



BRENO FRANCISCO PEREIRA

**ESTUDO COMPARATIVO DO PONTO DE VISTA ESTRUTURAL E  
ECONÔMICO, RELACIONADO AO EMPREGO DE LAJES  
MACIÇAS E PRÉ-MOLDADAS DO TIPO TRELIÇADA COM  
APLICAÇÃO VOLTADA PARA O PROJETO DE UM EDIFÍCIO  
COMERCIAL**

BRENO FRANCISCO PEREIRA

**ESTUDO COMPARATIVO DO PONTO DE VISTA ESTRUTURAL E  
ECONÔMICO, RELACIONADO AO EMPREGO DE LAJES  
MACIÇAS E PRÉ-MOLDADAS DO TIPO TRELIÇADA COM  
APLICAÇÃO VOLTADA PARA O PROJETO DE UM EDIFÍCIO  
COMERCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Daniel Torres Filho  
Co-orientador: Cícero de Souza Nogueira Neto

Cajazeiras  
2020

**IFPB / Campus Cajazeiras**  
**Coordenação de Biblioteca**  
**Biblioteca Prof. Ribamar da Silva**  
**Catálogo na fonte: Daniel Andrade CRB-15/593**

P436e

Pereira, Breno Francisco

Estudo comparativo do ponto de vista estrutural e econômico, relacionado ao emprego de lajes maciças e pré-moldadas do tipo treliçada com aplicação voltada para o projeto de um edifício comercial / Breno Francisco Pereira; orientador Daniel Torres Filho; coorientador Cícero de Souza Nogueira Neto .- Cajazeiras, 2020.

69 f.: il.

Orientador: Daniel Torres Filho.

TCC (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2020.

1. Construção civil 2. Concreto armado 3. Estruturas – Concreto 4. Lajes I. Título

69(0.067)

BRENO FRANCISCO PEREIRA

**ESTUDO COMPARATIVO DO PONTO DE VISTA ESTRUTURAL E  
ECONÔMICO, RELACIONADO AO EMPREGO DE LAJES  
MACIÇAS E PRÉ-MOLDADAS DO TIPO TRELIÇADA COM  
APLICAÇÃO VOLTADA PARA O PROJETO DE UM EDIFÍCIO  
COMERCIAL**

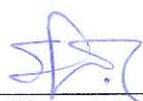
Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Bacharelado em  
Engenharia Civil do Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,  
como parte dos requisitos para a obtenção do  
Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 17 de fevereiro de 2020.

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Daniel Torres Filho – IFPB - *Campus* Cajazeiras  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Cícero de Souza Nogueira Neto – IFPB - *Campus* Cajazeiras  
Coorientador

  
\_\_\_\_\_  
Sebastião Simão da Silva – IFPB - *Campus* Cajazeiras  
Examinador 1

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à minha mãe, in memoriam, que sempre olhará por mim lá de cima e a meu pai por tanto me inspirar.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida, minha saúde e a perseverança que me fez chegar até aqui.

Ao IFPB Campus Cajazeiras, notadamente a Coordenação de Curso de Engenharia Civil, em nome do Coordenador José Tavares de Luna Neto, que prestou todo apoio necessário a concretização desta etapa.

Aos professores e orientadores Daniel Torres Filho e Cícero de Souza Nogueira Neto, por toda a confiança e atenção que dedicaram à esta etapa tão importante da minha formação.

A todos os professores que em suas respectivas disciplinas contribuíram de forma fundamental para a realização desta pesquisa.

Aos meus amigos da graduação com quem pude contar em cada momento de dificuldade e tenho enorme carinho, Alex Landim, Alexandra Amador, Alice Vitória, Álison Silva, André Albino, Assis Barbosa, Aurélia Emanoela, Bianca Anacleto, Geovany Barrozo e Leonardo Dias.

A toda a minha família pelo incondicional apoio, principalmente em nome do meu pai Geraldo Francisco Pereira, minha mãe Valdelicia Augusta Pereira (*In Memoriam*), meus avós Claudionor Pedro Fernandes e Laura Augusta da Silveira, minha irmã Bruna Augusta, minha tia Vanuzia Fernandes, meu sogro Sebastião Gomes e minha sogra Luciene Abrantes.

Por último e principalmente a minha noiva, Poliana Gomes de Abrantes por todo carinho, amor, compreensão, paciência e companheirismo durante toda esta jornada, o meu muito obrigado.

“Abasteça com sua gratidão àqueles que fazem pelos outros. O agradecimento retribui e mantém acesa a chama da solidariedade.”

## RESUMO

Um dos motores que impulsionam o desenvolvimento do país é a construção civil, seguimento esse que vem se modernizando a cada ano. O material mais utilizado por este setor é o concreto armado, principalmente na execução dos elementos de fundações e da superestrutura como pilares, vigas e lajes. As lajes, por sua vez, são elementos estruturais considerados bidimensionais, isto é, uma de suas dimensões é muito menor que as outras duas, se caracterizando desta maneira com o elemento de placa. Existem diversos tipos de lajes, sendo as principais do tipo pré-fabricadas, maciças, alveolares, *steel deck*, entre outras. A escolha do modelo de laje depende de diversos fatores, dentre eles viabilidade econômica e técnica, disponibilidade de materiais na região, entre outros. O presente trabalho faz uma análise comparativa do ponto de vista estrutural e econômico entre dois modelos de lajes, a maciça e a pré-fabricada com vigotas treliçadas, para um edifício comercial de dois pavimentos. Foram analisadas as deformações, reações de apoio e os custos de execução de cada um dos modelos abordados, nos quais constatou-se que do ponto de vista estrutural, a laje maciça leva vantagem com relação à pré-moldada quando comparadas as flechas iniciais e as reações de apoio das vigas. Entretanto, em termos econômicos verificou-se um menor custo de execução para a laje treliçada.

**Palavras-Chave:** Construção Civil; Concreto Armado; Estruturas; Lajes; Custos.

## **ABSTRACT**

One of the engines that drive the country's development is civil construction, a segment that has been modernizing every year. The material most used by this sector is reinforced concrete, mainly in the execution of the elements of foundations and superstructure such as pillars, beams and slabs. The slabs, in turn, are structural elements considered two-dimensional, that is, one of its dimensions is much smaller than the other two, being characterized in this way with the plate element. There are several types of slabs, the main ones being prefabricated, solid, hollow core, steel deck, among others. The choice of the slab model depends on several factors, including economic and technical feasibility, availability of materials in the region, among others. The present work makes a comparative analysis from the structural and economic point of view between two models of slabs, the solid and the prefabricated with lattice joists, for a two-story commercial building. Deformations, support reactions and execution costs of each of the models approached were analyzed, in which it was found that from a structural point of view, the solid slab has an advantage over the precast when comparing the initial arrows and the beam support reactions. However, in economic terms, there was a lower execution cost for the lattice slab.

**Keywords:** Construction; Reinforced Concrete; Structures; Slabs; Costs.

## LISTA DE FIGURAS

3.1- Casos de lajes armadas em uma única direção.....	17
3.2- Tipos de vinculações das lajes. ....	18
3.3- Análise dos momentos negativos em lajes vizinhas. ....	20
3.4- Treliça espacial utilizada na confecção das vigotas treliçadas.....	24
3.5- Representação do modelo de laje pré-fabricada com vigota treliçada. ....	24
3.6- Detalhamento de laje pré-moldada de vigota treliçada e sua representação em forma de viga com seção transversal do tipo T.....	25
4.1- Modelagem estrutural do edifício comercial utilizado no projeto com ênfase nas placas de lajes.....	28
4.2- Planta baixa do pavimento tipo. ....	29
4.3- Planta de forma do primeiro pavimento de laje maciça. ....	30
4.4- Planta de forma do pavimento da cobertura de laje maciça. ....	31
4.5- Planta de forma do primeiro pavimento de laje pré-fabricada. ....	32
4.6- Planta de forma do pavimento da cobertura de laje pré-fabricada. ....	33
4.7- Localização da obra.....	38
4.8- Serviços disponíveis na plataforma "Gerador de Preços".....	38
4.9- Elementos estruturais de concreto armado dentro da plataforma "Gerador de Preços"....	39
5.1- Detalhamento do corte transversal da Laje Maciça 01 do Primeiro Pavimento.....	42
5.2- Detalhamento do corte transversal da laje pré-fabricada 01 do primeiro pavimento.....	42
5.3- Detalhamento das armaduras positivas e negativas das lajes maciças do primeiro pavimento. ....	43
5.4- Detalhamento das armaduras positivas e negativas das lajes maciças do pavimento da cobertura. ....	44
5.5- Detalhamento das armaduras positivas e negativas das lajes pré-fabricadas do primeiro pavimento. ....	45
5.6- Detalhamento das armaduras positivas e negativas das lajes pré-fabricadas do pavimento da cobertura. ....	46
5.7- Custo de cada item por m <sup>2</sup> da laje maciça do primeiro pavimento. ....	53
5.8- Custo de cada item por m <sup>2</sup> da laje maciça do pavimento da cobertura. ....	53
5.9- Custo de cada item por m <sup>2</sup> da laje pré-fabricada do primeiro pavimento. ....	56
5.10- Custo de cada item por m <sup>2</sup> da laje pré-fabricada do pavimento da cobertura. ....	56
5.11- Custos de execução por pavimento e total dos dois modelos de lajes abordados.....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Carregamentos Incidentes sobre cada um dos modelos de lajes analisados. ....	40
Tabela 5.2 - Momentos Fletores das lajes do primeiro pavimento.....	40
Tabela 5.3 - Momentos Fletores das lajes do pavimento cobertura. ....	41
Tabela 5.4 - Quantitativo de Aço .....	42
Tabela 5.5 - Flechas iniciais em cada placa de laje maciça e pré-moldada do primeiro pavimento. ....	47
Tabela 5.6 - Flechas iniciais em cada placa de laje maciça e pré-moldada do pavimento da cobertura. ....	47
Tabela 5.7 - Reações de apoio das vigas do primeiro pavimento para os dois modelos de lajes. ....	48
Tabela 5.8 - Reações de apoio das vigas do pavimento cobertura para os dois modelos de lajes. ....	49
Tabela 5.9 - Quantitativo de aço da laje maciça por m <sup>2</sup> . ....	50
Tabela 5.10 - Quantitativo de aço da laje pré-fabricada por m <sup>2</sup> . ....	50
Tabela 5.11 - Descrição dos Insumos e custos por m <sup>2</sup> da laje maciça do primeiro pavimento. ....	51
Tabela 5.12 - Descrição dos Insumos e custos por m <sup>2</sup> da laje maciça da cobertura.....	52
Tabela 5.13 - Descrição dos Insumos e custos por m <sup>2</sup> da laje pré-moldada do primeiro pavimento. ....	54
Tabela 5.14 - Descrição dos Insumos e custos por m <sup>2</sup> da laje pré-moldada do pavimento da cobertura. ....	55

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Técnica Brasileira

SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

$f_{ck}$  - Resistência Característica do Concreto

$f_{yk}$  - Resistência Característica do Aço

$E_c$  – Módulo de Elasticidade Tangente do Concreto

$E_{cs}$  – Módulo de Elasticidade Secante do Concreto

$E_s$  – Módulo de Elasticidade do Aço

$h$  – Altura da Laje

$l_x$  – Vão Teórico da Laje

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1 Objetivo geral .....	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>16</b>
3.1 Lajes maciças.....	17
3.1.1 Considerações sobre o dimensionamento de lajes maciças.....	17
3.1.2 Dimensionamento da laje maciça .....	20
3.1.3 Cálculo das reações de apoio para as lajes maciças .....	21
3.1.4 Cálculo das flechas iniciais em cada placa de laje maciça.....	22
3.1.5 Verificação da laje maciça ao cisalhamento.....	22
3.2 Lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas.....	23
3.2.2 Dimensionamento das lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas.....	25
3.2.3 Cálculo das reações de apoio para as lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas.....	25
3.2.4 Cálculo das flechas iniciais em cada placa de laje pré-fabricada com vigotas treliçadas .....	26
3.2.5 Verificação da laje pré-fabricada com vigotas treliçadas ao cisalhamento .....	26
3.3 Custos de lajes de concreto armado na construção civil .....	27
<b>4. MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS.....</b>	<b>28</b>
4.1 Apresentação do projeto analisado e determinação das características da estrutura.....	28
4.2 Cálculo e dimensionamento das lajes maciças .....	35
4.3 Cálculo e dimensionamento das lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas .....	36
4.4 Análise dos custos de execução dos dois modelos de lajes analisados .....	37
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>40</b>
5.1 Carregamento incidente e momentos fletores encontrados para cada um dos modelos.....	40
5.2 Quantitativo de aço e detalhamento das armaduras.....	41
5.3 Flechas iniciais das lajes maciças e pré-moldadas com vigotas treliçadas.....	47
5.4 Reações nas vigas de apoio .....	48
5.5 Custos de execução por metro quadrado da laje maciça e pré-moldada .....	49
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>61</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no setor da construção civil principalmente devido a seu baixo custo de produção e a necessidade de mão de obra com moderada qualificação para efetuar seu preparo. Trata-se de uma mistura constituída por agregados miúdo e graúdo, aglomerante, água e eventualmente aditivos. Os materiais componentes do concreto são acrescentados de acordo com seu traço, que define as quantidades de cada elemento dentro da mistura e depende da aplicação destinada a esta.

Somente o concreto em si não é capaz de atender aos carregamentos solicitantes nas principais estruturas das edificações, uma vez que, do ponto de vista estrutural, sua principal função é resistir aos esforços de compressão. Sendo assim, é necessária a associação deste com barras de aço destinadas a resistir aos esforços de tração que se desenvolvem nos elementos. Tais barras são dimensionadas e inseridas convenientemente nas peças para cada situação, originando assim os elementos de concreto armado. O concreto armado é amplamente aplicado em estruturas na indústria da construção civil. Os elementos estruturais de concreto armado mais comuns são, vigas, pilares, lajes, além dos que compõem as fundações. O modo como os elementos estruturais são arranjados é chamado de sistema estrutural.

Como já mencionado, as lajes fazem parte do sistema estrutural, sendo consideradas elementos bidimensionais, ou seja, uma de suas dimensões (altura) é bem menor que as outras duas dimensões. Os modelos de análises estruturais básicos adotados em edificações trabalham com a distribuição dos carregamentos ao longo da estrutura. De acordo com este modelo, as lajes têm a função básica de resistir as cargas de utilização, peso próprio e revestimento, e distribuí-las para as vigas, que por sua vez distribuem os carregamentos para os pilares. As fundações, finalmente, recebem os carregamentos verticais, oriundos dos pilares, e distribuem por fim para o solo que deve ter boa capacidade resistiva, (Araújo, 2014). Existem atualmente diversos tipos de lajes no mercado, sendo que as mais utilizadas são as lajes maciças, nervuradas moldadas no local e pré-moldadas. A escolha por uma destas depende do tipo de obra a ser executada tendo em vista que todas devem ser dimensionadas de forma a atender as exigências normativas. Questões como o custo de execução, disponibilidade de materiais e mão de obra capacitada devem ser observadas para cada caso.

As lajes maciça e pré-moldada com vigotas treliçadas guardam algumas diferenças. A primeira é composta basicamente por uma placa de concreto maciça reforçada com aço. Este tipo de laje, com alturas que variam entre os 7 e 15 cm, são aplicadas em obras de pequeno,

médio e grande porte, como edifícios, reservatórios, escadas, pontes, hospitais, etc. Do ponto de vista estrutural, a laje maciça corrobora com a estabilidade global da estrutura tendo em vista que a concretagem desta ocorre juntamente com a das vigas, garantindo assim uma estrutura monolítica e com um carregamento bem distribuído em todas as vigas de apoio.

As lajes pré-moldadas possuem estrutura composta por vigotas treliçadas de concreto armado, que são as principais responsáveis por resistirem aos esforços de flexão, capa de concreto para ligação entre as vigotas e preenchimento do pavimento, além de elementos de enchimento que funcionam como forma para a moldagem do concreto. Os elementos de enchimento podem ser de lajotas cerâmicas, de concreto celular ou blocos de poliestireno expandido (EPS).

Tendo em vista a grande aplicabilidade dos dois modelos apresentados é importante realizar uma avaliação dos impactos que cada um destes pode gerar principalmente em termos econômicos e de desempenho estrutural, o que pode ser um balizador para a escolha de um deles, sendo esse o tema desse trabalho.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Esse trabalho tem como objetivo comparar os custos de execução dos pavimentos de um edifício comercial considerando-o composto por lajes maciças e pré-moldadas com vigotas treliçadas, assim como avaliar o desempenho estrutural para cada um dos dois modelos abordados.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a concepção e pré-dimensionamento de lajes maciças e lajes pré-moldadas do tipo treliçada de um edifício comercial;
- Dimensionar e detalhar cada um dos modelos de lajes analisados;
- Determinar e comparar os valores das flechas iniciais nas lajes, além de obter as reações de apoio das vigas para os dois modelos;
- Verificar a resistências da laje maciça e treliçada ao cisalhamento;
- Realizar o orçamento de custos de execução para os dois modelos de lajes com base no levantamento de quantitativo de aço encontrado na fase de dimensionamento.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

No Brasil 80% das obras utilizam o concreto armado na execução dos elementos estruturais de residências multifamiliares, infraestrutura entre outros segmentos da construção civil. Dentro do estudo desses tipos de estruturas existem preocupações relacionadas à segurança, conforto e economia. Partindo deste princípio é importante que o projeto estrutural seja iniciado com uma concepção adequada visando atender a esses três fatores (Ambrozewicz, 2012).

A concepção estrutural é tida como uma das etapas mais importantes da elaboração de um projeto de estruturas, onde são escolhidos os elementos que serão utilizados, assim como suas posições, de forma que tal sistema seja capaz de absorver os esforços e transmiti-los através de toda a superestrutura até que cheguem ao solo por meio das fundações (Pinheiro, 2003). Esta etapa tem como ponto de partida o projeto arquitetônico. Na etapa de concepção, são elaboradas as plantas de forma, onde são representados todos os elementos estruturais como vigas, pilares, lajes, etc, permitindo assim o dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais no tangente as dimensões da seção de concreto e da área de aço necessária.

De acordo com (Costa, 1997) o custo da estrutura varia entre 15 e 20 % dos custos totais de uma obra, daí a importância de um estudo técnico acerca do melhor sistema estrutural, que resulte em conforto, segurança e economia aos usuários. Dentre os elementos estruturais as lajes são as que mais podem variar, não só em relação aos materiais utilizados, mas também na própria técnica construtiva adotada. No mercado da construção civil é possível encontrar uma grande variedade destes elementos, por exemplo, as lajes maciças de concreto armado, com assoalho de madeira, steel deck, alveolares, nervuradas em duas direções e pré-fabricadas, também conhecidas como nervuradas unidirecionais. As lajes pré-fabricadas também possuem diversidades, como as de vigotas treliçadas, do tipo trilho e as de vigotas protendidas.

