



**UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA**  
**MATHEWS ZANINI SANTANA**

**COMPARATIVO DE LAJES NERVURADAS E MACIÇAS PARA EDIFÍCIOS**  
**RESIDENCIAIS MULTIFAMILIARES**

**Tubarão**  
**2018**

**MATHEWS ZANINI SANTANA**

**COMPARATIVO DE LAJES NERVURADAS E MACIÇAS PARA EDIFÍCIOS  
RESIDENCIAIS MULTIFAMILIARES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Charles Mendes de Souza, Esp.

Tubarão

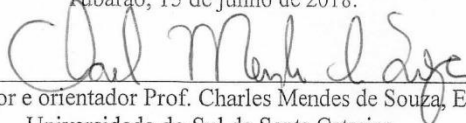
2018

MATHEWS ZANINI SANTANA

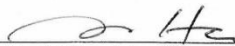
COMPARATIVO DE LAJES NERVURADAS E MACIÇAS PARA EDIFÍCIOS  
RESIDENCIAIS MULTIFAMILIARES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina.

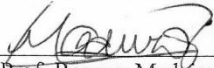
Tubarão, 15 de junho de 2018.



Professor e orientador Prof. Charles Mendes de Souza, Esp.  
Universidade do Sul de Santa Catarina



Prof. Maurício Alberto Büchele Motta, Esp.  
Universidade do Sul de Santa Catarina



Prof. Rennan Medeiros, Esp.  
Universidade do Sul de Santa Catarina

Dedico este trabalho a meu pai, minha mãe,  
minha namorada e meu filho.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por tudo que fez, faz e fará na minha vida. Sejam acontecimentos bons ou ruins, sempre darei glória à Ele. Em segundo lugar, ao meu pai e à minha mãe, pessoas que nunca mensuraram nem sequer um segundo em me apoiar nos estudos.

Minha namorada, um presente de Deus na minha vida, sempre muito paciente e pronta a me ajudar em todas as vezes que necessitei, e não foram poucas. Te amo muito Celine!

Meu filho que está com 9 anos. Lembro-me quando iniciava meus estudos em engenharia civil, ele com 5 anos e tão feliz por eu estar me formando. Meu filho, papai te ama muito, estudo é tudo na nossa vida.

Minha irmã Leticia, meu cunhado Demi, minha sogra e meu sogro. Não poderia deixar de mencionar vocês no final dessa jornada, muito obrigado por me ajudarem em todas as formas. Que Deus os abençoe grandemente!

Queria agradecer em especial ao professor Mauricio, pela paciência que teve comigo em me ensinar tudo que eu perguntava, em nunca se negar a passar o conhecimento que possuía. Muito obrigado professor, que Deus abençoe o senhor.

Aos demais, me perdoem por não citar o nome de todos, mas meu muito obrigado por qualquer auxílio que vieram a dar não somente a mim, mas toda a minha família.

Muito obrigado Deus abençoe a todos!

“Nu saí do ventre de minha mãe, nu voltarei. O Senhor deu, o Senhor tirou:  
bendito seja o nome do Senhor!” (Jó 1:21)

## **RESUMO**

O presente trabalho tem por objetivo investigar a relação custo-benefício entre o uso de lajes dos tipos maciça e nervurada em edifícios multifamiliares. Para elaboração da pesquisa, utilizou-se um estudo de abordagem qualitativa, de nível exploratório, cujo método de procedimento adotado foi o estudo comparativo. O trabalho foi realizado com a intenção de avaliar as potenciais diferenças entre os consumos de materiais necessários para as lajes maciças e nervuradas, como também comparar conceitos utilizados para ambos os tipos e descrever procedimentos e desenvolvimentos dimensionais para as lajes. Nesse caso, constatou-se que a laje nervurada é economicamente mais viável, como também possui peso próprio e reações nas vigas inferiores as lajes maciças.

Palavras-chave: Laje nervurada. Laje maciça. Cálculo estrutural.

