	σ_{si}	248,03	MPa
$M_{Sk,ELU,x}$	18,63	kN.m/m	$M_{Sk,ELU,y}$	6,78	kN.m/m	$f_{ct,m}$	2,56	MPa	w_k	0,15	mm
$M_{Sk,ELU,x}$	18,53	kN.m/nerv	$M_{Sk,ELU,y}$	6,75	kN.m/nerv	M_r	13,17	kN.m/nerv	$w_{k,lim}$	0,30	mm
KMD	0,091	-	KMD	0,033	-	$M_{Sk,CQP,x}$	14,18	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,142	-	KX	0,050	-	a_1	40,00	cm	q_x	13,97	kN/m
KZ	0,943	-	KZ	0,980	-	a_2	38,95	cm	$V_{sd,x}$	15,65	kN/nerv
x	2,00	cm	x	0,70	cm	a_3	-550,19	cm	$\tau_{sd,x}$	738,41	kN/m ² /nerv
$A_{s,x}$	4,48	cm ² /nerv	$A_{s,y}$	1,57	cm ² /nerv	x_{II}	3,25	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
$A_{s,adot,x}$	4,48	cm ² /nerv	$A_{s,adot,y}$	2,65	cm ² /nerv	I_{II}	5,52E-05	m ⁴	k	1,46	-
Verificação da Área de Armadura						I_m	8,08E-04	m ⁴	$\rho_{1,x}$	0,020	-
$A_{s,min,x}$	1,28	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	1,28	cm ² /nerv	$\delta_{imed,CQP}$	0,04	cm	$V_{Rd1,x}$	19,82	kN/nerv
$y_{cg,x}$	23,24	cm	$y_{cg,y}$	23,24	cm	$\delta_{fiss,CQP}$	0,05	cm	q_y	9,31	kN/m
$I_{o,x}$	99436	cm ⁴	$I_{o,y}$	99436	cm ⁴	α_f	1,323	-	$V_{sd,y}$	10,43	kN/nerv
$y_{t,x}$	23,24	cm	$y_{t,y}$	23,24	cm	$\delta_{total,\infty}$	0,11	cm	$\tau_{sd,y}$	492,27	kN/m ² /nerv
$M_{d,min,x}$	11,42	kN.m/nerv	$M_{d,min,y}$	11,42	kN.m/nerv	$\delta_{lim,CQP}$	2,00	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
KMD	0,028	-	KMD	0,028	-	Consumo de materiais			k	1,46	-
KX	0,042	-	KX	0,042	-	$V_{concreto}$	0,142	m ³ /m ²	$\rho_{1,y}$	0,007	-
KZ	0,983	-	KZ	0,983	-	A_s	8,908	cm ² /m	$V_{Rd1,y}$	14,83	kN/nerv
$A_{s,min,x}$	2,65	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	2,65	cm ² /nerv	A_{forma}	2,591	m ² /m ²			
$A_{s,max,x}$	34,00	cm ² /nerv	$A_{s,max,y}$	34,00	cm ² /nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 45 – Planilha de cálculo laje *holeddeck*: 7,5 x 7,5m

Laje <i>holeddeck</i> - 7,5 x 7,5 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l_x	750	cm	α	4,67	-	d	14,13	cm	c	2,5	cm
l_y	750	cm	μ_x	4,41	-	a_x	65,0	cm	a_y	65,0	cm
λ	1,00	-	μ_y	4,41	-	$b_{1,x}$	32,5	cm	$b_{1,y}$	32,5	cm
b_w	15,0	cm	k_x	2,50	-	b_{fx}	80,0	cm	b_{fy}	80,0	cm
h_f	5,0	cm	k_y	2,50	-	$\rho_{concreto}$	25	kN/m ³	f_{ck}	25	MPa
h_n	30,0	cm	ψ_2	1,50	-	$\Phi_{adotado}$	12,5	mm	f_{yd}	50	kN/cm ²
h	35,0	cm	ψ_3	25	-	$A_{abertura}$	500,7	cm ²	$N_{abertura}$	144	unid.