A escolha do tipo de laje a ser utilizada depende de vários fatores, como o econômico, onde engloba a facilidade de acesso aos materiais para a execução que por sua vez depende da localidade da obra assim como a finalidade desta. Outro fator decisivo nesta escolha são critérios técnicos que buscam a melhor solução em relação à segurança e conforto dos usuários, atendendo para este fim as normas regulamentadoras.

Inicialmente devem ser determinados os carregamentos incidentes sobre cada placa de laje levando em consideração o peso próprio, carregamentos acidentais e outros carregamentos

permanentes como forros, pisos cerâmicos, etc. A NBR 6120 – 2019 traz em seu texto tabelas com valores usuais dentro da construção civil de ações de acordo com a finalidade da obra.

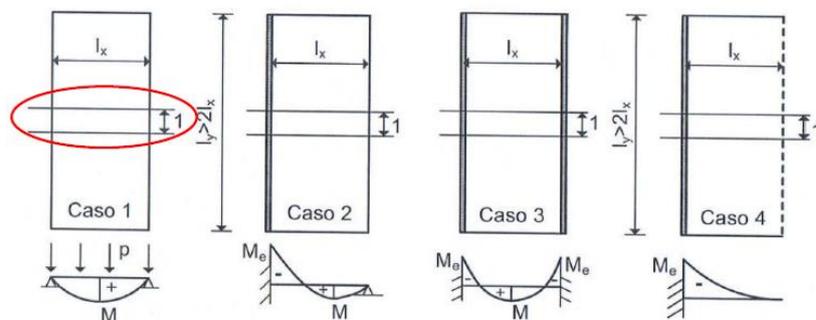
### 3.1 LAJES MACIÇAS

São as lajes onde toda a sua espessura é composta de concreto com armaduras de flexão longitudinais e transversais adequadamente posicionadas em seu interior, são apoiadas sobre vigas e/ou paredes e podem ser do tipo de concreto armado ou protendido (Bastos, 2015). Ainda segundo o autor as lajes maciças são as mais comuns na construção de pontes e edifícios de múltiplos pavimentos.

#### 3.1.1 Considerações sobre o dimensionamento de Lajes Maciças

As lajes são dimensionadas observando inicialmente a relação entre seus vãos. Quando a relação entre o maior e o menor vão é menor ou igual a 2, as lajes são consideradas armadas em duas direções; quando é maior que 2 ela é armada em uma única direção, na direção do menor vão. De acordo com (Araújo, 2014), os momentos nas lajes armadas em uma única direção dependem do tipo de caso de cada pano de laje de acordo com a Figura 3.1. Desta forma os momentos nas lajes unidirecionais são calculados de acordo com as Equações 3.1 a 3.6.

**Figura 3.1** - Casos de lajes armadas em uma única direção.



**Fonte:** Araújo (2014)

- Para o caso 1:

$$M = \frac{p * l_x^2}{8} \quad (3.1)$$

- Para o caso 2:

$$M = \frac{p * l_x^2}{14,22} \quad (3.2)$$

$$M_e = \frac{-p * l_x^2}{8} \quad (3.3)$$

- Para o caso 3:

$$M = \frac{p * l_x^2}{24} \quad (3.4)$$

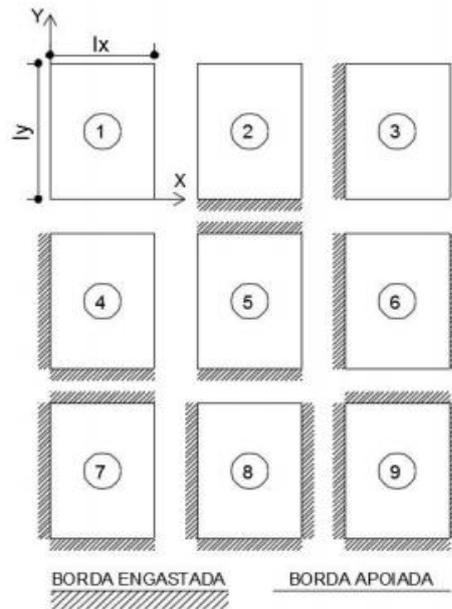
$$M_e = \frac{-p * l_x^2}{12} \quad (3.5)$$

- Para o caso 4:

$$M_e = \frac{-p * l_x^2}{2} \quad (3.6)$$

O dimensionamento das lajes maciças armadas em duas direções pode ser realizado seguindo a metodologia de cálculo apresentada por Carvalho e Figueiredo Filho (2014), onde os mesmos utilizam a metodologia do processo de cálculo de placas por séries para encontrar os valores das reações das lajes nos apoios, momentos fletores e também os deslocamentos nas placas de lajes (flechas). Nas obras antes citadas, os autores trazem diversas tabelas, representadas nos Anexos A e B, com o intuito de tornar prático o processo de cálculo. Estas foram elaboradas em função da geometria da laje e do tipo de vinculação (Figura 3.2) de cada placa.

**Figura 3.2** - Tipos de vinculações das lajes.



**Fonte:** Bares *apud* Carvalho e Figueiredo Filho (2014)

Para as lajes armadas em duas direções, os momentos máximos nas direções x e y podem ser positivos ou negativos e são designados pelas letras m e x respectivamente, o cálculo destes momentos são efetuados por meio das equações 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10 e dos coeficientes presentes no Anexo A.

- Momentos máximos positivos:

$$m_x = \frac{\mu_x * p * l_x^2}{100} \quad (3.7)$$

$$m_y = \frac{\mu_y * p * l_x^2}{100} \quad (3.8)$$

- Momentos máximos negativos:

$$X_x = \frac{\mu'_x * p * l_x^2}{100} \quad (3.9)$$

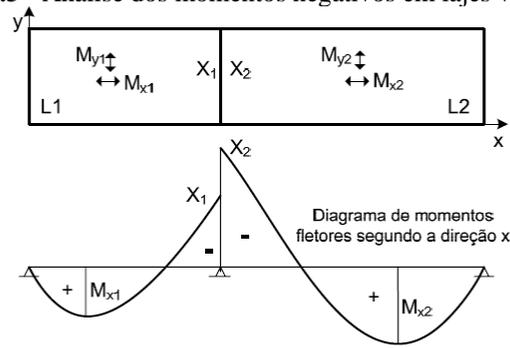
$$X_y = \frac{\mu'_y * p * l_x^2}{100} \quad (3.10)$$

Em que

- p representa o carregamento na laje;
- $l_x$  corresponde ao menor vão da placa;
- $\mu_x$ ,  $\mu_y$ ,  $\mu'_x$  e  $\mu'_y$  correspondem aos coeficientes para o cálculo dos momentos máximos.

No caso dos momentos negativos de lajes que possuem continuidade, ou seja, são vizinhas, se faz necessário corrigir o momento em função da variação dos valores obtidos a partir da geometria das lajes que podem diferir. Esta situação é apresentada na Figura 3.3, onde o momento negativo considerado será igual ao maior valor entre 80% do maior momento negativo ou a média entre esses momentos.

**Figura 3.3** - Análise dos momentos negativos em lajes vizinhas.



Fonte: Araújo (2014)

### 3.1.2 Dimensionamento da laje maciça

O dimensionamento das lajes é realizado da mesma forma que para vigas retangulares, com a diferença, no entanto da utilização de uma faixa de largura unitária de 1,0 metro para as lajes, onde a armadura será calculada e distribuída. A altura útil a ser adotada será medida a partir do centro de gravidade das barras até a borda mais comprimida da laje. Desta forma, considerando o cobrimento de acordo com a classe de agressividade ambiental adotada, a altura final da laje e arbitrando inicialmente o diâmetro da barra, pode-se determinar o valor da altura útil  $d$ . O dimensionamento da área de seção do aço é feito considerando o estado limite último (ELU), ou seja, o estado de ruína da peça. No procedimento de cálculo ocorre a minoração da resistência e majoração das cargas.

No dimensionamento são utilizados valores adimensionais KMD, KX e KZ. O primeiro destes é dado por:

$$KMD = \frac{M_d}{b_f * d^2 * f_{cd}} \quad (3.11)$$

Em que,  $b_f$  é a largura unitária já mencionada,  $M_d$  e  $f_{cd}$  são mostrados nas Equações 3.12 e 3.13.

$$M_d = M * 1,4 \quad (3.12)$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4} \quad (3.13)$$

Com o valor de KMD, pode-se obter os outros parâmetros adimensionais KX e KZ por meio da tabela constante no Anexo C. Em posse do valor de KX, que deve ser menor que 0,45

para se garantir ductilidade à peça, determina-se a profundidade da linha neutra ( $x$ ) de acordo com a Equação 3.14:

$$x = KX * d \quad (3.14)$$

Dando continuidade ao processo de cálculo, a partir do valor de KZ obtido, a área de aço é determinada segundo a Equação 3.15 para as direções x e y.

$$As = \frac{M_d}{KZ * d * f_{yd}} \quad (3.15)$$

Em que,

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15} \quad (3.16)$$

### 3.1.3 Cálculo das reações de apoio para as lajes maciças

O cálculo da ação das lajes nas vigas de apoio pode ser complexo em virtude da variação deste carregamento, que depende principalmente das condições de apoio e da relação entre os vãos. Porém, a NBR 6118 – 2014 permite que estas operações sejam simplificadas ao considerar a ação da laje sobre as vigas como sendo uniforme. Os valores das reações podem ser obtidos em função de tabelas que relacionam a geometria da laje ao tipo de vinculação e um fator adimensional k retirados de (Carvalho e Figueiredo Filho, 2014), conforme apresenta o Anexo B.

- Reações de apoios nas direções x e y em bordas simplesmente apoiadas

$$q_x = k_x * p * \frac{l_x}{10} \quad (3.17)$$

$$q_y = k_y * p * \frac{l_x}{10} \quad (3.18)$$

- Reações de apoios nas direções x e y em bordas engastadas

$$q_{x'} = k'_x * p * \frac{l_x}{10} \quad (3.19)$$

$$q_{y'} = k'_y * p * \frac{l_x}{10} \quad (3.20)$$

### 3.1.4 Cálculo das flechas iniciais em cada placa de laje maciça

As flechas ou deslocamentos máximos devem atender aos critérios de segurança. Para o cálculo das flechas iniciais são considerados apenas os efeitos da fissuração do concreto, ou seja, o efeito da fluência não será analisado uma vez que este entra apenas no cálculo das flechas finais. O cálculo das deformações é de extrema importância pois a partir dele são calculadas as contra flechas, onde na prática estas últimas são executadas através da regulagem das alturas dos elementos de escoramento. As deformações iniciais sofridas em cada uma das placas de lajes maciças podem ser encontradas de acordo com a Equação 3.21.

$$a = \frac{\alpha_c * l_x^4 * p}{(E * I)_{eq}} \quad (3.21)$$

Em que,

- $p$  é o carregamento com combinação quase permanente;
- $l_x$  é o menor vão da placa;
- $\alpha_c$  é um coeficiente que depende da condição elástica do sistema;
- $(E * I)_{eq}$  é a rigidez equivalente.

A NBR 6118 – 2014 adota a Equação 3.22 para o cálculo da rigidez equivalente:

$$(E * I)_{eq} = E_{cs} \left\{ \left( \frac{M_r}{M_a} \right)^3 * I_c + \left[ 1 - \left( \frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} * I_c \quad (3.22)$$

Em que,

- $I_c$  é o momento de inércia da seção bruta de concreto;
- $I_{II}$  é o momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II;
- $M_a$  é o momento fletor atuante na seção mais solicitada;
- $M_r$  é o momento fletor de fissuração;
- $E_{cs}$  é o módulo de elasticidade secante do concreto.

### 3.1.5 Verificação da laje maciça ao cisalhamento

O efeito do esforço cortante em placas de lajes não é tão importante quanto nas vigas, isto porque as lajes conseguem desenvolver um sistema resistente a este esforço. Desta forma, apenas o concreto consegue resistir aos esforços cortantes na maioria dos casos, não sendo necessário assim a utilização de armadura de cisalhamento para estas situações (Carvalho e Figueiredo Filho, 2014). O cálculo da armadura transversal de cisalhamento para lajes pode ser

feito da mesma maneira que para vigas, porém, em função da pequena altura destas não é usual utilizar esta armadura transversal. Logo o procedimento realizado é a verificação da não necessidade de utilização deste tipo de armadura, através da análise da tração diagonal sob flexão e cisalhamento e o esmagamento do concreto das bielas comprimidas. Esta verificação de acordo com a ABNT NBR 6118 – 2014 é procedida conforme a Equação 3.23.

$$V_{sd} \leq V_{rd1} = [\tau_{Rd} * k * (1,2 * 40 * \rho_1) + 0,15 * \sigma_{cp}] * b_w * d \quad (3.23)$$

Em que,

$$\tau_{Rd} = 0,25 * f_{ctd} \quad (3.24)$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w * d} \leq 0,02 \quad (3.25)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c} \quad (3.26)$$

Sendo,

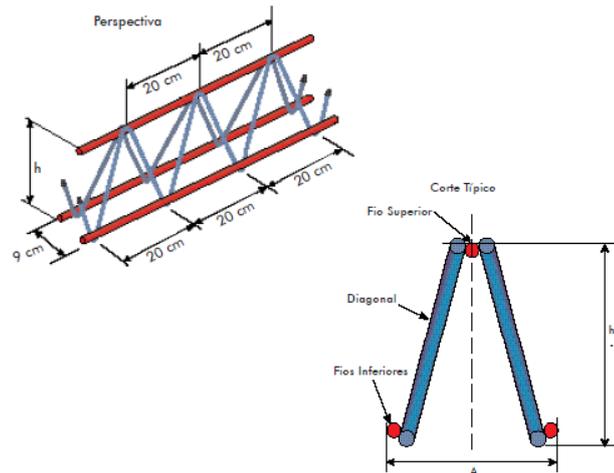
- $d$  a altura útil das nervuras;
- $b_w$  a largura mínima da seção;
- $k$  um coeficiente que depende do número de barras que chegam aos apoios, quando 50% da armadura inferior não chegam aos apoios seu valor é tomado como sendo igual a 1, para os demais casos  $k = 1,6 - d$ , não podendo ser menor que 1.

### 3.2 LAJES PRÉ-FABRICADAS COM VIGOTAS TRELIÇADAS

Este tipo de laje é composto por vigotas com treliças espaciais de aço (Figura 3.4), material de enchimento, capa de concreto e armadura adicional. É considerada pré-fabricada, pois as vigotas treliçadas são moldadas fora do local da obra, esta técnica construtiva leva vantagem sobre as lajes maciças principalmente em relação ao peso próprio reduzido e a economia de formas e concreto no ato da execução. Segundo (Melo, 2004) os sistemas baseados em lajes pré-fabricadas possuem vantagens como diminuição da mão de obra e rapidez na montagem. As vigotas treliçadas são produzidas sob encomenda cabendo ao projetista informar ou não a necessidade de utilização de armadura adicional. De acordo com a NBR 14859-1 – 2016 as vigotas pré-fabricadas são definidas da seguinte maneira:

“Constituída de concreto estrutural, executadas industrialmente fora do local de utilização definitivo da estrutura ou mesmo em canteiro de obra, sob rigorosas condições de controle da qualidade. Englobam total ou parcialmente a armadura inferior de tração integrando parcialmente a seção de concreto da nervura longitudinal”.

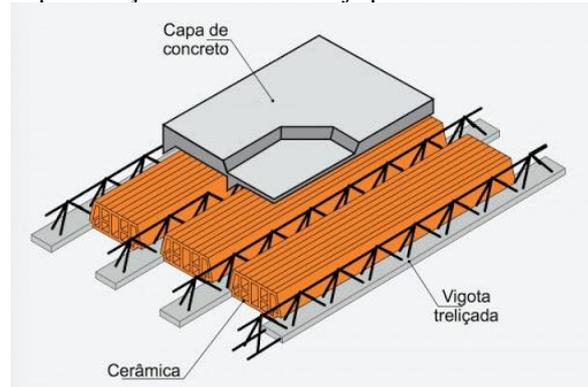
**Figura 3.4** - Treliça espacial utilizada na confecção das vigotas treliçadas.



**Fonte:** Manual Técnico Lajes Treliçadas Belgo (2010)

A Figura 3.5 mostra a representação da laje pré-fabricada com vigota treliçada e lajota cerâmica como material de enchimento.

**Figura 3.5** - Representação do modelo de laje pré-fabricada com vigota treliçada.



**Fonte:** Lajes Jundiá (2015)

3.2.1 Considerações sobre o dimensionamento de lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas

Como a vigota treliçada é considerada simplesmente apoiada o momento máximo atuante na mesma é dado em função do carregamento ( $p'$ ), e do valor do vão teórico encontrado ( $l_x$ ).

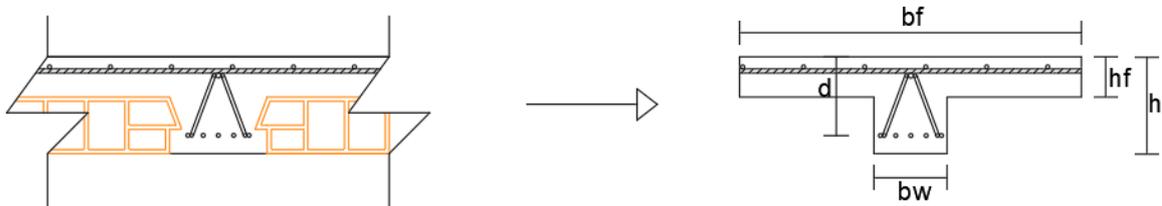
$$M = \frac{p' * l_x^2}{8} \quad (3.27)$$

Os momentos negativos nas lajes pré-moldadas com vigotas treliçadas podem ser determinados em função da continuidade das vigotas sobre os painéis de lajes, de modo a se obter um valor maior de momento negativo do que na prática, mas por outro lado que atenda satisfatoriamente a segurança principalmente no combate a formação de fissuras.

### 3.2.2 Dimensionamento das lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas

O cálculo da armadura de flexão pode ser efetuado procedendo-se de maneira análoga ao cálculo de armaduras em vigas do tipo T, uma vez que quando há deformação da viga parte da laje adjacente a esta também se deforma. Para lajes pré-moldadas este fenômeno acontece devido a capa de concreto, logo a viga incorpora parte da laje fazendo com que sua seção passe a trabalhar como se fosse do tipo T (Carvalho e Figueiredo Filho, 2014). O cálculo é realizado de acordo com as Equações 3.11, 3.12 e 3.13, porém considerando para este dimensionamento as características geométricas da seção T representadas na Figura 3.6.