## **ABSTRACT**

The present work aims to investigate the cost benefit relationship between the use of slabs of massive and ribbed types in multifamily buildings. For the elaboration of the study a qualitative study was used, of exploratory level whose method of procedure adopted was the comparative study. The work was carried out with the intention of evaluating the potential differences between the consumptions of materials required for the massive and ribbed slabs as well as to compare concepts used for both types and to describe procedures and dimensional developments for the slabs. In this case it was found that the ribbed slab is economically more feasible, as it also has its own weight and reactions in the lower beams of the massive slabs.

**Keywords:** Ribbed slab. Solid slab. Structural calculus.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Vãos efetivos em lajes .....	30
Figura 2 - Situações de vinculação das placas isoladas constantes nos quadros.....	31
Figura 3 – Exemplo de aplicação do processo das áreas .....	32
Figura 4 - Compatibilização de momentos.....	34
Figura 5 - Valores para cálculo do $h$ .....	36
Figura 6 - Relação entre Altura da laje vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5) .....	48
Figura 7 – Relação entre peso próprio vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para os vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5).....	49
Figura 8 - Relação entre flecha imediata de carga permanente vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5).....	49
Figura 9 - Relação entre volume de concreto vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5).....	50
Figura 10 - Relação entre consumo de aço vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5).....	51
Figura 11 - Relação entre reações nas vigas vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5).....	52
Figura 12 - Relação entre custo do concreto vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5).....	53
Figura 13 - Relação entre consumo de aço vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5).....	53
Figura 14 - Relação entre custo total vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5). .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores referentes à desforma .....	43
Tabela 2 - Carregamento das lajes.....	43
Tabela 3 - Combinações utilizadas para o cálculo .....	44
Tabela 4 – Cálculo da flecha para os diferentes vãos.....	44
Tabela 5 – Resultados dos cálculos de laje maciça .....	44
Tabela 6 – Valores de área de aço .....	45
Tabela 7 – Área de aço mínima para as duas direções .....	45
Tabela 8 - Tempo de desforma das lajes nervuradas.....	45
Tabela 9 - Carregamento das lajes nervuradas .....	46
Tabela 10 - Carregamento das lajes nervuradas .....	46
Tabela 11 - Cálculo da flecha para os diferentes vãos .....	46
Tabela 12 - Resultados dos cálculos de laje maciça.....	47
Tabela 13 – Cálculo da área de aço .....	47
Tabela 14 - Cálculo da área de aço mínima nas duas direções.....	47

## LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA-25	Aço 250 MPa
CA-50	Aço 500 MPa
CA-60	Aço 600 MPa
CAA	Classe de Agressividade
ELU	Estado limites últimos

## LISTA DE SÍMBOLOS

aconc	Coeficiente de dilatação térmica do concreto
aaço	Coeficiente de dilatação térmica do aço
fcj	Resistência de dosagem
Nrup	Carga de ruptura
A	Área
fctk,inf	Resistência característica do concreto à tração inferior
fctk,m	Resistência característica do concreto à tração média
fctk,sup	Resistência característica do concreto à tração superior
fck	Resistência característica do concreto
Eci	Módulo de elasticidade inicial
Ecs	Módulo de elasticidade secante
a/c	Relação água/cimento
$\gamma_{f2}$	Coeficiente para combinações quase permanente e acidentais
$\Psi_1$	Coeficiente de combinações quase permanente
$\Psi_2$	Coeficiente dependente das condições de vinculação e dimensões da laje
d	Altura útil
$\Psi_3$	Coeficiente que depende do tipo de aço
cm	Centímetros
kN	Quilonewton
v	Coeficiente de Poisson
h	Altura
t0	Tempo de desforma
t1	Apoio de vão extremo
t2	Apoio de vão intermedirario
Ly	Tamanho da laje na direção Y
Lx	Tamanho da laje na direção X
$\lambda$	Parâmetro lambda que reflete a geometria da laje
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
qx	Reação em X para bordas simplesmente apoiada
kx	Coeficiente para o cálculo das reações nas vigas
p	Carga
qy	Reação em y para bordas simplesmente apoiada