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g_1	3,55	kN/m ²	q	2,50	kN/m ²	E_{cs}	24150,00	MPa	CAA	II	-
g_2	1,40	kN/m ²				α_e	8,70	-	p_{CF}	4,76	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I_o	9,94E-04	m ⁴	p_{CR}	5,96	kN/m/nerv
ε	1,00	-	δ_{Hahn}	1,71	-	α	1,20	-	σ_{si}	248,03	MPa
$M_{Sk,ELU,x}$	18,48	kN.m/m	$M_{Sk,ELU,y}$	18,48	kN.m/m	$f_{ct,m}$	2,56	MPa	w_k	0,15	mm
$M_{Sk,ELU,x}$	25,34	kN.m/nerv	$M_{Sk,ELU,y}$	25,34	kN.m/nerv	M_r	13,17	kN.m/nerv	$w_{k,lim}$	0,30	mm
KMD	0,124	-	KMD	0,124	-	$M_{Sk,CQP,x}$	19,39	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,199	-	KX	0,199	-	a_1	40,00	cm	q_x	13,97	kN/m
KZ	0,920	-	KZ	0,920	-	a_2	54,58	cm	$V_{sd,x}$	15,65	kN/nerv
x	2,81	cm	x	2,81	cm	a_3	-771,00	cm	$\tau_{sd,x}$	738,41	kN/m ² /nerv
$A_{s,x}$	6,28	cm ² /nerv	$A_{s,y}$	6,28	cm ² /nerv	x_{II}	3,76	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
$A_{s,adot,x}$	6,28	cm ² /nerv	$A_{s,adot,y}$	6,28	cm ² /nerv	I_{II}	7,28E-05	m ⁴	k	1,46	-
Verificação da Área de Armadura						I_m	3,62E-04	m ⁴	$\rho_{1,x}$	0,020	-
$A_{s,min,x}$	1,28	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	1,28	cm ² /nerv	$\delta_{imed,CQP}$	0,08	cm	$V_{Rd1,x}$	19,82	kN/nerv
$y_{eg,x}$	23,24	cm	$y_{eg,y}$	23,24	cm	$\delta_{fiss,CQP}$	0,22	cm	q_y	13,97	kN/m
$I_{o,x}$	99436	cm ⁴	$I_{o,y}$	99436	cm ⁴	α_f	1,323	-	$V_{sd,y}$	15,65	kN/nerv
$y_{t,x}$	23,24	cm	$y_{t,y}$	23,24	cm	$\delta_{total,\infty}$	0,52	cm	$\tau_{sd,y}$	738,41	kN/m ² /nerv
$M_{d,min,x}$	11,42	kN.m/nerv	$M_{d,min,y}$	11,42	kN.m/nerv	$\delta_{lim,CQP}$	3,00	cm	τ_{Rd}	320,62	kN/m ²
KMD	0,028	-	KMD	0,028	-	Consumo de materiais			k	1,46	-
KX	0,042	-	KX	0,042	-	$V_{concreto}$	0,142	m ³ /m ²	$\rho_{1,y}$	0,020	-
KZ	0,983	-	KZ	0,983	-	A_s	15,693	cm ² /m	$V_{Rd1,y}$	19,82	kN/nerv
$A_{s,min,x}$	2,65	cm ² /nerv	$A_{s,min,y}$	2,65	cm ² /nerv	A_{forma}	2,591	m ² /m ²			
$A_{s,max,x}$	34,00	cm ² /nerv	$A_{s,max,y}$	34,00	cm ² /nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 46 – Planilha de cálculo laje *holedeck*: 7,5 x 10,0m

Laje <i>holedeck</i> - 7,5 x 10,0 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
l _k	750	cm	α	7,76	-	d	14,13	cm	c	2,5	cm
l _y	1000	cm	μ _x	6,93	-	a _x	65,0	cm	a _y	65,0	cm
λ	1,35	-	μ _y	4,37	-	b _{1,x}	32,5	cm	b _{1,y}	32,5	cm
b _w	15,0	cm	k _x	3,15	-	b _{fx}	80,0	cm	b _{fy}	80,0	cm
h _f	5,0	cm	k _y	2,50	-	ρ _{concreto}	25	kN/m³	f _{ck}	25	MPa
h _n	30,0	cm	ψ ₂	1,36	-	Φ _{adotado}	12,5	mm	f _{yd}	50	kN/cm²
h	35,0	cm	ψ ₃	25	-	A _{abertura}	500,7	cm²	N _{abertura}	204	unid.