**Figura 3.6** - Detalhamento de laje pré-moldada de vigota treliçada e sua representação em forma de viga com seção transversal do tipo T.



**Fonte:** Autor (2020)

Se o valor de  $x$  (profundidade da linha neutra) for menor que  $h_f$ , a viga pode ser dimensionada como sendo de seção retangular e a área de aço é calculada através das Equações 3.15 e 3.16. A resistência aos momentos negativos nas lajes treliçadas podem ser fornecidas pela própria armadura de distribuição empregando, caso seja necessário, armaduras adicionais.

### 3.2.3 Cálculo das reações de apoio para as lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas

Usualmente é considerada a influência do carregamento das lajes pré-fabricadas apenas nas vigas transversais a estas, porém Carvalho e Figueiredo Filho (2014) trazem em seu trabalho um estudo onde mostram que a capa de concreto é capaz de conferir, apesar de pequena, uma certa rigidez a ligação laje e viga transmitindo desta forma parte do carregamento para as vigas

paralelas as vigotas treliçadas, porém não há registro normativo sobre qual método utilizar para considerar quanto do carregamento das vigas transversais serão destinados as vigas paralelas, desta forma, para atender aos critérios de segurança o presente trabalho utilizará o processo simplificado sugerido pelos autores, onde o carregamento nas vigas paralelas as vigotas representarão 25% do carregamento das vigas transversais a estas últimas, conforme o procedimento de cálculo abaixo:

- Ações nas vigas perpendiculares as vigotas treliçadas:

$$P_{vy} = \frac{p * l_x}{2} \quad (3.28)$$

- Ações nas vigas paralelas as vigotas treliçadas:

$$P_{vx} = 0,25 * P_{vy} = 0,125 * p * l_x \quad (3.29)$$

Onde  $p$  é o carregamento distribuído na laje e  $l_x$  é o valor do vão teórico na direção paralela as vigotas treliçadas.

### 3.2.4 Cálculo das flechas iniciais em cada placa de laje pré-fabricada com vigotas treliçadas

O cálculo das flechas nas placas de lajes treliçadas é realizado da mesma forma das lajes maciças, através da Equação 3.21, considerando, no entanto, as características geométricas da seção do tipo T (Figura 3.6), onde é analisado o efeito da fissuração no elemento através da equação da inércia equivalente.

### 3.2.5 Verificação da laje pré-fabricada com vigotas treliçadas ao cisalhamento

A verificação da laje treliçada ao cisalhamento é realizada de maneira semelhante à das lajes maciças com algumas pequenas modificações, conforme indica a equação 30.

$$Vsd \leq Vrd1 = [\tau_{Rd} * k * (1,2 * 40 * \rho_1)] * b_w * d \quad (3.30)$$

### 3.3 Custos de lajes de concreto armado na construção civil

O orçamento dentro da construção civil é o cálculo dos custos necessários para que uma obra seja executada. Um grau elevado de detalhamento de um orçamento aproxima o valor teórico ao encontrado na prática (Silva et al., 2015). É necessária uma análise adequada dos serviços que serão incorporados ao orçamento, principalmente no tangente ao quantitativo dos insumos. Segundo (Limmer, 1997) o orçamento de obras corresponde a determinação dos custos necessários para a realização de um projeto, de acordo com um plano de execução previamente estabelecido, custos esses traduzidos em termos quantitativos.

Os serviços relacionados as estruturas de concreto armado compõem uma das etapas mais importantes dentro de um orçamento, onde estima-se que o custo final destes elementos corresponde de 15 a 20 % do custo total de uma construção, conforme mencionado anteriormente. Segundo (Costa, 1997) uma redução de 10% no custo da estrutura equivale a uma minoração de 2% do custo total da construção, em termos práticos este valor corresponde a todo o serviço de pintura da mesma construção.

Em função da evolução do mercado imobiliário a busca por técnicas construtivas mais econômicas se tornou uma preocupação por parte dos construtores (Spohr, 2008), ainda segundo o autor as lajes maciças vem perdendo espaço em virtude das novas tendências construtivas que utilizam vãos livres cada vez maiores, e desta forma, exigiriam deste modelo de laje uma altura mais elevada, gerando assim um maior peso próprio. Por este motivo a utilização das lajes pré-moldadas cresce tanto no mercado construtivo atual.

De acordo com (ELLIOTT, 2002, p. 05), aproximadamente metade dos pavimentos de edificações comerciais e residenciais ao redor do mundo são constituídos por lajes pré-fabricadas. Analisando-se dentro da ótica econômica, as placas de lajes compostas de elementos pré-fabricados tendem a ser mais viáveis quando comparadas com as placas de lajes maciças

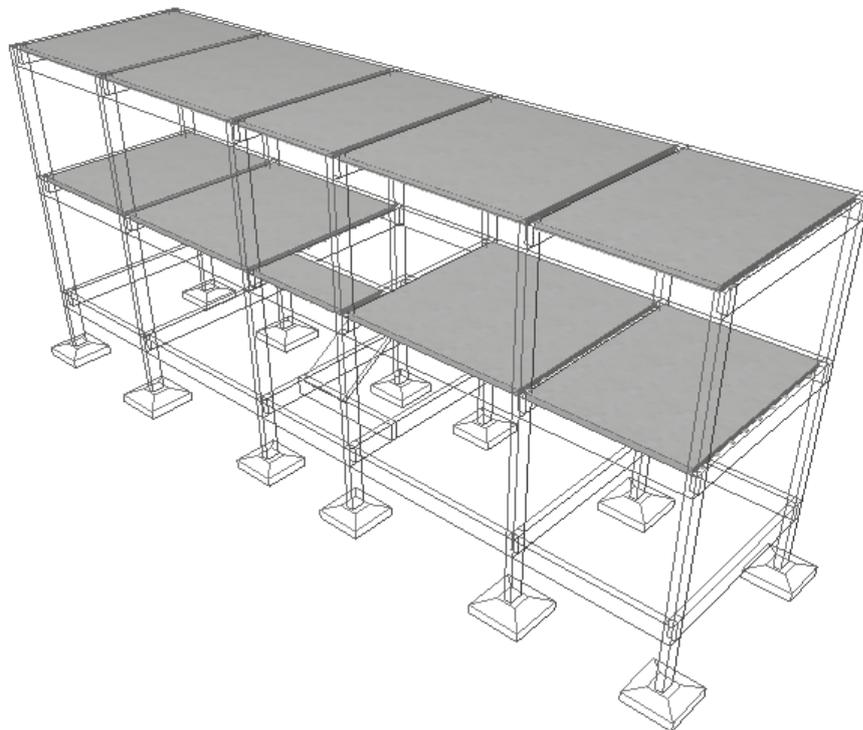
A orçamentação dos elementos estruturais pode ser realizada por diversos métodos, o mais tradicional dentre eles são as tabelas do SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil), que são frequentemente atualizadas e alimentadas pela Caixa Econômica Federal e o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), para o sistema construtivo de laje maciça a utilização do SINAPI na orçamentação é largamente aplicada, porém os elementos das lajes pré-fabricadas, muito em virtude da sua grande diversidade, ainda são pouco tratados nestas tabelas. De acordo com (Silva e Daré, 2011) mesmo com a frequente utilização destes elementos ainda faltam, de forma geral, parâmetros para a correta orçamentação deste sistema construtivo, logo se faz necessária a busca por índices que permitam a precificação deste modelo estrutural.

## 4. MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS

### 4.1 APRESENTAÇÃO DO PROJETO ANALISADO E DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA

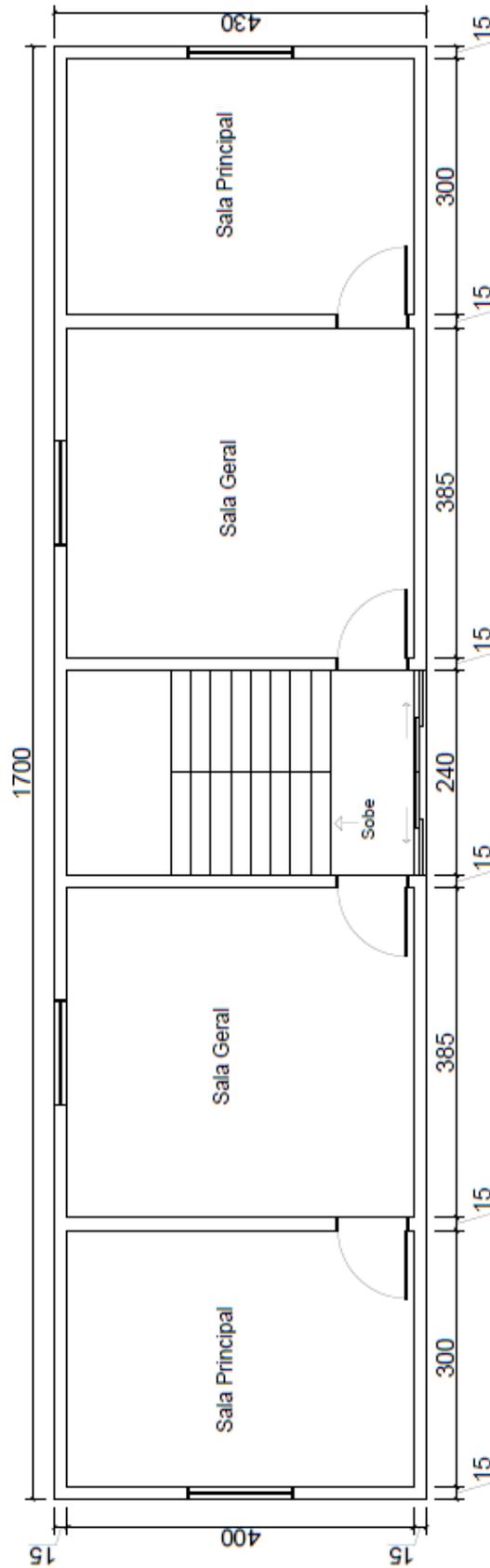
O objeto de estudo desse trabalho foi um edifício comercial composto por dois pavimentos onde funcionam salas, além da cobertura que não é habitada. A área construída total é de 139,36 m<sup>2</sup> de pano de laje, sendo que o primeiro pavimento possui 66,26 m<sup>2</sup> e o térreo possui 73,1 m<sup>2</sup>. A Figura 4.1 destaca a geometria das lajes estudadas, enquanto a Figura 4.2 apresenta a planta baixa do pavimento primeiro, que possui as mesmas dimensões dos ambientes do pavimento térreo. Com base no projeto arquitetônico (Figura 4.2) foi possível fazer o lançamento dos elementos da superestrutura como, pilares, vigas e das lajes maciças e treliçadas. Todos esses elementos constam nas plantas de forma e encontram-se nas Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6.

**Figura 4.1** - Modelagem estrutural do edifício comercial utilizado no projeto com ênfase nas placas de lajes.



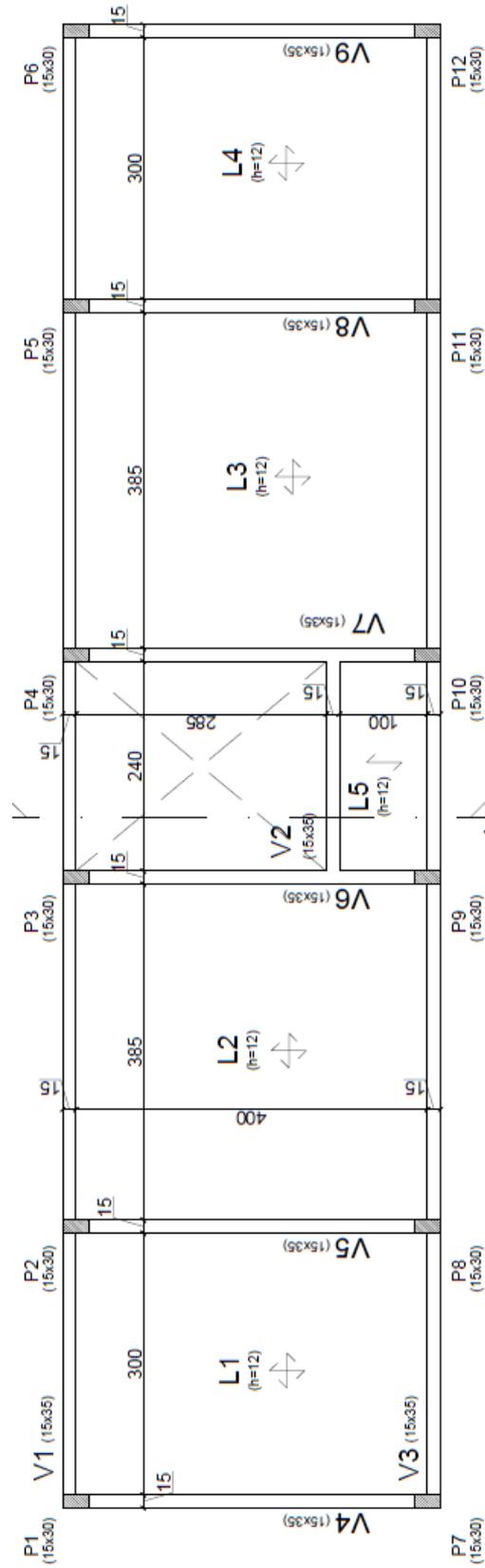
Fonte: Autor (2020)

Figura 4.2 - Planta baixa do pavimento tipo.



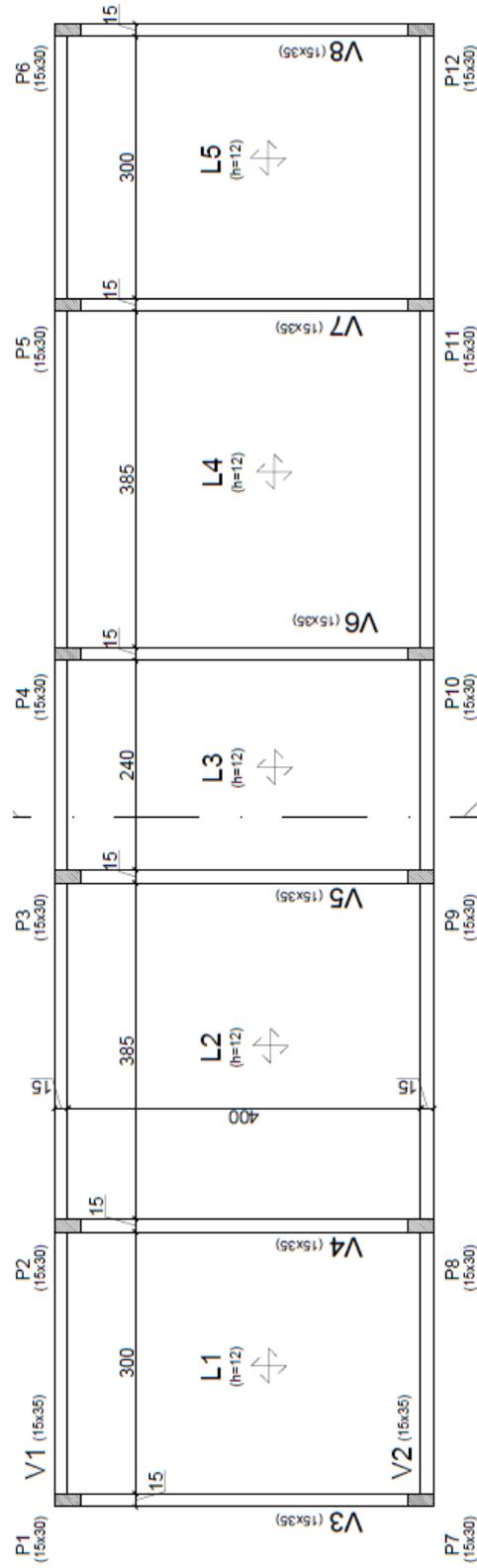
Fonte: Autor (2020)

Figura 4.3 - Planta de forma do primeiro pavimento de laje maciça.



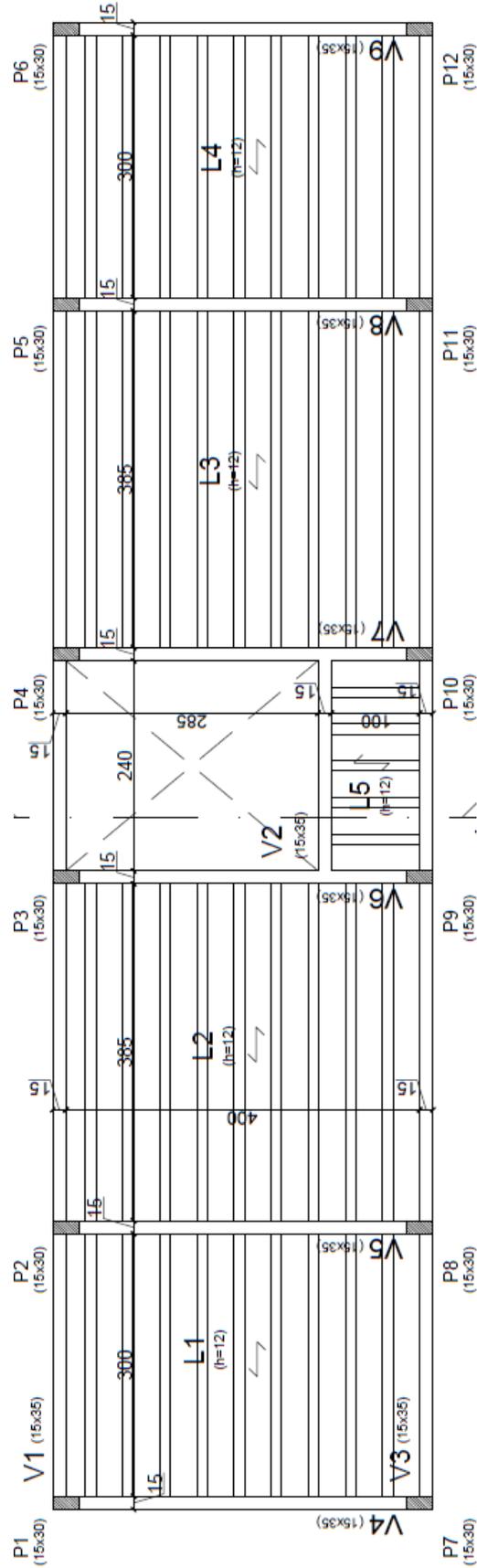
Fonte: Autor (2020)

Figura 4.4 - Planta de forma do pavimento da cobertura de laje maciça.