$k_y$	Coeficiente para o cálculo das reações nas vigas
$q_x'$	Reações nas bordas engastadas na direção X
$k_x'$	Coeficiente de cálculo das reações da viga
$q_y'$	Reações nas bordas engastadas na direção Y
$k_y'$	Coeficiente para o cálculo das reações nas vigas
$M_d$	Momento majorado de calculo
$M_r$	Momento de fissuração
$f_{ct}$	Resistencia a tração direta do concreto
$l_0$	Distância entre as faces internas de dois consecutivos
$y_t$	Não achei isso no TCC e não sei o que é
$b_w$	Largura da seção
$\rho_s$	Armaduras
$\rho_{min}$	Armaduras mínimas
$A_s$	Área de aço
$A_s'_{min}$	Área de aço mínima
$A_c$	Área de concreto da seção
$S$	Espaçamento
$\emptyset_{max}$	Diâmetro máximo
$cm^2$	Centímetro quadrado
$m$	Metro
$c$	Cobrimento
$\emptyset$	Diâmetro
$d_{min}$	Diâmetro mínimo
$f_{cd}$	Resistência minorada do concreto
$f_s$	Resistência do aço minorada pelo fator de segurança
$V_{sd}$	Força cortante de cálculo na seção
$V_{rd1}$	Verificação ao cisalhamento
$\tau_{rd}$	Parcela da força cortante absorvida por mecanismos complementares ao de
treliça	
$K$	Coeficiente em relação a altura útil
$\rho_l$	Verificação ao cisalhamento
$\sigma_{cp}$	Força longitudinal na seção devida a protensão ou carregamento
$a_{v1}$	Coeficiente em relação ao cisalhamento
$\gamma_c$	Coeficiente de segurança do concreto

Vs	Força cortante
As,min	Área de aço mínima
R\$	Reais

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Cálculo da resistência à compressão .....	22
Equação 2 - Cálculo da resistência à tração superior .....	22
Equação 3 - Cálculo da resistência à tração inferior .....	22
Equação 4 - Cálculo da resistência à tração para concretos de classe C50 .....	22
Equação 5 - Cálculo do módulo de elasticidade longitudinal .....	23
Equação 6 - Cálculo do módulo de elasticidade secante .....	23
Equação 7 - Cálculo dos vãos efetivos .....	29
Equação 8 - Cálculo para definição do tipo de armadura .....	30
Equação 9 - Cálculo da reação em x (bordas simplesmente apoiadas) .....	32
Equação 10 - Cálculo da reação em y (bordas simplesmente apoiadas) .....	32
Equação 11 - Cálculo da reação em x (bordas engastadas) .....	32
Equação 12 - Cálculo da reação em y (bordas engastadas) .....	32
Equação 13 - Cálculo do momento fletor .....	33
Equação 14 - Cálculo da resistência à tração direta .....	33
Equação 15 - Cálculo do espaçamento máximo .....	35
Equação 16 - Cálculo da altura útil da laje .....	36
Equação 17 - Cálculo da altura da laje .....	36
Equação 18 - Cálculo da altura útil mínima .....	36
Equação 19 - Cálculo do KMD .....	36
Equação 20 - Cálculo da área de aço .....	36
Equação 21 - Verificação da força cortante .....	37
Equação 22 - Cálculo do esforço resistente de puncionamento .....	37