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g ₁	3,55	kN/m²	q	2,50	kN/m²	E _{cs}	24150,00	MPa	CAA	II	-
g ₂	1,40	kN/m²				α _e	8,70	-	p _{CF}	4,76	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I _o	9,94E-04	m ⁴	p _{CR}	5,96	kN/m/nerv
ε	0,74	-	δ _{Hahn}	1,54	-	α	1,20	-	σ _{si}	248,03	MPa
M _{Sk,ELU,x}	29,04	kN.m/m	M _{Sk,ELU,y}	18,31	kN.m/m	f _{ct,m}	2,56	MPa	w _k	0,15	mm
M _{Sk,ELU,x}	35,82	kN.m/nerv	M _{Sk,ELU,y}	22,59	kN.m/nerv	M _r	13,17	kN.m/nerv	w _{k,lim}	0,30	mm
KMD	0,176	-	KMD	0,111	-	M _{Sk,CQP,x}	27,41	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,293	-	KX	0,175	-	a ₁	40,00	cm	q _x	17,60	kN/m
KZ	0,883	-	KZ	0,930	-	a ₂	80,44	cm	V _{sd,x}	19,71	kN/nerv
x	4,14	cm	x	2,48	cm	a ₃	-1136,25	cm	τ _{sd,x}	930,39	kN/m²/nerv
A _{s,x}	9,25	cm²/nerv	A _{s,y}	5,54	cm²/nerv	x _{II}	4,42	cm	τ _{Rd}	320,62	kN/m²
A _{s,adot,x}	9,25	cm²/nerv	A _{s,adot,y}	5,54	cm²/nerv	I _{II}	9,88E-05	m ⁴	k	1,46	-
Verificação da Área de Armadura						I _m	1,98E-04	m ⁴	ρ _{1,x}	0,020	-
A _{s,min,x}	1,28	cm²/nerv	A _{s,min,y}	1,28	cm²/nerv	δ _{imed,CQP}	0,14	cm	V _{Rd1,x}	19,82	kN/nerv
y _{cg,x}	23,24	cm	y _{cg,y}	23,24	cm	δ _{fiss,CQP}	0,68	cm	q _y	13,97	kN/m
I _{o,x}	99436	cm ⁴	I _{o,y}	99436	cm ⁴	α _f	1,323	-	V _{sd,y}	15,65	kN/nerv
y _{t,x}	23,24	cm	y _{t,y}	23,24	cm	δ _{total,∞}	1,57	cm	τ _{sd,y}	738,41	kN/m²/nerv
M _{d,min,x}	11,42	kN.m/nerv	M _{d,min,y}	11,42	kN.m/nerv	δ _{lim,CQP}	3,00	cm	τ _{Rd}	320,62	kN/m²
KMD	0,028	-	KMD	0,028	-	Consumo de materiais			k	1,46	-
KX	0,042	-	KX	0,042	-	V _{concreto}	0,142	m³/m²	ρ _{1,y}	0,020	-
KZ	0,983	-	KZ	0,983	-	A _s	18,486	cm²/m	V _{Rd1,y}	19,82	kN/nerv
A _{s,min,x}	2,65	cm²/nerv	A _{s,min,y}	2,65	cm²/nerv	A _{forma}	2,591	m²/m²			
A _{s,max,x}	34,00	cm²/nerv	A _{s,max,y}	34,00	cm²/nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020

Figura 47 – Planilha de cálculo laje *holedeck*: 10,0 x 10,0m

Laje holedeck - 10,0 x 10,0 m											
Parâmetros geométricos e coeficientes											
k _x	1000	cm	α	4,67	-	d	16,63	cm	c	2,5	cm
l _y	1000	cm	μ _x	4,41	-	a _x	65,0	cm	a _y	65,0	cm
λ	1,00	-	μ _y	4,41	-	b _{1,x}	32,5	cm	b _{1,y}	32,5	cm
b _w	15,0	cm	k _x	2,50	-	b _{fx}	80,0	cm	b _{fy}	80,0	cm
h _f	7,5	cm	k _y	2,50	-	ρconcreto	25	kN/m³	f _{ck}	25	MPa
h _n	30,0	cm	ψ ₂	1,50	-	Φadotado	12,5	mm	f _{yd}	50	kN/cm²
h	37,5	cm	ψ ₃	25	-	Aabertura	500,7	cm²	Nabertura	264	unid.