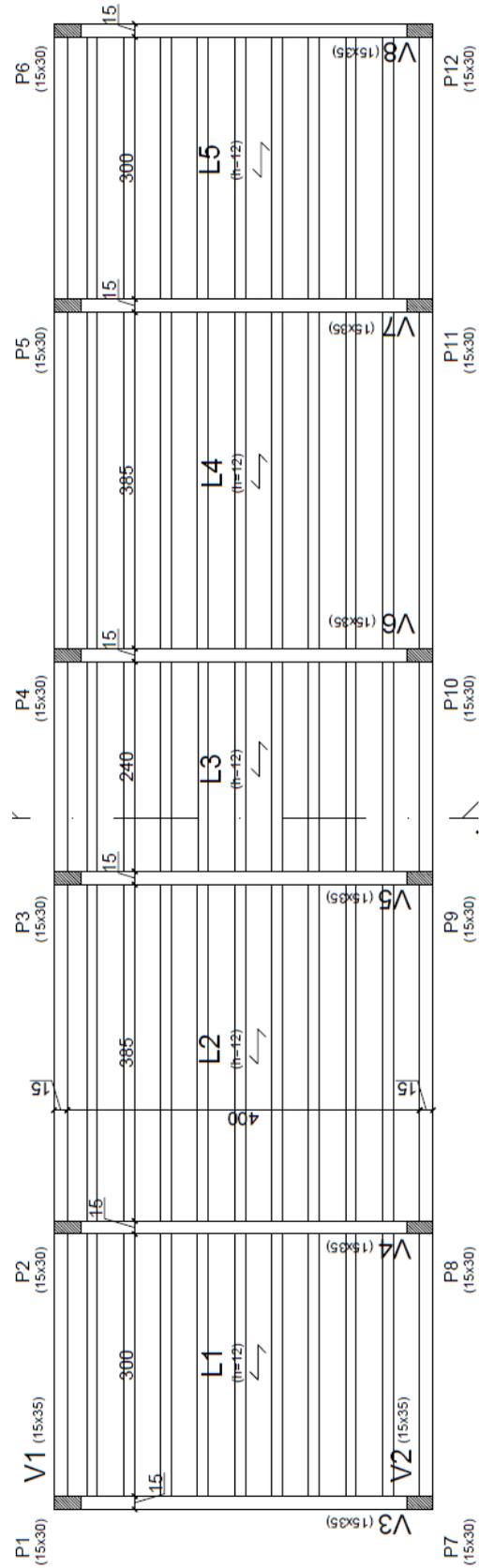
Fonte: Autor (2020)

Figura 4.5 - Planta de forma do primeiro pavimento de laje pré-fabricada.



Fonte: Autor (2020)

Figura 4.6 - Planta de forma do pavimento da cobertura de laje pré-fabricada.



Fonte: Autor (2020)

Uma vez lançada a estrutura e conhecidas as posições de todos os elementos estruturais é possível realizar o dimensionamento e detalhamento dos mesmos. Para a realização do dimensionamento dos dois modelos de lajes nos pavimentos analisados (1º pavimento e cobertura) se fez necessário a determinação prévia de alguns parâmetros destinados a realização dos cálculos. A classe de agressividade ambiental foi considerada igual a II, ou seja, destinadas a ambientes urbanos podendo ser considerada moderada no que concerne a agressividade do ambiente onde a estrutura será inserida, conforme preconiza a NBR 6118 – 2014.

O valor do Cobrimento mínimo foi encontrado em função da classe de agressividade ambiental, para a classe II, deve-se adotar um cobrimento mínimo de 2,5 *cm* conforme prescreve a NBR 6118 – 2014, porém a norma permite a utilização de um valor de 2 *cm* quando há um rigoroso controle no processo de produção, este valor de cobrimento será utilizado apenas nas vigotas das lajes treliçadas. O valor do  $f_{ck}$  para os elementos de concreto foi considerado igual a 25 *MPa* enquanto o módulo de elasticidade tangente do concreto  $E_c$  foi adotado como sendo igual a 28000 *MPa* considerando o uso do granito como agregado graúdo. Assim o módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) com base no módulo de elasticidade tangente é dado por

$$E_{cs} = \alpha_i * E_c = \left(0,8 + 0,2 * \frac{25}{80}\right) * 28000 = 24150 \text{ MPa} \quad (4.1)$$

Já para o aço a resistência característica adotada foi de 500 *MPa*, ou seja, do tipo CA – 50 com módulo de elasticidade  $E_s$  de 210000 *MPa* para a laje do tipo maciça, enquanto na laje do tipo treliçada a resistência característica utilizada foi de 600 *MPa*, ou seja, aço do tipo CA – 60.

O carregamento  $p$  nas lajes foi determinado de acordo com o que recomenda a NBR 6120 – 2019 (Cargas para o cálculo de estruturas de edificações), em que  $p$  é a soma da carga acidental mais a carga permanente estrutural (peso próprio da estrutura) e a sobrecarga permanente (revestimento do forro e pisos). Vale salientar ainda que a carga acidental é determinada em função do tipo de uso das lajes, ou seja, seu valor pode variar dependendo da finalidade destinada a estas. Todos os cálculos relativos ao dimensionamento das lajes foram efetuados com auxílio do software Excel ®, com base no procedimento mostrado a seguir.

## 4.2 CÁLCULO E DIMENSIONAMENTO DAS LAJES MACIÇAS

Para iniciar o procedimento de cálculo se fez necessário determinar o carregamento incidente sobre cada placa de laje. Este é obtido em função do peso próprio do elemento, do carregamento acidental e da carga de revestimento (Piso + Forro + Contrapiso). Os valores referentes aos carregamentos foram admitidos com base nas Tabelas 1 e 2 da ABNT NBR 6120 – 2019. A altura adotada para todas as placas de laje foi de 12 cm.

- Carregamento devido ao peso próprio

O carregamento em função do peso próprio é encontrado multiplicando o peso específico do concreto armado que é de  $25,0 \text{ kN/m}^3$  pela altura do elemento, neste caso 12 cm.

- Carregamento devido a carga acidental

O carregamento acidental de acordo com a Tabela 2 da NBR 6120 - 2019 para escritórios é igual a  $2,0 \text{ kN/m}^2$  para ambientes como salas de uso geral e banheiros. Vale lembrar que este valor será utilizado nas lajes do primeiro pavimento, uma vez que não haverá este tipo de solicitação na laje da cobertura. Para esta última, considera-se o valor referente ao carregamento do telhado por  $\text{m}^2$  que é de  $0,7 \text{ kN/m}^2$ , por se tratar de um valor já usual para lajes com telhas cerâmicas e estrutura de madeira.

- Carregamento devido ao revestimento

Para o presente trabalho adotou-se o carregamento devido ao revestimento como sendo de  $1,0 \text{ kN/m}^2$ , para as lajes do 1º pavimento. Dada a usualidade deste no meio da construção civil, para a carga de revestimento na laje de cobertura considerou-se apenas as cargas atuantes devido ao forro, que pela norma já citada este valor pode ser adotado como sendo igual a  $0,5 \text{ kN/m}^2$ .

De posse dos valores de carregamento, foi possível determinar os momentos fletores incidentes sobre cada placa de laje. Para o cálculo dos momentos fletores positivos e negativos das lajes maciças foram utilizadas as Equações de 3.1 a 3.10, dependendo do tipo de armação da laje, além de outros dados como o carregamento atuante em cada pavimento, mostrados anteriormente.

A área de aço foi calculada de acordo com a Equação 3.15, para o aço do tipo CA – 50, onde foi levada em consideração uma área mínima de armadura de acordo com a NBR 6118 – 2014. Com a área de aço, foi possível determinar o diâmetro das armaduras positivas e negativas, a quantidade necessária de barras e também o espaçamento entre elas. Independentemente de a laje ser armada em uma única direção, foi adotada uma armadura mínima de distribuição para estes casos.

As reações de apoio nas vigas foram calculadas de acordo com as equações 3.17, 3.18, 3.19 e 3.20. Para isso, foi necessário analisar as condições de apoio, o carregamento atuante e valores adimensionais que constam no Anexo B deste trabalho. Os deslocamentos iniciais em cada placa de laje foram calculados considerando somente o efeito da fissuração do concreto. Para a realização deste cálculo utilizou-se a Equação 3.21. O efeito da fluência do concreto foi desconsiderado, uma vez que este só é aplicado no cálculo das flechas finais quando os deslocamentos são no máximo iguais a 2 cm, uma vez que o deslocamento seja maior que este valor os resultados encontrados para as flechas diferidas não são representativos. Com a utilização da Equação 3.23 foi feita a verificação da não necessidade de utilização de armadura de cisalhamento, pois as lajes em comparação com as vigas possuem alturas relativamente pequenas e a utilização deste tipo de armadura pode ser um problema no momento da execução.

#### 4.3 CÁLCULO E DIMENSIONAMENTO DAS LAJES PRÉ-FABRICADAS COM VIGOTAS TRELIÇADAS

O cálculo se dá a partir da consideração de que cada vigota treliçada atua separadamente, ou seja, como se fossem vigas simplesmente apoiadas do tipo T. Foi considerado ainda que o material de enchimento é constituído de lajotas cerâmicas de  $7 \times 30 \times 20$  cm e peso específico de  $18,0 \text{ kN/m}^3$ , já para o concreto armado foi considerado um peso específico de  $25,0 \text{ kN/m}^3$  e uma capa de 5 cm. Com as dimensões dos elementos e o peso específico dos materiais é possível encontrar o carregamento devido ao peso próprio da laje, uma vez que se considera a área de influência de cada vigota como sendo limitada pelo comprimento do entreixo, que é a distância do centro de uma lajota para outra, para este caso o entreixo encontrado foi de 42 cm.

Foi considerado ainda um peso de revestimento de  $1,0 \text{ kN/m}^2$  levando em conta a existência do revestimento cerâmico e do forro. Por se tratar de um escritório adotou-se os valores do carregamento accidental de acordo com a Tabela 2 da NBR 6120 - 2019 para salas de uso geral e banheiros, como sendo igual a  $2,0 \text{ kN/m}^2$ . Para a laje da cobertura o procedimento é análogo ao adotado na laje do primeiro pavimento, porém foi utilizado um carregamento por  $\text{m}^2$  de  $0,7 \text{ kN}$  considerando toda a estrutura do telhado (Madeiramento + telhas).

Os momentos fletores positivos atuantes em cada vigota foram calculados considerando a laje simplesmente apoiada. Tal situação fornece o pior caso de momento positivo estando desta maneira a favor da segurança. Para a obtenção deste esforço utilizou-se a Equação 3.27. Já os momentos fletores negativos foram calculados considerando haver uma continuidade das vigotas entre os painéis de lajes atuando, desta forma, também em favor da segurança. Estes valores foram encontrados com auxílio do software ftool.

Da mesma maneira que a laje maciça, a área de aço positiva e negativa da laje treliçada foi calculada de acordo com a Equação 3.15, porém para o aço do tipo CA – 60, e levando em consideração as características geométricas da seção do tipo T. Com a área de aço foi possível determinar o diâmetro das armaduras, a quantidade necessária de barras por inteiros, observando a necessidade, no caso das armaduras positivas, de se adicionar barras de flexão às vigotas treliçadas. Já no caso das armaduras negativas verificou-se a necessidade de se adicionar barras de aço por inteiros de laje, uma vez que foi considerada a existência de uma tela de aço, conhecida como malha pop. Esta tela é responsável por distribuir uniformemente as tensões através do pano de laje e também é capaz de resistir aos momentos negativos. Desta forma somente nos casos em que foram necessários adicionou-se armadura negativa.

As reações de apoio foram calculadas de acordo com as Equações 3.28 e 3.29, em que foi considerado que o carregamento nas vigas paralelas as vigotas seria 25% do carregamento atuante nas vigas perpendiculares a estas mesmas vigotas. Vale lembrar que não existem registros normativos sobre esta consideração. Já o cálculo das flechas iniciais das vigotas ocorreu da mesma forma que o cálculo das flechas da laje maciça, utilizando para este fim a Equação 3.21, porém foi levado em consideração as características geométricas da seção do tipo T mostradas na Figura 3.6. A verificação da laje pré-fabricada ao cisalhamento foi feita de maneira semelhante à das lajes maciças, porém utilizou-se a Equação número 3.30 deste trabalho, em que foi confirmada a não necessidade de armadura de cisalhamento.

#### 4.4 ANÁLISE DOS CUSTOS DE EXECUÇÃO DOS DOIS MODELOS DE LAJES ANALISADOS

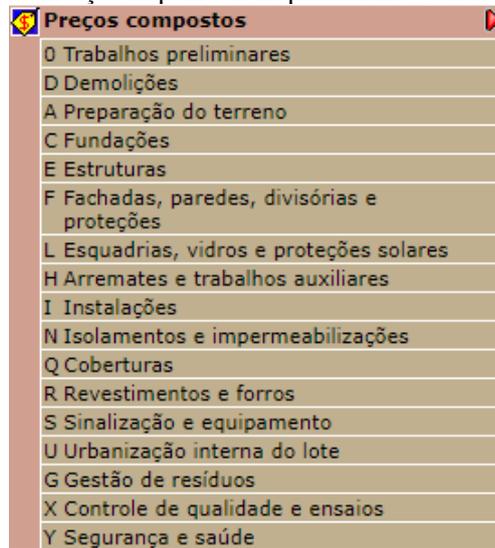
Para a realização da análise dos custos de cada modelo de laje foi utilizada a plataforma online “Gerador de Preços” da Cype Ingenieros, S. A., que é uma empresa espanhola atuante há mais de 35 anos no ramo de desenvolvimento de softwares para Engenharia e Arquitetura, como o CYPECAD, CYPE 3D, Controle de Obra, o próprio Gerador de Preços, entre outros.

O Gerador de Preços por sua vez é uma base de dados paramétrica e interativa, permitindo a obtenção de preços relacionados aos materiais, equipamentos, mão de obra e processos construtivos, selecionados para uma determinada obra. Vale salientar que a plataforma leva em consideração a região de execução da construção, para que desta forma os preços sejam tomados com base nos valores de mercado daquela localidade. Para este trabalho foi considerado que a obra aconteceria no Brasil, especificamente no estado da Paraíba (Figura 4.7).

**Figura 4.7 - Localização da obra.**

**Fonte:** Cype Ingenieros, S.A. (2020)

Após a escolha do local da obra é possível fazer a análise dos preços dos diversos serviços dentro de uma construção, como trabalhos preliminares, preparação do terreno, fundações, estruturas, fachadas, instalações, esquadrias, etc. Como um dos objetivos deste trabalho é a comparação dos custos de execução entre as lajes maciças e pré-moldadas com vigotas treliçadas, o serviço analisado foi o de estruturas. A figura 4.8 traz os serviços que a plataforma permite fazer a análise dos preços.

**Figura 4.8 - Serviços disponíveis na plataforma "Gerador de Preços".**

**Fonte:** Cype Ingenieros, S.A. (2020)

Dentro do item “Estruturas” são definidos os tipos de materiais que o sistema estrutural será executado, como concreto armado, estruturas metálicas, alvenaria, madeira, concreto pré-fabricado, estruturas mistas e estruturas com elementos especiais. Os dois modelos de lajes analisados no presente trabalho são compostos de concreto armado conforme mostra a Figura 4.9.

**Figura 4.9** - Elementos estruturais de concreto armado dentro da plataforma "Gerador de Preços".

EHE	Escadas
EHS	Pilares
EHV	Vigas
EHL	Lajes maciças
EHX	Lajes mistas
EHR	Lajes nervuradas bidirecionais
EHU	Lajes pré-fabricadas e nervuradas unidirecionais
EHB	Sistemas de lajes
EHM	Muros
EHN	Núcleos e pilares-parede
EHJ	Moldes, cavilhas e complementos
EHK	Preparação da superfície
EHO	Proteções
EHY	Reparações
EHH	Reforços com concreto
EHP	Reforços com perfis metálicos
EHZ	Reforços com laminados e folhas, de fibra de carbono
EHW	Ancoragens estruturais

**Fonte:** Cype Ingenieros, S.A. (2020)

Em seguida foram escolhidas as opções EHL “Lajes Maciças” e EHU “Lajes Pré-Fabricadas e Nervuradas Unidirecionais” para análise dos preços por m<sup>2</sup> dos dois modelos, (Figura 4.9). Nesta etapa a plataforma permite que sejam inseridas informações específicas acerca das lajes em estudo como propriedades geométricas, de materiais e técnicas executivas adotadas. Uma das informações mais importantes é a quantidade de aço por m<sup>2</sup> de concreto. Após a inserção de todas as informações necessárias o Gerador de Preços forneceu uma tabela com a descrição de todos os insumos e preços por unidade de área de cada um dos dois tipos de lajes abordados nesta pesquisa.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa do trabalho serão apresentados, comparados e discutidos todos os resultados encontrados durante a fase de pesquisa acerca dos momentos fletores, quantitativo de aço, flechas iniciais, reações de apoio das vigas e custos de execução para cada um dos dois modelos de lajes abordados pela pesquisa.

### 5.1 CARREGAMENTO INCIDENTE E MOMENTOS FLETORES ENCONTRADOS PARA CADA UM DOS MODELOS

As Tabelas 5.2 e 5.3 mostram os resultados obtidos para os momentos fletores, positivos e negativos, dos dois pavimentos de lajes analisados, levando em consideração os carregamentos incidentes sobre cada um dos pavimentos, mostrados na Tabela 5.1, e as equações já mencionadas anteriormente.

**Tabela 5.1** - Carregamentos Incidentes sobre cada um dos modelos de lajes analisados.

Pavimento	Carregamento na Laje Maciça (kN/m <sup>2</sup> )	Carregamento na Laje Pré-moldada com Vigotas Treliçadas (kN/m <sup>2</sup> )
Primeiro Pavimento	6,0	5,51
Cobertura	4,2	3,71

Fonte: Autor (2020)

De acordo com a Tabela 5.1, pode-se observar que o carregamento incidente sobre as lajes maciças é superior ao das lajes pré-fabricadas, tanto no primeiro como no pavimento da cobertura, em média, 9,61 %. Levando em consideração que o peso próprio da laje maciça é superior ao da laje pré-moldada, o resultado mostra-se coerente. Os valores encontrados para o carregamento foram utilizados no cálculo dos momentos fletores. Vale salientar que a laje pré-fabricada trabalha como uma viga isolada e, portanto, leva em consideração o carregamento por metro linear neste cálculo, bastando multiplicar, neste caso o carregamento por unidade de área pelo intereixo de 42 cm.