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1	JUSTIFICATIVA E PROBLEMA .....	18
1.2	OBJETIVO .....	19
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>19</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>19</b>
1.3	RELEVÂNCIA SOCIAL E CIENTÍFICA DA PESQUISA .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>21</b>
2.1	CONCEITO DE CONCRETO ARMADO.....	21
<b>2.1.1</b>	<b>Resistência à compressão.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Resistência à tração.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Módulo de elasticidade.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Aço .....</b>	<b>23</b>
2.2	DURABILIDADE DO CONCRETO .....	23
<b>2.2.1</b>	<b>Classe de agressividade.....</b>	<b>24</b>
2.2.1.1	Cobrimento .....	25
2.3	CONCEITO DA ESTRUTURA .....	25
2.4	ESTADOS LIMITES .....	25
<b>2.4.1</b>	<b>Estados limites últimos.....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Estado limite de serviço .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Ações.....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Combinações.....</b>	<b>27</b>
2.5	PRÉ DIMENSIONAMENTO.....	27
<b>2.5.1</b>	<b>Laje maciça .....</b>	<b>28</b>
2.5.1.1	Características do sistema.....	28
2.5.1.2	Método de cálculo .....	29
2.5.1.3	Vãos.....	29
2.5.1.4	Vinculação .....	30
2.5.1.5	Carregamentos nas lajes .....	31
2.5.1.6	Reações de apoio .....	31
2.5.1.7	Verificações de deformação excessivas .....	33
2.5.1.7.1	<i>Estado limite de formação de fissura .....</i>	<i>33</i>
2.5.1.7.2	<i>Momento fletores e compatibilização.....</i>	<i>34</i>



2.5.1.8	Dimensionamento das armaduras.....	34
2.5.1.8.1	<i>Armaduras mínimas</i> .....	35
2.5.1.8.2	<i>Armaduras máximas</i> .....	35
2.5.1.8.3	<i>Espaçamento entre as barras</i> .....	35
2.5.1.8.4	<i>Armadura de distribuição e secundária de flexão</i> .....	35
2.5.1.8.5	<i>Verificações ao cisalhamento</i> .....	36
<b>2.5.2</b>	<b>Laje nervurada</b> .....	<b>37</b>
2.5.2.1	Características do sistema.....	38
2.5.2.2	Critérios para projetos e método de cálculo.....	38
2.5.2.3	Vinculação.....	39
2.5.2.4	Vãos efetivos.....	39
2.5.2.5	Dimensões mínimas.....	39
2.5.2.6	Carregamentos nas lajes.....	40
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>41</b>
3.1	A PESQUISA CIENTÍFICA.....	41
3.2	O TIPO DE ESTUDO REALIZADO.....	41
3.3	DESCRIÇÃO DO PROCESSO.....	42
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>43</b>
4.1	LAJE MACIÇA.....	43
4.2	LAJE NERVURADA.....	45
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE LAJE MACIÇA E NERVURADA.....	48
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>56</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>57</b>
	<b>ANEXO A – TABELAS UTILIZADAS PARA OS CÁLCULOS</b> .....	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em meados dos anos de 1849, um francês chamado Joseph Louis Lambot inventou a primeira estrutura de concreto armado do mundo. Este que, aproximadamente meio século após, seria o segundo material mais consumido no mundo, perdendo somente para água. Desde então, o concreto armado vem sendo estudado de todas as formas, para que se consiga obter estruturas seguras e econômicas ao mesmo tempo.

A laje nervurada é uma estrutura criada para suprir algumas deficiências que existem nas lajes maciças. Com isto, este estudo tem por objetivo analisar, comparativamente, as flechas estimadas, seu peso próprio e o consumo de material entre lajes maciças e lajes nervradas de concreto armado. Justifica-se pelo fato de que os edifícios multifamiliares não possuem um padrão de projeto arquitetônico, ou seja, não são todos iguais. Assim, se faz necessário a avaliação do que é mais viável para cada tipo de edificação.

Inicia-se o estudo abordando os critérios de projetos de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), as características e particularidades de ambas. Em seguida será efetuado o cálculo, manualmente, de seis lajes com vãos entre 6 e 10,5 metros, onde serão obtidos os resultados e realizado todo o comparativo entre os dois tipos de lajes para a identificação da mais vantajosa para cada caso. A investigação foi proposta com o objetivo de materializar dados mais reais, haja vista que são lajes muito utilizadas na construção civil.

### 1.1 JUSTIFICATIVA E PROBLEMA

Inicialmente, por serem lajes amplamente usadas na construção de prédios residenciais, segundo por haver uma questão cultural em cada construtora no momento de optar pela laje. Ocorre que muitas vezes, a escolha não é a mais apropriada para determinado empreendimento, o que poderá gerar custos desnecessários para o empreendedor, além da possibilidade de transtornos técnicos futuros.