Cargas atuantes						Flechas			Abertura de fissuras		
g ₁	4,18	kN/m²	q	2,50	kN/m²	E _{cs}	24150,00	MPa	CAA	II	-
g ₂	1,40	kN/m²				α _e	8,70	-	p _{CF}	5,26	kN/m/nerv
Armadura longitudinal						I _o	1,27E-03	m ⁴	p _{CR}	6,46	kN/m/nerv
ε	1,00	-	δHahn	1,71	-	α	1,20	-	σ _{si}	252,87	MPa
M _{Sk,ELU,x}	35,61	kN.m/m	M _{Sk,ELU,y}	35,61	kN.m/m	f _{ct,m}	2,56	MPa	w _k	0,16	mm
M _{Sk,ELU,x}	48,84	kN.m/nerv	M _{Sk,ELU,y}	48,84	kN.m/nerv	M _r	15,20	kN.m/nerv	w _{k,lim}	0,30	mm
KMD	0,173	-	KMD	0,173	-	M _{Sk,CQP,x}	38,25	kN.m/nerv	Cisalhamento		
KX	0,288	-	KX	0,288	-	a ₁	40,00	cm	q _x	20,19	kN/m
KZ	0,885	-	KZ	0,885	-	a ₂	92,95	cm	V _{sd,x}	22,61	kN/nerv
x	4,78	cm	x	4,78	cm	a ₃	-1545,34	cm	τ _{sd,x}	906,67	kN/m²/nerv
A _{s,x}	10,69	cm²/nerv	A _{s,y}	10,69	cm²/nerv	x _{II}	5,16	cm	τ _{Rd}	320,62	kN/m²
A _{s,adot,x}	10,69	cm²/nerv	A _{s,adot,y}	10,69	cm²/nerv	I _{II}	1,59E-04	m ⁴	k	1,43	-
Verificação da Área de Armadura						I _m	2,28E-04	m ⁴	ρ _{1,x}	0,020	-
A _{s,min,x}	1,58	cm²/nerv	A _{s,min,y}	1,58	cm²/nerv	δ _{imed,CQP}	0,23	cm	V _{Rd1,x}	22,93	kN/nerv
y _{cg,x}	25,71	cm	y _{cg,y}	25,71	cm	δ _{fiss,CQP}	1,29	cm	q _y	20,19	kN/m
I _{o,x}	####	cm ⁴	I _{o,y}	126964	cm ⁴	α _f	1,323	-	V _{sd,y}	22,61	kN/nerv
y _{t,x}	25,71	cm	y _{t,y}	25,71	cm	δ _{total,∞}	2,99	cm	τ _{sd,y}	906,67	kN/m²/nerv
M _{d,min,x}	13,17	kN.m/nerv	M _{d,min,y}	13,17	kN.m/nerv	δ _{lim,CQP}	4,00	cm	τ _{Rd}	320,62	kN/m²
KMD	0,023	-	KMD	0,023	-	Consumo de materiais			k	1,43	-
KX	0,035	-	KX	0,035	-	V _{concreto}	0,167	m³/m²	ρ _{1,y}	0,020	-
KZ	0,986	-	KZ	0,986	-	A _s	26,724	cm²/m	V _{Rd1,y}	22,93	kN/nerv
A _{s,min,x}	2,59	cm²/nerv	A _{s,min,y}	2,59	cm²/nerv	A _{forma}	2,591	m²/m²			
A _{s,max,x}	42,00	cm²/nerv	A _{s,max,y}	42,00	cm²/nerv						

Fonte: produzido pelo autor, 2020