**Tabela 5.2** - Momentos Fletores das lajes do primeiro pavimento.

Lajes do Primeiro Pavimento	Momento Fletor Positivo das lajes Maciças (kN.m)	Momento Fletor Negativo das lajes Maciças (kN.m)	Momento Fletor Positivo das Lajes Pré-moldadas com Vigotas Treliçadas (kN.m)	Momento Fletor Negativo das Lajes Pré-moldadas com Vigotas Treliçadas (kN.m)
01	2,99	6,30	2,96	4
02	3,01	6,30	4,83	4
03	3,01	6,30	4,83	4

04	2,99	6,30	2,96	4
05	0,86	0	0,36	0

Fonte: Autor (2020)

**Tabela 5.3 - Momentos Fletores das lajes do pavimento cobertura.**

Lajes do Pavimento de cobertura	Momento Fletor Positivo das lajes Maciças (kN.m)	Momento Fletor Negativo das lajes Maciças (kN.m)	Momento Fletor Positivo das Lajes Pré-moldadas com Vigotas Treliçadas (kN.m)	Momento Fletor Negativo das Lajes Pré-moldadas com Vigotas Treliçadas (kN.m)
01	2,09	4,41	2,08	2,3
02	2,10	4,41	3,38	2,3
03	1,04	3,69	1,34	1,9
04	2,10	4,41	3,38	2,3
05	2,09	4,41	2,08	2,3

Fonte: Autor (2020)

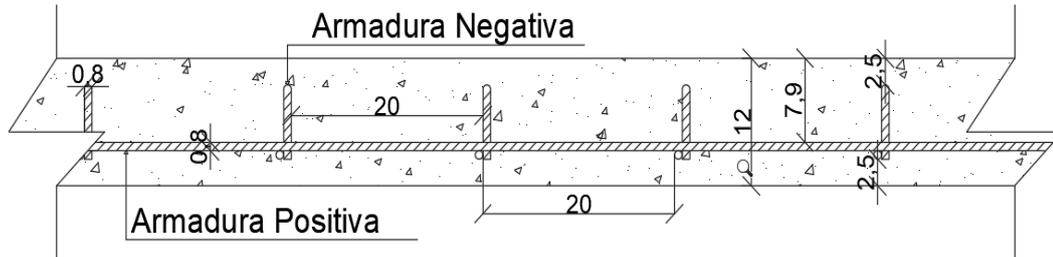
Pelos resultados apresentados na Tabela 5.2 observa-se que em média os valores dos momentos fletores positivos do primeiro pavimento de lajes pré-fabricadas são 19,62 % maiores que o das lajes maciças, enquanto os momentos fletores negativos nas lajes maciças são em média 36,5% maiores. Já para o pavimento da cobertura (Tabela 5.3), percebe-se que, em média, os momentos positivos são 22,86% maiores nas lajes pré-fabricadas, enquanto os momentos negativos são 43,82 % maiores para as lajes maciças deste mesmo pavimento.

Levando em consideração que o cálculo dos momentos positivos nas lajes pré-fabricadas foi efetuado considerando as vigotas como sendo simplesmente apoiadas, faz sentido a obtenção de valores maiores para os momentos positivos deste modelo de laje, uma vez que a rigidez deste é inferior. Já para os momentos negativos, a influência do peso próprio da laje maciça prevaleceu em relação a laje pré-fabricada.

## 5.2 QUANTITATIVO DE AÇO E DETALHAMENTO DAS ARMADURAS

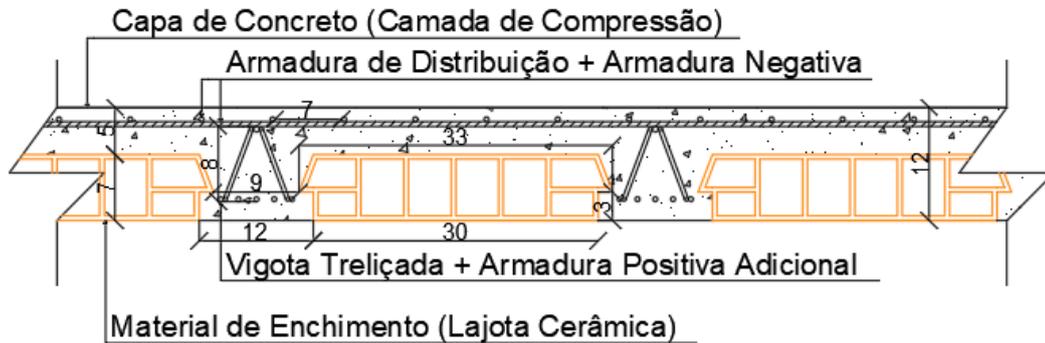
De posse dos valores dos momentos fletores foi possível encontrar a área de aço das armaduras positivas e negativas, para que desta forma fossem determinados o quantitativo de aço em kg, conforme apresentado na Tabela 5.4. Em seguida foi realizado o detalhamento das armaduras. As figuras 5.1 e 5.2 mostram o detalhamento da seção transversal da laje 01, do primeiro pavimento de laje maciça e treliçada, respectivamente.

**Figura 5.1** - Detalhamento do corte transversal da Laje Maciça 01 do Primeiro Pavimento.



Fonte: Autor (2020)

**Figura 5.2** - Detalhamento do corte transversal da laje pré-fabricada 01 do primeiro pavimento.



Fonte: Autor (2020)

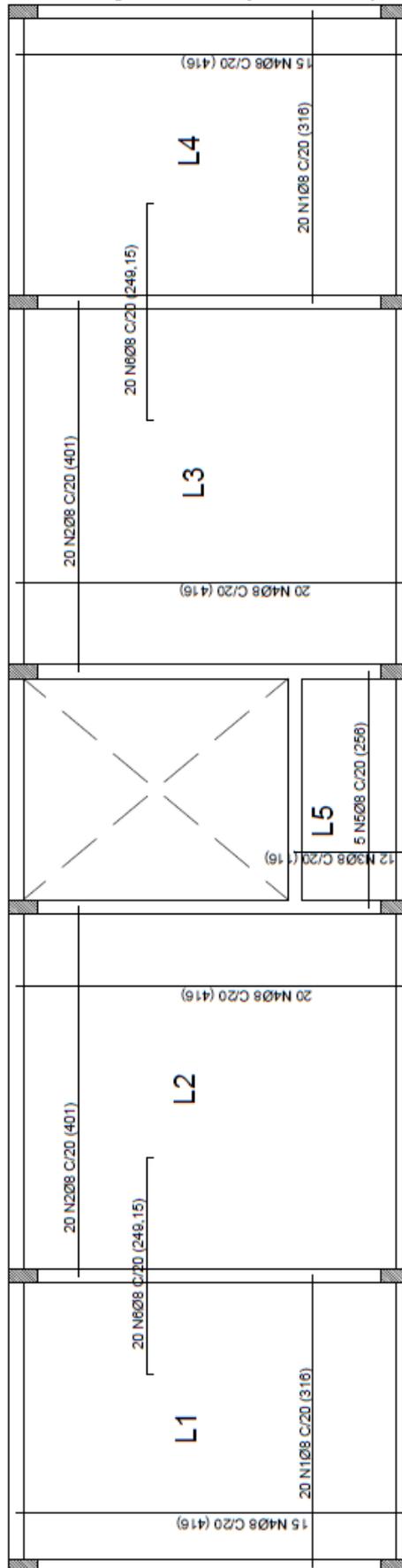
**Tabela 5.4** - Quantitativo de Aço

Pavimento	Quantitativo de aço da Laje Maciça (kg)	Quantitativo de aço da Laje Pré-moldada com Vigotas Treliçadas (kg)
Primeiro Pavimento	278,23	173,1
Cobertura	344,61	133,58
Total	622,84	306,68

Fonte: Autor (2020)

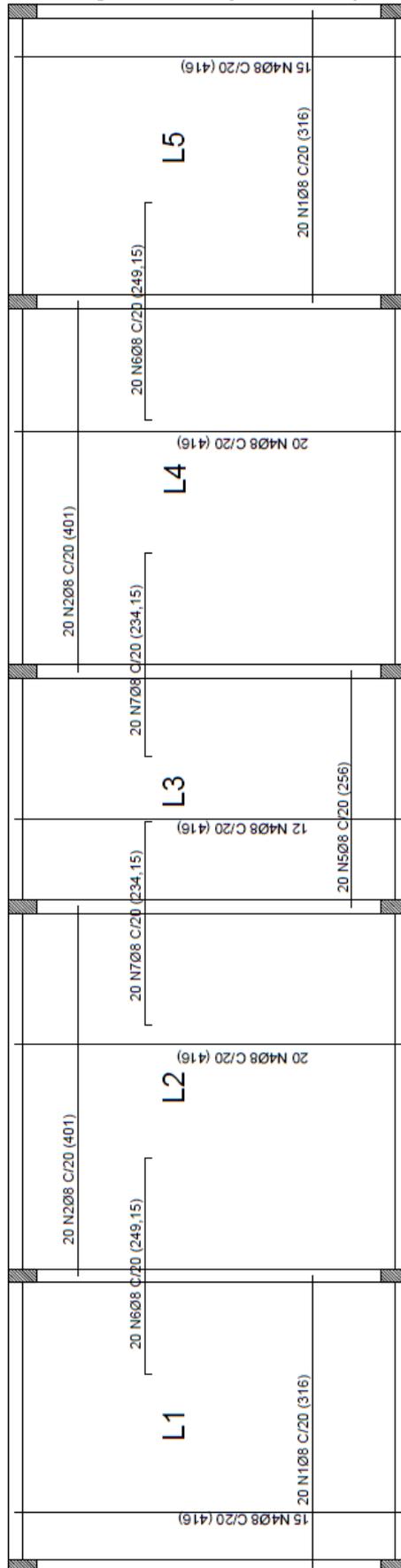
De acordo com a Tabela 5.4 observa-se que a laje maciça consome muito mais aço do que a laje pré-fabricada com vigotas treliçadas, em torno de 316,16 kg a mais. Este efeito ocorre principalmente pelo fato de a NBR 6118-2014 estabelecer uma área mínima de aço para a laje maciça que neste caso superou a área de aço da laje pré-moldada. As figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 mostram o detalhamento do pavimento da cobertura e do primeiro pavimento para os dois modelos de lajes contemplados nesta pesquisa.

**Figura 5.3** - Detalhamento das armaduras positivas e negativas das lajes maciças do primeiro pavimento.



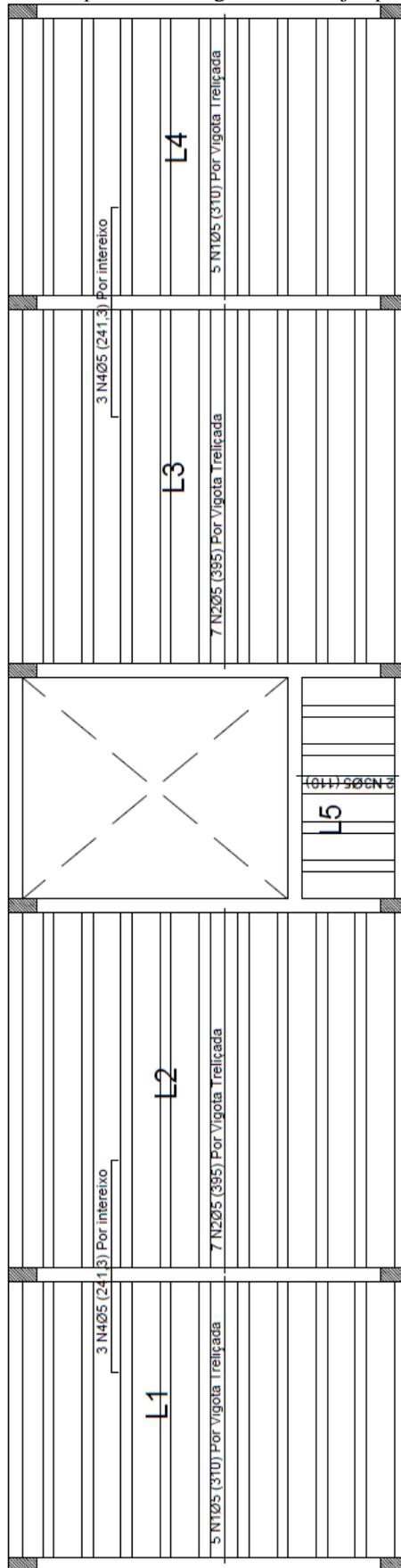
Fonte: Autor (2020)

**Figura 5.4** - Detalhamento das armaduras positivas e negativas das lajes maciças do pavimento da cobertura.



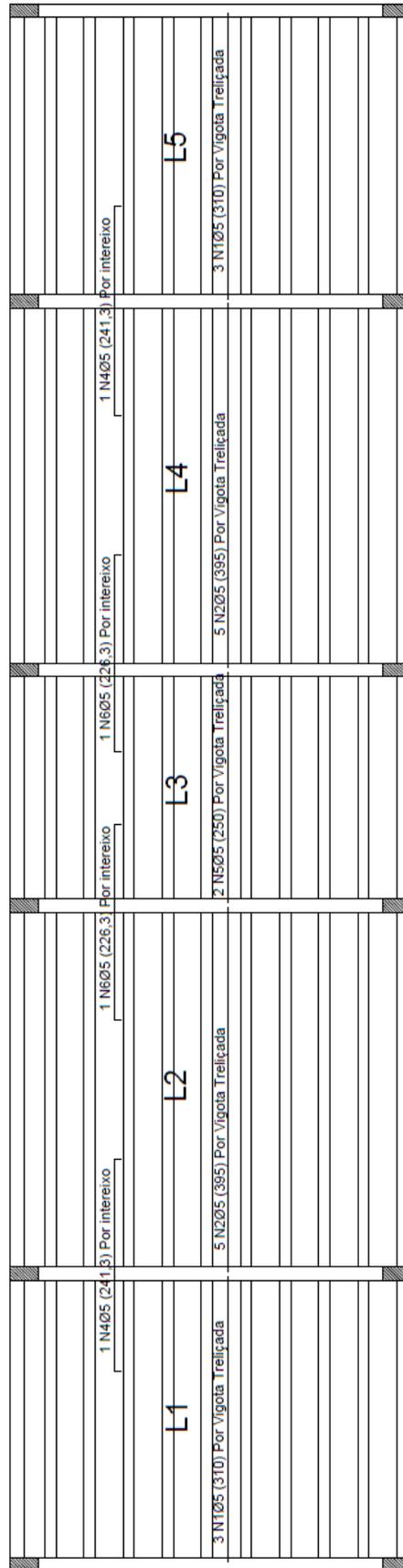
Fonte: Autor (2020)

Figura 5.5 - Detalhamento das armaduras positivas e negativas das lajes pré-fabricadas do primeiro pavimento.



Fonte: Autor (2020)

**Figura 5.6** - Detalhamento das armaduras positivas e negativas das lajes pré-fabricadas do pavimento da cobertura.



Fonte: Autor (2020)

### 5.3 FLECHAS INICIAIS DAS LAJES MACIÇAS E PRÉ-MOLDADAS COM VIGOTAS TRELIÇADAS

Após a realização dos procedimentos mostrados nos itens 4.2 e 4.3 deste trabalho, foi possível encontrar as flechas iniciais das lajes maciças e pré-moldadas para o primeiro pavimento e o pavimento da cobertura. Todos os valores das deformações constam nas Tabelas 5.5 e 5.6.

**Tabela 5.5** - Flechas iniciais em cada placa de laje maciça e pré-moldada do primeiro pavimento.

Lajes do Primeiro Pavimento	Deslocamentos da Laje Maciça (cm)	Deslocamentos da Laje Pré-moldada com Vigotas Trelaçadas (cm)
01	0,005734047	1,140777
02	0,015536367	2,500026
03	0,015536367	2,500026
04	0,005734047	1,140777
05	$2,04227 \times 10^{-06}$	0,000401

Fonte: Autor (2020)

**Tabela 5.6** - Flechas iniciais em cada placa de laje maciça e pré-moldada do pavimento da cobertura.

Lajes do Pavimento da Cobertura	Deslocamentos da Laje Maciça (cm)	Deslocamentos da Laje Pré-moldada com Vigotas Trelaçadas (cm)
01	0,001589935	1,19778
02	0,004308117	2,824483
03	$8,40318 \times 10^{-05}$	0,328604
04	0,004308117	2,824483
05	0,001589935	1,19778

Fonte: Autor (2020)

Com os resultados apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.6, observa-se que as lajes maciças possuem deformações bem menores que as lajes pré-moldadas com vigotas trelaçadas, apesar de seu carregamento ser maior devido ao peso próprio da mesma. Em média, esta deformação corresponde a cerca de 0,58% das deformações da laje pré-moldada no primeiro pavimento e é menor ainda no pavimento de cobertura correspondendo a 0,14% da laje pré-fabricada, como pode ser observado através dos valores demonstrados nas Tabelas 5.5 e 5.6, respectivamente. Nas lajes trelaçadas é bastante comum a utilização de contra flechas para que sejam respeitados

os limites estabelecidos pela NBR 6118 - 2014, uma vez que a rigidez destes elementos estruturais é relativamente pequena. Foi observado também que as placas de lajes pré-moldadas da cobertura possuem flechas maiores que as do primeiro pavimento do mesmo tipo, apesar de possuírem um carregamento menor, este fato pode ser explicado pela área de aço ser inferior na laje da coberta influenciando diretamente no cálculo das deformações.

De acordo com (Carvalho e Figueiredo Filho, 2014) as lajes treliçadas, tratando-se de deformações, tendem a atuar de forma intermediária, entre os elementos de placa e os elementos isolados, se aproximando mais destes últimos. Ainda segundo o autor, a laje maciça trabalha considerando o efeito de placa, ou seja, a rigidez é praticamente a mesma nas direções longitudinal e transversal, logo faz sentido que as deformações nas lajes pré-fabricadas sejam maiores que nas maciças uma vez que a rigidez neste tipo de laje é fornecida quase que inteiramente pela capa de concreto.

#### 5.4 REAÇÕES NAS VIGAS DE APOIO

Com a aplicação dos procedimentos mostrados nos itens 4.2 e 4.3 foi possível encontrar as reações incidentes sobre as vigas devido o carregamento dos dois modelos de lajes conforme mostram as Tabelas 5.7 e 5.8.