Cabe destacar que a busca incessante por soluções mais econômicas é uma preocupação diante de um mercado cada vez mais impetuoso. No entanto, é de grande importância que se conheça ambos os tipos de lajes para que se consiga fazer um real e viável dimensionamento construtivo.

Deste modo, no presente trabalho monográfico, objetiva-se a resposta para a seguinte pergunta: **Qual tipo de laje é, técnica e economicamente, mais adequada para**

## **edifícios multifamiliares com vãos entre 6 e 10,5 metros, em estudo experimental comparativo realizado em Tubarão, Santa Catarina, no ano de 2018?**

### **1.2 OBJETIVO**

Neste item serão apresentados os objetivos geral e específicos desta pesquisa.

#### **1.2.1 Objetivo geral**

Analisar, o tipo de laje, entre maciça e nervurada é, técnica e economicamente, a mais adequada para edifícios multifamiliares com vãos entre 6 e 10,5 metros visando determinar suas especificidades e adequações para a edificação realizada.

#### **1.2.2 Objetivos específicos**

- a) Avaliar as potenciais diferenças entre os consumos de materiais necessários para as lajes maciças e nervuradas;
- b) Dimensionar quatro lajes maciças e quatro lajes nervuradas;
- c) Comparar conceitos utilizados para ambos os tipos;
- d) Descrever procedimentos e desenvolvimentos dimensionais para as lajes;
- e) Identificar adequadas práticas para projetos estruturais;
- f) Descrever os aspectos técnicos relevantes para cada tipo de laje;
- g) Identificar o tipo de laje técnica e economicamente adequada para a construção definida.

### **1.3 RELEVÂNCIA SOCIAL E CIENTÍFICA DA PESQUISA**

Ao investigar uma estrutura de concreto, neste caso, dois tipos de lajes para edifícios multifamiliares, buscam-se respostas a dúvidas, sejam técnicas ou econômicas, que poderão contribuir para a melhoria do produto oferecido e para um racional investimento econômico. Esses fatores correspondem à relevância social do estudo realizado.

Ao mesmo tempo, de posse dos resultados, o pesquisador poderá apresentá-los em Congressos e Simpósios científicos da construção civil, assim como poderão constituir temas para discussões acadêmicas nos cursos de engenharia civil de todo o país. Essas ações, por sua

vez, poderão gerar novos processos para a construção civil específica ao estudo, e desencadear novos produtos e sistemas construtivos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos do concreto armado, as importâncias das propriedades deste material como resistência à compressão e durabilidade, além dos conceitos de dimensionamentos dos elementos estruturais das lajes estudadas.

### 2.1 CONCEITO DE CONCRETO ARMADO

O concreto tem por características a alta resistência à compressão e a baixa resistência à tração, sendo cerca de 1/10 da resistência a compressão. No entanto, o aço tem características muito melhor quando solicitado tanto a tração quanto compressão. Desta forma, a utilização apenas de concreto não atende às demandas necessárias para uma estrutura resistente. (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2016).

Nesse sentido, os mesmos autores comentam:

É interessante ressaltar que o concreto e o aço têm coeficientes de dilatação térmica próximos ( $a_{conc} = 1 * 10^{-5} \text{°C}^{-1}$  e  $a_{aço} = 1,2 * 10^{-5} \text{°C}^{-1}$ ) e também que o concreto ao envolver o aço, o protege satisfatoriamente, em condições normais, contra a oxidação e altas temperaturas. CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2016, p. 21)

A união desses dois elementos deu origem ao concreto armado, constituindo-se em uma perfeita união, como bem interpretado por Botelho e Marchetti (2015, p. 24.): “[...] essa é a ideia do concreto armado. Na parte tracionada do concreto, mergulha-se aço e, na parte comprimida, deixa-se o concreto (o aço resiste bem a tração)”.

Essa união entre um e outro obteve sucesso, pois ambos têm graus de dilatação muito próximos, o que possibilita a junção, tendo em vista que se expandem e retraem semelhantemente.