**Tabela 5.7** - Reações de apoio das vigas do primeiro pavimento para os dois modelos de lajes.

<b>Vigas do Primeiro Pavimento</b>	<b>Reações de apoio da Laje Maciça (kN/m)</b>	<b>Reações de apoio da Laje Pré-moldada com Vigotas Treliçadas (kN/m)</b>
01	3,39	2,70
02	3,22	2,95
03	3,39	2,70
04	4,89	8,46
05	16,96	19,27
06	2,79	11,54
07	2,79	11,54
08	16,96	19,27
09	4,89	8,46

**Fonte:** Autor (2020)

**Tabela 5.8** - Reações de apoio das vigas do pavimento cobertura para os dois modelos de lajes.

Vigas do Pavimento da Cobertura	Reações de apoio da Laje Maciça (kN/m)	Reações de apoio da Laje Pré-moldada com Vigotas Treliçadas (kN/m)
01	2,37	1,82
02	2,37	1,82
03	3,42	5,70
04	11,87	12,97
05	10,24	11,86
06	10,24	11,86
07	11,87	12,97
08	3,42	5,70

Fonte: Autor (2020)

Com os resultados apresentados nas tabelas anteriores e as plantas de formas, é possível observar que nas vigas dispostas paralelamente às vigotas o carregamento incidente é menor para as lajes do tipo pré-moldada, tanto no primeiro pavimento quanto na cobertura, em torno de 19,4%. Já nas dispostas perpendicularmente às vigotas, este carregamento é menor para as lajes maciças em ambos os pavimentos, cerca de 28,16%. O que acontece é que nas vigas paralelas as vigotas treliçadas, vigas 01, 02 e 03 do primeiro pavimento e 01 e 02 da cobertura, foi considerado uma carga de apenas 25% em relação ao carregamento sobre as vigas perpendiculares a estas mesmas vigotas em decorrência de uma pequena rigidez conferida pela capa de concreto. Caso não fosse considerada tal rigidez, apenas as vigas perpendiculares as vigotas seriam carregadas. Nas demais vigas o carregamento é menor para as lajes maciças, pois diferentemente da laje pré-moldada estas se comportam como elementos de placa, ou seja, há uma melhor distribuição dos carregamentos que a elas chegam para as vigas de apoio. No geral o modelo de laje maciça solicitou, em média 24,12% menos as vigas de apoio em relação as lajes pré-fabricadas. Os valores encontrados estão dentro do esperado, pois de acordo com (Carvalho e Figueiredo Filho, 2014) as lajes pré-fabricadas trabalham de forma intermediária entre os elementos de placa e os elementos isolados, distribuindo menos uniformemente os esforços que a elas chegam com relação as lajes maciças, mostrando desta forma o porquê das lajes pré-moldadas sofrerem mais com os efeitos vibratórios.

## 5.5 CUSTOS DE EXECUÇÃO POR METRO QUADRADO DA LAJE MACIÇA E PRÉ-MOLDADA

Para a realização desta etapa foi necessário fazer o levantamento da quantidade de aço em kg que cada um dos modelos de lajes consumiria durante sua execução, sendo essa a principal informação solicitada pela plataforma “Gerador de Preços” da Cype Ingenieros S.A.,

mencionada no t3pico 4.4. As Tabelas 5.9 e 5.10 mostram esses valores para os dois modelos de lajes estudados.

**Tabela 5.9** - Quantitativo de a3o da laje maci3a por m<sup>2</sup>.

Pavimento	3rea total de superf3cie (m <sup>2</sup> )	Quantidade de a3o (kg)	Quantidade de A3o por m <sup>2</sup> (kg/m <sup>2</sup> )
Primeiro Pavimento	66,26	278,23	4,2
Pavimento da Cobertura	73,10	344,61	4,71

Fonte: Autor (2020)

**Tabela 5.10** - Quantitativo de a3o da laje pr3-fabricada por m<sup>2</sup>.

Pavimento	3rea total de superf3cie (m <sup>2</sup> )	Quantidade de a3o (kg)	Quantidade de A3o por m <sup>2</sup> (kg/m <sup>2</sup> )
Primeiro Pavimento	66,26	173,09	2,61
Pavimento da Cobertura	73,10	133,59	1,83

Fonte: Autor (2020)

Podemos observar que a laje maci3a consome, em sua execu33o, uma maior quantidade de a3o, em m3dia 2,235 kg/m<sup>2</sup> a mais que a laje pr3-fabricada. De posse das taxas de a3o 3 poss3vel a realiza33o do or3amento atrav3s da plataforma j3 mencionada, onde s3o fornecidos os custos de materiais e m3o de obra necess3rios a execu33o das lajes. As Tabelas 5.11 e 5.12, mostram a descri33o, rendimento, custo unit3rio e custo final dos insumos utilizados para os dois pavimentos executados em lajes maci3as.

**Tabela 5.11** - Descrição dos Insumos e custos por m<sup>2</sup> da laje maciça do primeiro pavimento.

Item	Descrição	Unidade	Rendimento	Custo unitário	Custo final
1	Concreto C25 classe de agressividade ambiental II e tipo de ambiente urbano, brita 1, consistência S100, dosado em central, segundo ABNT NBR 8953	m <sup>3</sup>	0,126	R\$305,29	R\$38,47
2	Aço em barras nervuradas, CA-50, de vários diâmetros, segundo ABNT NBR 7480	kg	4,41	R\$4,60	R\$20,29
3	Montador de formas	h	0,817	R\$16,74	R\$13,68
4	Ajudante de montador de formas	h	0,817	R\$12,66	R\$10,34
5	Caminhão bomba estacionado na obra para bombeamento do concreto	h	0,013	R\$478,71	R\$6,22
6	Tábua de madeira serrada, de pinos (pinos spp), de 2,5x20 cm, de segunda qualidade, segundo ABNT NBR 11700.	m	0,48	R\$9,40	R\$4,51
7	Armador	h	0,099	R\$16,74	R\$1,66
8	Pontaletes de madeira serrada, de pinos (pinos spp), de 7,5x7,5 cm, de segunda qualidade, segundo ABNT NBR 11700.	m	0,167	R\$9,06	R\$1,51
9	Painel de madeira compensada, resinado de 12 mm de espessura, com faces e bordas retas revestidas com resina fenólica, segundo NBR ISO 1096	m <sup>2</sup>	0,083	R\$17,84	R\$1,48
10	Ajudante de armador	h	0,092	R\$12,66	R\$1,16
11	Escora metálica telescópica até 3 m de altura	UND	0,013	R\$55,15	R\$0,72
12	Separador certificado para lajes maciças	UND	3	R\$0,22	R\$0,66
13	Ajudante de trabalhos de concretagem	h	0,036	R\$12,66	R\$0,46
14	Arame galvanizado para atar, de 1,3 mm de diâmetro	kg	0,07	R\$2,49	R\$0,17
15	Pregos comuns 17x21 com cabeça, de 3 mm de diâmetro e 48 mm de comprimento	kg	0,04	R\$3,86	R\$0,15
16	Oficial de trabalhos de concretagem	h	0,009	R\$16,74	R\$0,15
17	Agente desmoldante, a base de óleos especiais emulsionante em águas para formas metálicas, fenólicas ou de madeira	l	0,03	R\$4,47	R\$0,13
18	Água	m <sup>3</sup>	0,005	R\$3,39	R\$0,02
				<b>TOTAL</b>	<b>R\$101,79</b>

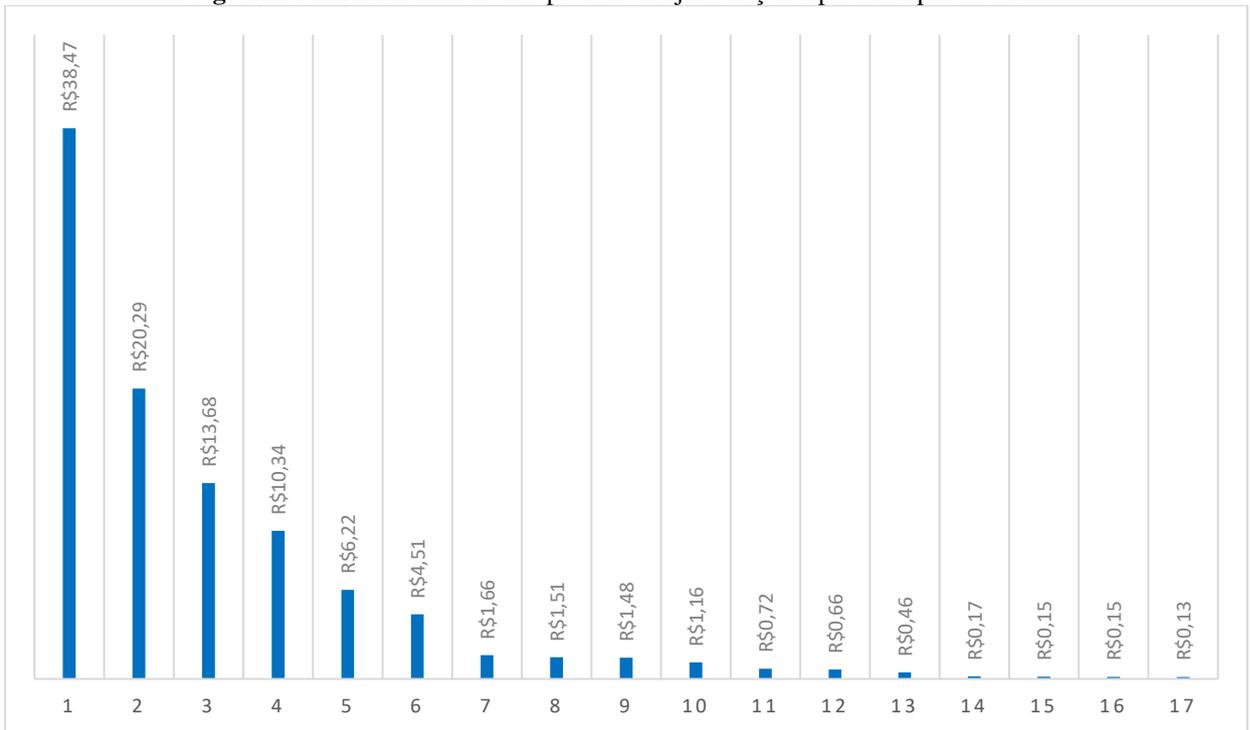
**Fonte:** Autor (2020)

**Tabela 5.12** - Descrição dos Insumos e custos por m<sup>2</sup> da laje maciça da cobertura.

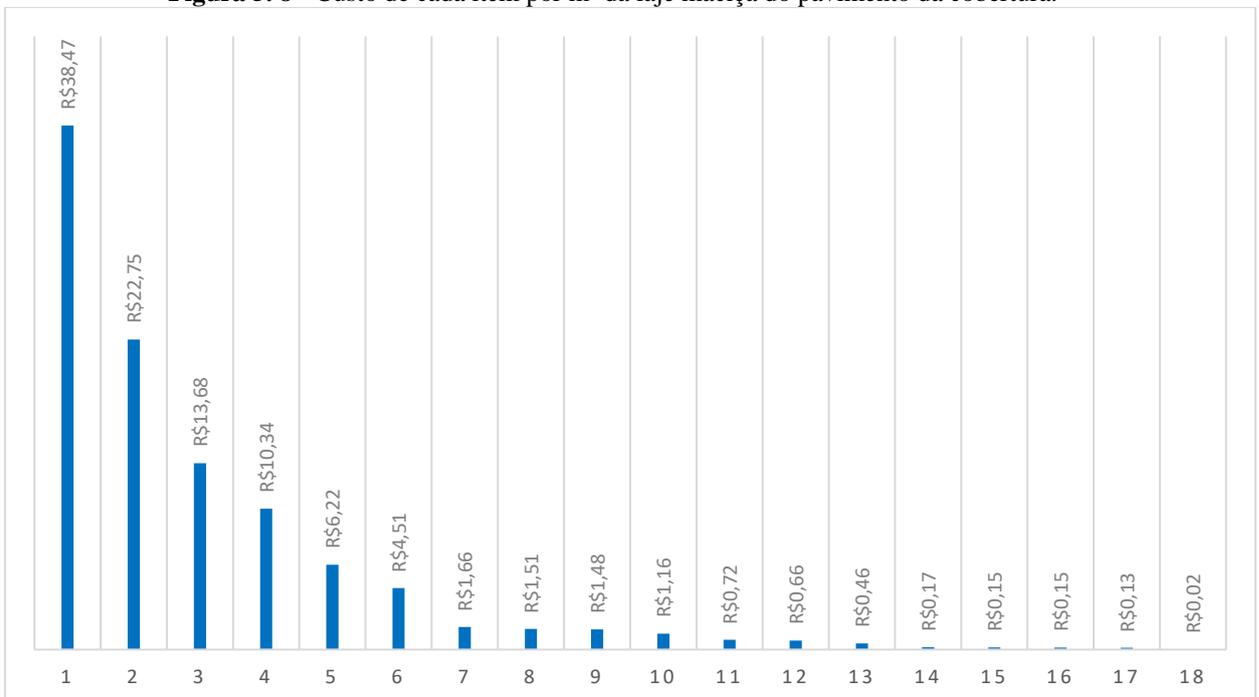
Item	Descrição	Unidade	Rendimento	Custo unitário	Custo final
01	Concreto C25 classe de agressividade ambiental II e tipo de ambiente urbano, brita 1, consistência S100, dosado em central, segundo ABNT NBR 8953	m <sup>3</sup>	0,126	R\$305,29	R\$38,47
02	Aço em barras nervuradas, CA-50, de vários diâmetros, segundo ABNT NBR 7480	kg	4,9455	R\$4,60	R\$22,75
03	Montador de formas	h	0,817	R\$16,74	R\$13,68
04	Ajudante de montador de formas	h	0,817	R\$12,66	R\$10,34
05	Caminhão bomba estacionado na obra para bombeamento do concreto	h	0,013	R\$478,71	R\$6,22
06	Tábua de madeira serrada, de pinos (pinos spp), de 2,5x20 cm, de segunda qualidade, segundo ABNT NBR 11700.	m	0,48	R\$9,40	R\$4,51
07	Armador	h	0,099	R\$16,74	R\$1,66
08	Pontaletes de madeira serrada, de pinos (pinos spp), de 7,5x7,5 cm, de segunda qualidade, segundo ABNT NBR 11700.	m	0,167	R\$9,06	R\$1,51
09	Painel de madeira compensada, resinado de 12 mm de espessura, com faces e bordas retas revestidas com resina fenólica, segundo NBR ISO 1096	m <sup>2</sup>	0,083	R\$17,84	R\$1,48
10	Ajudante de armador	h	0,092	R\$12,66	R\$1,16
11	Escora metálica telescópica até 3 m de altura	UND	0,013	R\$55,15	R\$0,72
12	Separador certificado para lajes maciças	UND	3	R\$0,22	R\$0,66
13	Ajudante de trabalhos de concretagem	h	0,036	R\$12,66	R\$0,46
14	Arame galvanizado para atar, de 1,3 mm de diâmetro	kg	0,07	R\$2,49	R\$0,17
15	Pregos comuns 17x21 com cabeça, de 3 mm de diâmetro e 48 mm de comprimento	kg	0,04	R\$3,86	R\$0,15
16	Oficial de trabalhos de concretagem	h	0,009	R\$16,74	R\$0,15
17	Agente desmoldante, a base de óleos especiais emulsionante em águas para formas metálicas, fenólicas ou de madeira	l	0,03	R\$4,47	R\$0,13
18	Água	m <sup>3</sup>	0,005	R\$3,39	R\$0,02
				<b>TOTAL</b>	<b>R\$104,25</b>

**Fonte:** Autor (2020)

Dos valores fornecidos pelas Tabelas 5.11 e 5.12 observa-se que o custo do m<sup>2</sup> da laje maciça da cobertura se sobressaiu em relação a laje do primeiro pavimento. Isso se deu em função da maior taxa de aço encontrada para este pavimento (Tabela 5.5). Os gráficos das Figuras 5.7 e 5.8 trazem de forma mais sucinta o custo de cada item, apresentados nas Tabelas 5.11 e 5.12, por m<sup>2</sup>.

**Figura 5.7** - Custo de cada item por m<sup>2</sup> da laje maciça do primeiro pavimento.

Fonte: Autor (2020)

**Figura 5.8** - Custo de cada item por m<sup>2</sup> da laje maciça do pavimento da cobertura.

Fonte: Autor (2020)

Os custos de execução para as lajes pré-moldadas foram obtidos seguindo a mesma metodologia, de acordo com as Tabelas 5.13 e 5.14.

**Tabela 5.13** - Descrição dos Insumos e custos por m<sup>2</sup> da laje pré-moldada do primeiro pavimento.

Item	Descrição	Unidade	Rendimento	Custo unitário	Custo final
01	Concreto C25 classe de agressividade ambiental II e tipo de ambiente urbano, brita 1, consistência S100, dosado em central, segundo ABNT NBR 8953	m <sup>3</sup>	0,072	305,29	R\$21,98
02	Tela Eletrosoldada Q 196x20x20 cm com fios longitudinais de 5 mm e fios transversais de 5 mm de diâmetro, aço CA - 60, segundo ABNT NBR 7481.	m <sup>2</sup>	1,1	16,43	R\$18,07
03	Vigota com armadura treliçada (VT), de 12x8 cm de seção e até 4 m de comprimento, segundo ABNT NBR 14859-1 e ABNT NBR 14859-3	m	2,5	6,99	R\$17,48
04	Aço em fios nervurados, CA-60, de vários diâmetros, segundo ABNT NBR 7480	kg	2,743	5,05	R\$13,85
05	Lajota cerâmica (LC) 7x27x20 cm segundo ABNT NBR 14859-2.	UND	12,5	0,59	R\$7,38
06	Tábua de madeira serrada, de pinos (pinos spp), de 2,5x10 cm, de 3ª qualidade, segundo ABNT NBR 11700.	m <sup>3</sup>	1,414	4,46	R\$6,31
07	Caminhão bomba estacionado na obra para bombeamento do concreto	h	0,011	478,71	R\$5,27
08	Armador	h	0,044	16,74	R\$0,74
09	Escora metálica telescópica até 3 m de altura	UND	0,013	55,15	R\$0,72
10	Ajudante de armador	h	0,048	12,66	R\$0,61
11	Ajudante de trabalhos de concretagem	h	0,029	12,66	R\$0,37
12	Oficial de trabalhos de concretagem	h	0,007	16,74	R\$0,12
13	Pregos comuns 17x21 com cabeça, de 3 mm de diâmetro e 48 mm de comprimento	kg	0,03	3,86	R\$0,12
14	Arame galvanizado para atar, de 1,3 mm de diâmetro	kg	0,031	2,49	R\$0,08
15	Água	m <sup>3</sup>	0,005	3,39	R\$0,02
				Total	R\$93,08

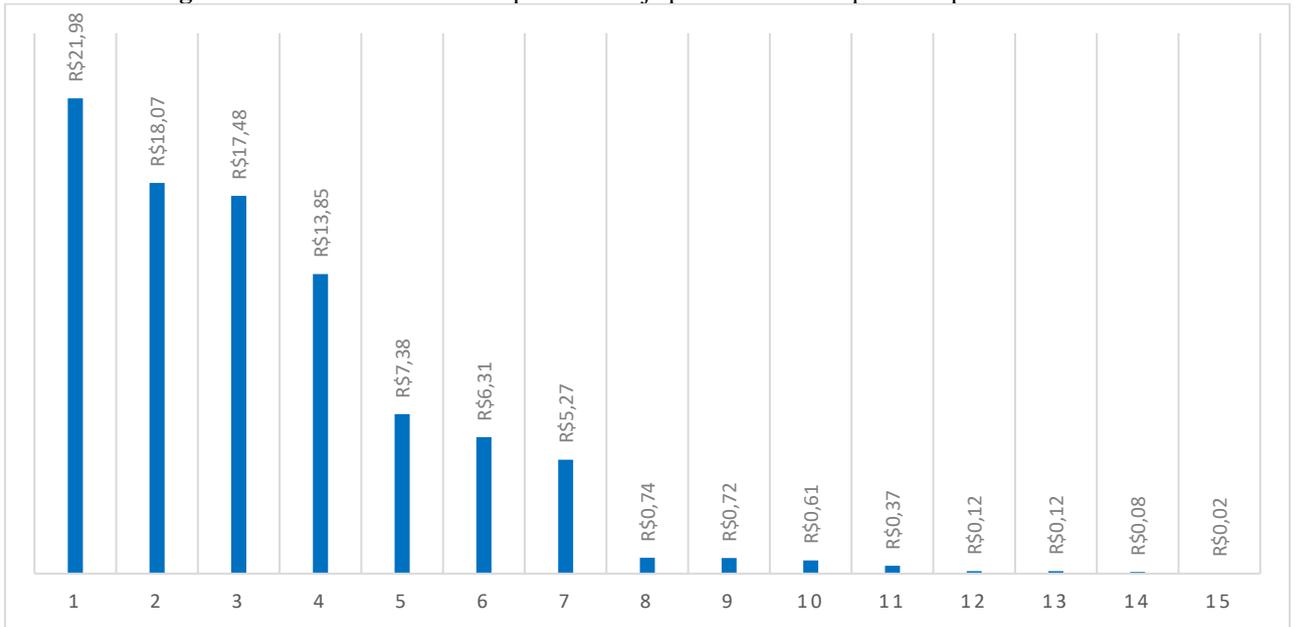
Fonte: Autor (2020)

**Tabela 5.14** - Descrição dos Insumos e custos por m<sup>2</sup> da laje pré-moldada do pavimento da cobertura.

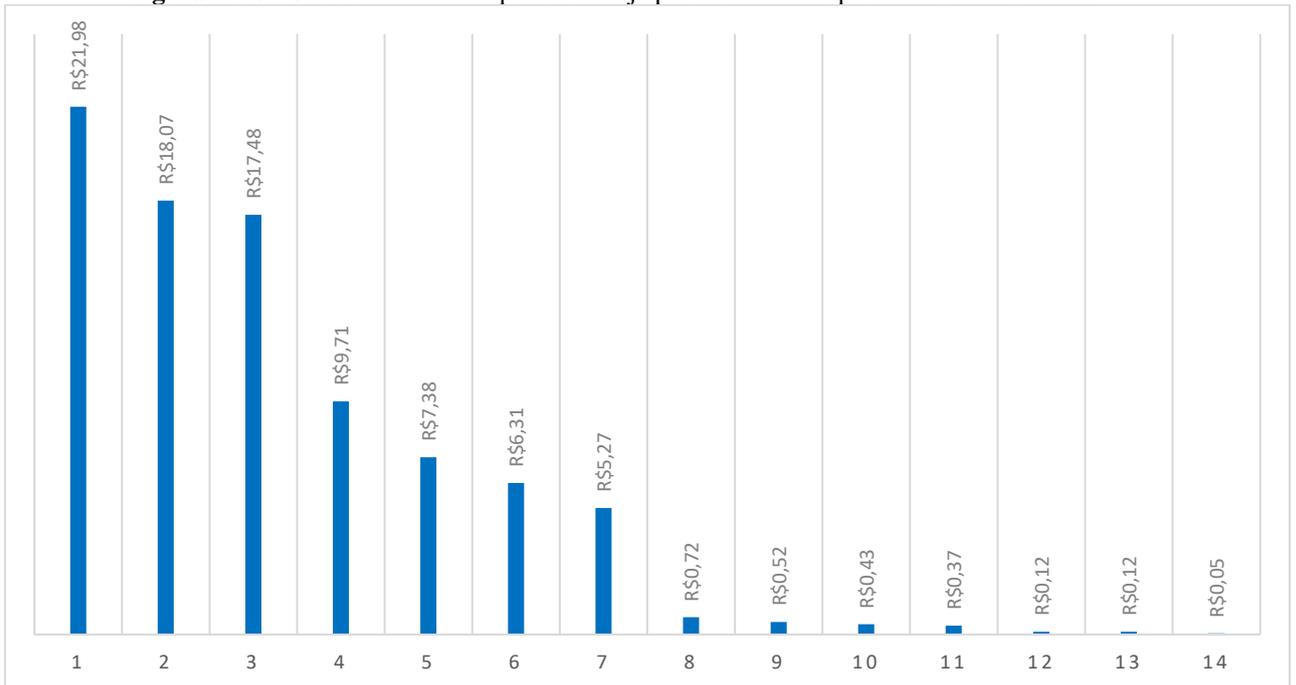
Item	Descrição	Unidade	Rendimento	Custo unitário	Custo final
01	Concreto C25 classe de agressividade ambiental II e tipo de ambiente urbano, brita 1, consistência S100, dosado em central, segundo ABNT NBR 8953	m <sup>2</sup>	0,072	305,29	R\$21,98
02	Tela Eletrosoldada Q 196x20x20 cm com fios longitudinais de 5 mm e fios transversais de 5 mm de diâmetro, aço CA - 60, segundo ABNT NBR 7481.	m	1,1	16,43	R\$18,07
03	Vigota com armadura treliçada (VT), de 12x8 cm de seção e até 4 m de comprimento, segundo ABNT NBR 14859-1 e ABNT NBR 14859-3	kg	2,5	6,99	R\$17,48
04	Aço em fios nervurados, CA-60, de vários diâmetros, segundo ABNT NBR 7480	UND	2,743	5,05	R\$9,71
05	Lajota cerâmica (LC) 7x27x20 cm segundo ABNT NBR 14859-2.	m <sup>3</sup>	12,5	0,59	R\$7,38
06	Tábua de madeira serrada, de pinos (pinos spp), de 2,5x10 cm, de 3ª qualidade, segundo ABNT NBR 11700.	h	1,414	4,46	R\$6,31
07	Caminhão bomba estacionado na obra para bombeamento do concreto	h	0,011	478,71	R\$5,27
08	Armador	UND	0,044	55,15	R\$0,72
09	Escora metálica telescópica até 3 m de altura	h	0,013	16,74	R\$0,52
10	Ajudante de armador	h	0,048	12,66	R\$0,43
11	Ajudante de trabalhos de concretagem	h	0,029	12,66	R\$0,37
12	Pregos comuns 17x21 com cabeça, de 3 mm de diâmetro e 48 mm de comprimento	kg	0,03	3,86	R\$0,12
13	Oficial de trabalhos de concretagem	kg	0,007	16,74	R\$0,12
14	Arame galvanizado para atar, de 1,3 mm de diâmetro	m <sup>3</sup>	0,031	2,49	R\$0,05
15	Água	m <sup>3</sup>	0,005	3,39	R\$0,02
				TOTAL	R\$88,55

Fonte: Autor (2020)

Para as lajes pré-moldadas verifica-se que mais uma vez a taxa de aço (Tabela 5.10) está diretamente ligada ao custo final do m<sup>2</sup>, onde se tem um valor maior para a laje pré-moldada do primeiro pavimento com relação a da cobertura. Os gráficos das figuras 3 e 4 mostram os custos de cada item, apresentados nas tabelas 13 e 14, de forma mais simplificada.

**Figura 5.9** - Custo de cada item por m<sup>2</sup> da laje pré-fabricada do primeiro pavimento.

Fonte: Autor (2020)

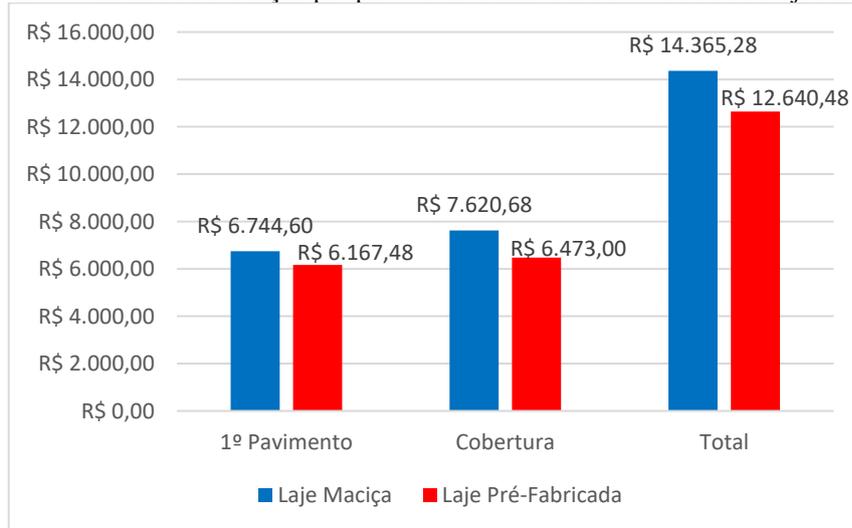
**Figura 5.10** - Custo de cada item por m<sup>2</sup> da laje pré-fabricada do pavimento da cobertura.

Fonte: Autor (2020)

Para análise dos custos dos dois modelos, foi feita a divisão por pavimentos em que se verificou que o custo de execução da laje maciça é superior nos dois andares abordados. Com base nos resultados apresentados nas tabelas 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 constatou-se que no pavimento primeiro, com área de 66,26 m<sup>2</sup>, a diferença de custos da laje maciça para a laje treliçada foi de R\$ 577,12, cerca de 8,56% mais onerosa. Já para a cobertura, com área de 73,1

m<sup>2</sup> esta diferença foi ainda maior, R\$ 1147,67, aproximadamente 15,06%. Estimou-se desta forma que a laje treliçada teria um custo final de execução de R\$12640,49, enquanto a maciça de R\$14365,28, conforme apresenta o gráfico 5. Em média o custo de implantação da laje pré-moldada no edifício comercial foi 14,34% menos oneroso que a laje maciça, gerando uma diferença ao final de R\$1724,79.

**Figura 5. 11** - Custos de execução por pavimento e total dos dois modelos de lajes abordados.



**Fonte:** Autor (2020)

Um dos fatores que mais influenciaram para esta desigualdade, antes apresentada, foi a necessidade da utilização de formas pelas lajes maciças, pois além do gasto com madeira, material considerado caro na região paraibana, existe a mão de obra responsável pela execução deste tipo de serviço. Verifica-se no entanto que o principal fator é o concreto, pois enquanto a laje maciça é completamente concretada a pré-fabricada utiliza as lajotas, que também fazem o papel das formas, como material de enchimento, economizando um grande volume de concreto na zona tracionada que se localiza abaixo da linha neutra, como a lajota cerâmica é mais barata que o concreto há um grande ganho econômico neste aspecto.

A quantidade de aço consumida também é fundamental para a diferença nos custos. Observa-se que o gasto com este material na laje maciça é superior ao da pré-moldada, como foi possível constatar por meio das figuras 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11. Os resultados encontrados para os custos são coerentes com as ideias de (Ferreira, 2015), onde o mesmo afirma que as lajes que utilizam material inerte como elemento de enchimento diminuem consideravelmente a utilização de formas e escoramento, possuem maior facilidade de execução e levam menos tempo para serem finalizadas, reduzindo desta forma seu custo final.

## 6 CONCLUSÃO

A pesquisa realizada comparou dois modelos estruturais de lajes dentro da ótica estrutural e econômica, averiguando desta forma os deslocamentos iniciais, influência destes elementos sobre as vigas de apoio e os custos de implantação de cada um dos modelos abordados.

Com base em todos os resultados apresentados e analisados, concluiu-se que do ponto de vista estrutural as lajes maciças possuem vantagens com relação as lajes pré-fabricadas, dentre elas, um menor deslocamento e uma menor solicitação na maior parte das vigas de apoio. Este fato ocorre em virtude das características das lajes maciças de se comportarem como um elemento de placa, fazendo com que os carregamentos que até elas cheguem sejam uniformemente distribuídos em toda a sua superfície. Já o modelo de laje pré-moldado se assemelha mais da hipótese denominada de “elementos isolados”, onde apenas a capa de concreto fornece uma pequena rigidez ao sistema, fazendo com que este tipo de laje trabalhe de forma intermediária entre os elementos de placa e os elementos isolados. Esta característica das lajes treliçadas também é responsável por ocasionar os chamados efeitos vibratórios, que em muitos casos podem se tornar incômodos ao usuário, diferentemente da laje maciça que absorve melhor estes efeitos.

Do ponto de vista econômico, tratando-se apenas deste elemento estrutural, as lajes pré-fabricadas com vigotas treliçadas levam vantagem sobre as lajes maciças em virtude da economia de concreto na região tracionada, a não utilização dos elementos de formas de madeira, uma vez que este material é considerado caro para a região que contempla o objeto de estudo e também por possuírem uma menor taxa de aço em seu modelo construtivo.

Contudo não se pode afirmar que de maneira geral o sistema estrutural executado com as lajes pré-fabricadas possui vantagens econômicas sobre o mesmo sistema executado com lajes maciças, pois de acordo com os resultados obtidos, as lajes maciças solicitaram 24,12% menos as vigas do prédio comercial analisado do que as lajes pré-moldadas com vigotas treliçadas, isso para as vigas de apoio. Logo se torna evidente que deve ser analisada a influência que cada um destes modelos de lajes exerce em todo o restante da estrutura, pois uma vez que as vigas são menos carregadas o mesmo acontece com os pilares e também com os elementos de fundações tornando a estrutura como um todo menos onerosa. Portanto se faz necessário avaliar o impacto sofrido por todos os elementos estruturais, para que desta forma decida-se sobre qual técnica é economicamente viável para ser aplicada a cada situação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado**. 4. ed. 1 v. Rio Grande do Sul: Dunas, 2014.
- ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado**. 4. ed. 2 v. Rio Grande do Sul: Dunas, 2014.
- ARCELOR, Belgo Grupo. **Manual Técnico de Lajes Treliçadas**. Maracanaú: Belgo, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Ações Para o Cálculo de Estruturas de Edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14859-1: Lajes Pré-Fabricadas de Concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14862: Armaduras Treliçadas Eletro soldadas - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931: Execução de Estruturas de Concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- BASTOS, Paulo SÉRGIO dos Santos. **Lajes de Concreto**. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2015.
- CAMPOS FILHO, Américo. **Projeto de Lajes Maciças de Concreto Armado**. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014. 45 p.
- CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado Segundo A NBR 6118:2014**. 4. ed. São Carlos: Edufscar - Editora da Universidade Federal de São Carlos, 2014.
- COSTA, O.V. (1997). **Estudo de alternativas de projetos estruturais em concreto armado para uma mesma edificação**. Fortaleza, Dissertação (Mestrado) – UFC.
- FERREIRA, Rafael Martins. **Laje nervurada unidirecional com pré-laje treliçada e elemento de enchimento**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- KIM, S. Elliott. **Precast Concrete Structures**. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2002.

- LIMMER, C. V. **Planejamento, Orçamentação e Controle de Projetos e Obras**. Editora LTC. 225 pág. Rio de Janeiro: 1997
- MARÇAL, Ana Russowsky. **Estudo de Lajes de Concreto Armado: Comparativo de Cálculo Entre Lajes Treliçadas e Maciças, Utilizando Método Elástico**. 2014. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rs, Brasil, 2014.
- MELO, C.E.E. (2004). **Manual Munte de Projetos em Pré- Fabricados de Concreto/ Munte Construções Industrializadas**. São Paulo. Editora Pini.
- PINHEIRO, Libânio M.. **Lajes Maciças – Capítulo 11**. In: PINHEIRO, Libânio M.. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007. p. 1-29.
- PINHEIRO, Libânio M.. **Aderência e Ancoragem – Capítulo 10**. In: PINHEIRO, Libânio M.. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007. p. 1-16.
- SILVA, Adriano Mariot da; DARÉ, Mônica Elizabeth. **CUSTO COMPARADO DE ELEMENTOS PRÉ-FABRICADOS DE CONCRETO: PRÉ-LAJE PROTENDIDA X LAJE ALVEOLAR PROTENDIDA**. 2011. 15 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unesc - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2011.
- SILVA, Kássio et al. **A composição de custos na construção civil**. *Revista Pensar Engenharia*, Minas Gerais, v. 3, n. 1, p.1-18, jan. 2015.
- SPOHR, V. H. **Análise comparativa: sistemas estruturais convencionais e estruturas de lajes nervuradas**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, 2008.

**ANEXOS**

ANEXO A – QUADROS DE CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO (2014) PARA O CÁLCULO DOS MOMENTOS FLETORES EM LAJES MACIÇAS ARMADAS EM DUAS DIREÇÕES

$\lambda$	Caso 1		Caso 2			Caso 3		
	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu_z$	$\mu_x$	$\mu_z$	$\mu_y$
1,00	4,41	4,41	3,07	3,94	8,52	3,94	8,52	3,07
1,05	4,80	4,45	3,42	3,78	8,79	4,19	8,91	2,84
1,10	5,18	4,49	3,77	3,90	9,18	4,43	9,30	2,76
1,15	5,56	4,49	4,14	3,97	9,53	4,64	9,63	2,68
1,20	5,90	4,48	4,51	4,05	9,88	4,85	9,95	2,59
1,25	6,27	4,45	4,88	4,10	10,16	5,03	10,22	2,51
1,30	6,60	4,42	5,25	4,15	10,41	5,20	10,48	2,42
1,35	6,93	4,37	5,60	4,18	10,64	5,36	10,71	2,34
1,40	7,25	4,33	5,95	4,21	10,86	5,51	10,92	2,25
1,45	7,55	4,30	6,27	4,19	11,05	5,64	11,10	2,19

$\lambda$	Caso 1		Caso 2			Caso 3		
	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu_z$	$\mu_x$	$\mu_z$	$\mu_y$
1,50	7,86	4,25	6,60	4,18	11,23	5,77	11,27	2,12
1,55	8,12	4,20	6,90	4,17	11,39	5,87	11,42	2,04
1,60	8,34	3,14	7,21	4,14	11,55	5,98	11,55	1,95
1,65	8,62	4,07	7,42	4,12	11,67	6,07	11,67	1,87
1,70	8,86	4,00	7,62	4,09	11,79	6,16	11,80	1,79
1,75	9,06	3,96	7,66	4,05	11,88	6,24	11,92	1,74
1,80	9,27	3,91	7,69	3,99	11,96	6,31	12,04	1,68
1,85	9,45	3,83	8,22	3,97	12,03	6,38	12,14	1,64
1,90	9,63	3,75	8,74	3,94	12,14	6,43	12,24	1,59
1,95	9,77	3,71	8,97	3,88	12,17	6,47	12,29	1,54
2,00	10,00	3,64	9,18	3,80	12,20	6,51	12,34	1,48
$\infty$	12,57	3,77	9,18	3,80	12,20	7,61	12,76	1,48

## ANEXO A – CONTINUAÇÃO...

$\lambda$	Caso 4				Caso 5			Caso 6		
	$\mu_x$	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu_y$	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu_y$	$\mu_x$	$\mu_x$	$\mu_y$
1,00	2,81	6,99	2,81	6,99	2,15	3,17	6,99	3,17	6,99	2,15
1,05	3,05	7,43	2,81	7,18	2,47	3,32	7,43	3,29	7,20	2,07
1,10	3,30	7,87	2,81	7,36	2,78	3,47	7,87	3,42	7,41	1,99
1,15	3,53	8,28	2,80	7,50	3,08	3,58	8,26	3,52	7,56	1,89
1,20	3,76	8,69	2,79	7,63	3,38	3,70	8,65	3,63	7,70	1,80
1,25	3,96	9,03	2,74	7,72	3,79	3,80	9,03	3,71	7,82	1,74
1,30	4,16	9,37	2,69	7,81	4,15	3,90	9,33	3,79	7,93	1,67
1,35	4,33	9,65	2,65	7,88	4,50	3,96	9,69	3,84	8,02	1,59
1,40	4,51	9,93	2,60	7,94	4,85	4,03	10,00	3,90	8,11	1,52
1,45	4,66	10,41	2,54	8,00	5,19	4,09	10,25	3,94	8,13	1,45
1,50	4,81	10,62	2,47	8,06	5,53	4,14	10,49	3,99	8,15	1,38

$\lambda$	Caso 4				Caso 5			Caso 6		
	$\mu_x$	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu_y$	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu_y$	$\mu_x$	$\mu_x$	$\mu_y$
1,55	4,93	10,82	2,39	8,09	5,86	4,16	10,70	4,03	8,20	1,34
1,60	5,06	10,99	2,31	8,12	6,18	4,17	10,91	4,06	8,25	1,28
1,65	5,16	11,16	2,24	8,14	6,48	4,14	11,08	4,09	8,28	1,23
1,70	5,27	11,30	2,16	8,15	6,81	4,12	11,24	4,12	8,30	1,18
1,75	5,36	11,43	2,11	8,16	7,11	4,12	11,39	4,14	8,31	1,15
1,80	5,45	11,55	2,04	8,17	7,41	4,10	11,43	4,15	8,32	1,11
1,85	5,53	11,57	1,99	8,17	7,68	4,08	11,65	4,16	8,33	1,08
1,90	5,60	11,67	1,93	8,18	7,95	4,04	11,77	4,17	8,33	1,04
1,95	5,67	11,78	1,91	8,19	8,21	3,99	11,83	4,17	8,33	1,01
2,00	5,74	11,89	1,88	8,20	8,47	3,92	11,88	4,18	8,33	0,97
$\infty$	7,06	12,50	1,95	8,20	12,58	4,13	11,88	4,18	8,33	0,97

## ANEXO A – CONTINUAÇÃO...

$\lambda$	Caso 7				Caso 8				Caso 9			
	$\mu_x$	$\mu_x'$	$\mu_y$	$\mu_y'$	$\mu_x$	$\mu_x'$	$\mu_y$	$\mu_y'$	$\mu_x$	$\mu_x'$	$\mu_y$	$\mu_y'$
1,00	2,13	5,46	2,60	6,17	2,60	6,17	2,13	5,46	2,11	5,15	2,11	5,15
1,05	2,38	5,98	2,66	6,46	2,78	6,47	2,09	5,56	2,31	5,50	2,10	5,29
1,10	2,63	6,50	2,71	6,75	2,95	6,76	2,04	5,65	2,50	5,85	2,09	5,43
1,15	2,87	7,11	2,75	6,97	3,09	6,99	1,98	5,70	2,73	6,14	2,06	5,51
1,20	3,11	7,72	2,78	7,19	3,23	7,22	1,92	5,75	2,94	6,43	2,02	5,59
1,25	3,43	8,81	2,79	7,36	3,34	7,40	1,85	5,75	3,04	6,67	1,97	5,64
1,30	3,56	8,59	2,77	7,51	3,46	7,57	1,78	5,76	3,13	6,90	1,91	5,68
1,35	3,76	8,74	2,74	7,63	3,55	7,70	1,72	5,75	3,25	7,09	1,86	5,69
1,40	3,96	8,88	2,71	7,74	3,64	7,82	1,64	5,74	3,38	7,28	1,81	5,70
1,45	4,15	9,16	2,67	7,83	3,71	7,91	1,59	5,73	3,48	7,43	1,73	5,71
1,50	4,32	9,44	2,63	7,91	3,78	8,00	1,53	5,72	3,58	7,57	1,66	5,72
1,55	4,48	9,68	2,60	7,98	3,84	8,07	1,47	5,69	3,66	7,68	1,60	5,72

$\lambda$	Caso 7				Caso 8				Caso 9			
	$\mu_x$	$\mu_x'$	$\mu_y$	$\mu_y'$	$\mu_x$	$\mu_x'$	$\mu_y$	$\mu_y'$	$\mu_x$	$\mu_x'$	$\mu_y$	$\mu_y'$
1,60	4,63	9,91	2,55	8,02	3,89	8,14	1,42	5,66	3,73	7,79	1,54	5,72
1,65	4,78	10,13	2,50	8,03	3,94	8,20	1,37	5,62	3,80	7,88	1,47	5,72
1,70	4,92	10,34	2,45	8,10	3,98	8,25	1,32	5,58	3,86	7,97	1,40	5,72
1,75	5,04	10,53	2,39	8,13	4,01	8,30	1,27	5,56	3,91	8,05	1,36	5,72
1,80	5,17	10,71	2,32	8,17	4,04	8,34	1,20	5,54	3,95	8,12	1,32	5,72
1,85	5,26	10,88	2,27	8,16	4,07	8,38	1,17	5,55	3,98	8,18	1,26	5,72
1,90	5,36	11,04	2,22	8,14	4,10	8,42	1,14	5,56	4,01	8,24	1,21	5,72
1,95	5,45	11,20	2,14	8,13	4,11	8,45	1,11	5,60	4,04	8,29	1,19	5,72
2,00	5,55	11,35	2,07	8,12	4,13	8,47	1,08	5,64	4,07	8,33	1,16	5,72
$\infty$	7,07	12,50	2,05	8,12	4,18	8,33	1,09	5,64	4,19	8,33	1,17	5,72

ANEXO B – QUADROS DE CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO (2014) PARA O CÁLCULO DAS REAÇÕES DE APOIO EM LAJES MACIÇAS

$\lambda$	Caso 1		Caso 2			Caso 3		
	$k_x$	$k_y$	$k_x$	$k_y$	$k'_y$	$k_x$	$k'_x$	$k_y$
1,00	2,50	2,50	1,83	2,32	4,02	2,32	4,02	1,83
1,05	2,62	2,50	1,92	2,37	4,10	2,38	4,13	1,83
1,10	2,73	2,50	2,01	2,41	4,17	2,44	4,23	1,83
1,15	2,83	2,50	2,10	2,44	4,22	2,50	4,32	1,83
1,20	2,92	2,50	2,20	2,46	4,27	2,54	4,41	1,83
1,25	3,00	2,50	2,29	2,48	4,30	2,59	4,48	1,83
1,30	3,08	2,50	2,38	2,49	4,32	2,63	4,55	1,83
1,35	3,15	2,50	2,47	2,50	4,33	2,67	4,62	1,83
1,40	3,21	2,50	2,56	2,50	4,33	2,70	4,68	1,83
1,45	3,28	2,50	2,64	2,50	4,33	2,74	4,74	1,83
1,50	3,33	2,50	2,72	2,50	4,33	2,77	4,79	1,83
1,55	3,39	2,50	2,80	2,50	4,33	2,80	4,84	1,83

$\lambda$	Caso 1		Caso 2			Caso 3		
	$k_x$	$k_y$	$k_x$	$k_y$	$k'_y$	$k_x$	$k'_x$	$k_y$
1,60	3,44	2,50	2,87	2,50	4,33	2,82	4,89	1,83
1,65	3,48	2,50	2,93	2,50	4,33	2,85	4,93	1,83
1,70	3,53	2,50	2,99	2,50	4,33	2,87	4,97	1,83
1,75	3,57	2,50	3,05	2,50	4,33	2,89	5,01	1,83
1,80	3,61	2,50	3,10	2,50	4,33	2,92	5,05	1,83
1,85	3,65	2,50	3,15	2,50	4,33	2,94	5,09	1,83
1,90	3,68	2,50	3,20	2,50	4,33	2,96	5,12	1,83
1,95	3,72	2,50	3,25	2,50	4,33	2,97	5,15	1,83
2,00	3,75	2,50	3,29	2,50	4,33	2,99	5,18	1,83
$\infty$	5,00	2,50	5,00	2,50	4,33	3,66	6,25	1,83

## ANEXO B – CONTINUAÇÃO...

$\lambda$	Caso 4				Caso 5		Caso 6	
	$k_x$	$k'_x$	$k_y$	$k'_y$	$k_x$	$k'_y$	$k'_x$	$k_y$
1,00	1,83	3,17	1,83	3,17	1,44	3,56	3,56	1,44
1,05	1,92	3,32	1,83	3,17	1,52	3,66	3,63	1,44
1,10	2,00	3,46	1,83	3,17	1,59	3,75	3,69	1,44
1,15	2,07	3,58	1,83	3,17	1,66	3,84	3,74	1,44
1,20	2,14	3,70	1,83	3,17	1,73	3,92	3,80	1,44
1,25	2,20	3,80	1,83	3,17	1,80	3,99	3,85	1,44
1,30	2,25	3,90	1,83	3,17	1,88	4,06	3,89	1,44
1,35	2,30	3,99	1,83	3,17	1,95	4,12	3,93	1,44
1,40	2,35	4,08	1,83	3,17	2,02	4,17	3,97	1,44
1,45	2,40	4,15	1,83	3,17	2,09	4,22	4,00	1,44
1,50	2,44	4,23	1,83	3,17	2,17	4,25	4,04	1,44
1,55	2,48	4,29	1,83	3,17	2,24	4,28	4,07	1,44
1,60	2,52	4,36	1,83	3,17	2,31	4,30	4,10	1,44

$\lambda$	Caso 4				Caso 5		Caso 6	
	$k_x$	$k'_x$	$k_y$	$k'_y$	$k_x$	$k'_y$	$k'_x$	$k_y$
1,65	2,55	4,42	1,83	3,17	2,38	4,32	4,13	1,44
1,70	2,58	4,48	1,83	3,17	2,45	4,33	4,15	1,44
1,75	2,61	4,53	1,83	3,17	2,53	4,33	4,17	1,44
1,80	2,64	4,58	1,83	3,17	2,59	4,33	4,20	1,44
1,85	2,67	4,63	1,83	3,17	2,66	4,33	4,22	1,44
1,90	2,70	4,67	1,83	3,17	2,72	4,33	4,24	1,44
1,95	2,72	4,71	1,83	3,17	2,78	4,33	4,26	1,44
2,00	2,75	4,75	1,83	3,17	2,84	4,33	4,28	1,44
$\infty$	3,66	6,33	1,83	3,17	5,00	4,33	5,00	1,44

## ANEXO B – CONTINUAÇÃO...

$\lambda$	Caso 7			Caso 8			Caso 9	
	$k_x$	$k_z$	$k_y$	$k_x$	$k_y$	$k_z$	$k_x$	$k_y$
1,00	1,44	2,50	3,03	3,03	1,44	2,50	2,50	2,50
1,05	1,52	2,63	3,08	3,12	1,44	2,50	2,62	2,50
1,10	1,59	2,75	3,11	3,21	1,44	2,50	2,73	2,50
1,15	1,66	2,88	3,14	3,29	1,44	2,50	2,83	2,50
1,20	1,73	3,00	3,16	3,36	1,44	2,50	2,92	2,50
1,25	1,80	3,13	3,17	3,42	1,44	2,50	3,00	2,50
1,30	1,88	3,25	3,17	3,48	1,44	2,50	3,08	2,50
1,35	1,94	3,36	3,17	3,54	1,44	2,50	3,15	2,50
1,40	2,00	3,47	3,17	3,59	1,44	2,50	3,21	2,50
1,45	2,06	3,57	3,17	3,64	1,44	2,50	3,28	2,50
1,50	2,11	3,66	3,17	3,69	1,44	2,50	3,33	2,50
1,55	2,16	3,75	3,17	3,73	1,44	2,50	3,39	2,50
1,60	2,21	3,83	3,17	3,77	1,44	2,50	3,44	2,50
1,65	2,25	3,90	3,17	3,81	1,44	2,50	3,48	2,50

$\lambda$	Caso 7			Caso 8			Caso 9	
	$k_x$	$k_z$	$k_y$	$k_x$	$k_y$	$k_z$	$k_x$	$k_y$
1,70	2,30	3,98	3,17	3,84	1,44	2,50	3,53	2,50
1,75	2,33	4,04	3,17	3,87	1,44	2,50	3,57	2,50
1,80	2,37	4,11	3,17	3,90	1,44	2,50	3,61	2,50
1,85	2,40	4,17	3,17	3,93	1,44	2,50	3,65	2,50
1,90	2,44	4,21	3,17	3,96	1,44	2,50	3,68	2,50
1,95	2,47	4,28	3,17	3,99	1,44	2,50	3,72	2,50
2,00	2,50	4,33	3,17	4,01	1,44	2,50	3,75	2,50
$\infty$	3,66	6,34	3,17	5,00	1,44	2,50	5,00	2,50

## ANEXO C – QUADRO PARA A DETERMINAÇÃO DO KX E KZ

KMD	KX	KZ	$\epsilon_x$	$\epsilon_z$	KMD	KX	KZ	$\epsilon_x$	$\epsilon_z$
0,0100	0,0148	0,9941	0,1502	10,000	0,2050	0,3506	0,8597	3,5000	6,4814
0,0200	0,0298	0,9881	0,3068	10,000	0,2100	0,3609	0,8556	3,5000	6,1971
0,0300	0,0449	0,9820	0,4704	10,000	0,2150	0,3714	0,8515	3,5000	5,9255
0,0400	0,0603	0,9759	0,6414	10,000	0,2200	0,3819	0,8473	3,5000	5,6658
0,0500	0,0758	0,9697	0,8205	10,000	0,2250	0,3925	0,8430	3,5000	5,4170
0,0550	0,0836	0,9665	0,9133	10,000	0,2300	0,4033	0,8387	3,5000	5,1785
0,0600	0,0916	0,9634	1,0083	10,000	0,2350	0,4143	0,8343	3,5000	4,9496
0,0650	0,0995	0,9602	1,1056	10,000	0,2400	0,4253	0,8299	3,5000	4,7297
0,0700	0,1076	0,9570	1,2054	10,000	0,2450	0,4365	0,8254	3,5000	4,5181
0,0750	0,1156	0,9537	1,3077	10,000	0,2500	0,4479	0,8208	3,5000	4,3144
0,0800	0,1238	0,9505	1,4126	10,000	0,2550	0,4594	0,8162	3,5000	4,1181
0,0850	0,1320	0,9472	1,5203	10,000	0,2600	0,4711	0,8115	3,5000	3,9287
0,0900	0,1403	0,9439	1,6308	10,000	0,2650	0,4830	0,8068	3,5000	3,7459
0,0950	0,1485	0,9406	1,7444	10,000	0,2700	0,4951	0,8020	3,5000	3,5691
0,1000	0,1569	0,9372	1,8611	10,000	0,2750	0,5074	0,7970	3,5000	3,3981
0,1050	0,1654	0,9339	1,9810	10,000	0,2800	0,5199	0,7921	3,5000	3,2324
0,1100	0,1739	0,9305	2,1044	10,000	0,2850	0,5326	0,7870	3,5000	3,0719
0,1150	0,1824	0,9270	2,2314	10,000	0,2900	0,5455	0,7818	3,5000	2,9162
0,1200	0,1911	0,9236	2,3621	10,000	0,2950	0,5586	0,7765	3,5000	2,7649
0,1250	0,1998	0,9201	2,4967	10,000	0,3000	0,5721	0,7712	3,5000	2,6179
0,1300	0,2086	0,9166	2,6355	10,000	0,3050	0,5858	0,7657	3,5000	2,4748
0,1350	0,2175	0,9130	2,7786	10,000	0,3100	0,5998	0,7601	3,5000	2,3355
0,1400	0,2264	0,9094	2,9263	10,000	0,3150	0,6141	0,7544	3,5000	2,1997
0,1450	0,2354	0,9058	3,0787	10,000	0,3200	0,6287	0,7485	3,5000	2,0672
0,1500	0,2445	0,9022	3,2363	10,000	0,3300	0,6590	0,7364	3,5000	1,8100
0,1550	0,2536	0,8985	3,3391	10,000	0,3400	0,6910	0,7236	3,5000	1,5652
0,1600	0,2630	0,8948	3,5000	9,8104	0,3500	0,7249	0,7100	3,5000	1,3283

## ANEXO C – CONTINUAÇÃO...

KMD	KX	KZ	$\epsilon_x$	$\epsilon_z$	KMD	KX	KZ	$\epsilon_x$	$\epsilon_z$
0,1650	0,2723	0,8911	3,5000	9,3531	0,3600	0,7612	0,6955	3,5000	1,0983
0,1700	0,2818	0,8873	3,5000	8,9222	0,3700	0,8003	0,6799	3,5000	0,8732
0,1750	0,2913	0,8835	3,5000	8,5154	0,3800	0,8433	0,6627	3,5000	0,6506
0,1800	0,3009	0,8796	3,5000	8,1106					
0,1850	0,3106	0,8757	3,5000	7,7662					
0,1900	0,3205	0,8718	3,5000	7,4204					
0,1950	0,3305	0,8678	3,5000	7,0919					
0,2000	0,3405	0,8638	3,5000	6,7793					