O resultado dessa combinação faz do concreto armado um material que apresenta boa trabalhabilidade, adaptando-se ao formato desejado, possibilitando uma maior liberdade ao projetista, sendo esta somente mais uma das muitas vantagens. Pode-se enumerar várias outras, como: o material durável, resistente ao fogo, resistente a choques e vibrações, apresenta boa resistência à maioria das solicitações.

#### 2.1.1 Resistência à compressão

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2016, p. 34) um dos fatores determinantes do concreto é:

A principal característica do concreto é sua resistência à compressão a qual é determinada pelo ensaio de corpos de prova submetidos à compressão centrada; esse ensaio também permite a obtenção de outras características, como o módulo de deformação longitudinal.

A resistência à compressão do concreto é influenciada por diversos fatores como relação água cimento, idade e agregados, porém Botelho e Marchetti (2015, p. 30), especificam que a resistência à compressão: “[...] é governada por duas características principais: Teor de cimento por m<sup>3</sup> de concreto e relação água/cimento da mistura”. Para determinar a resistência, utiliza-se a equação 1.

Equação 1 - Cálculo da resistência média de dosagem do concreto à compressão

$$f_{cj} = \frac{N_{rup}}{A}$$

### 2.1.2 Resistência à tração

Sabe-se que o concreto possui baixa resistência a tração, porém é necessário conhecê-la para que se possa estudar alguns efeitos que estejam relacionados a esta resistência na peça, como por exemplo, o esforço cortante e a fissuração.

Existem três ensaios para obter a resistência à tração do concreto, sendo eles a flexotração, compressão diametral e tração direta. No entanto, na falta de ensaios, pode-se utilizar resistência de compressão do concreto dada pelas seguintes equações:

Equação 2 - Cálculo da resistência à tração superior

$$f_{ctk,inf} = 0,7 * f_{ct,m}$$

Equação 3 - Cálculo da resistência à tração inferior

$$f_{ctk,sup} = 1,3 * f_{ct,m}$$

E para concretos de classe até C50:

Equação 4 - Cálculo da resistência à tração para concretos de classe até C50

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

### 2.1.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade mostra as relações entre tensões e deformações do concreto, Carvalho e Figueiredo Filho (2016, p. 38), trazem uma definição simples, mas funcional: “Módulo de elasticidade (ou módulo de deformação é uma grandeza mecânica que mede a rigidez de um material sólido, e pode ser definido a partir das relações entre tensões e deformações, de acordo com os diagramas tensão- deformação).”.

Pela falta de ensaios a NBR 6118 (ABNT, 2014), no item 8.2.8, permite calcular o módulo de elasticidade longitudinal do concreto utilizando o  $f_{ck}$ , onde:

Equação 5 - Cálculo do módulo de elasticidade longitudinal

$$E_{ci} = a_e * 5600 * \sqrt{f_{ck}}$$

Onde  $a_e$  é o tipo de agregado graúdo.

E o módulo de elasticidade secante retirado da mesma norma:

Equação 6 - Cálculo do módulo de elasticidade secante

$$E_{cs} = 0,85 * E_{ci}$$

O módulo de elasticidade permite saber a rigidez de um material, ou seja, a capacidade que o mesmo tem de se deformar e voltar ao seu estado original. Quanto maior o módulo de elasticidade, maior a dificuldade para se deformar.

#### 2.1.4 Aço

Utilizado para suprir a baixa resistência à tração do concreto, o aço do concreto armado se encontra especificado na ABNT NBR 7480 (ABNT, 2007), onde são definidos os tipos, as características e outros itens que tratam sobre barras e fios para concreto armado.

Na norma citada acima, consta que as barras de aço CA-25 e CA-50 terão processos de fabricação somente a laminação quente, e que os fios de CA-60 devem ser fabricados por trefilação ou processo equivalente como exemplo laminação a frio.

As principais definições de características que são extraídas de ensaios a tração, são resistência de escoamento, limite de resistência e alongamento.

Muitas vezes, tem-se a ideia de que o aço não é um bom material à compressão. Botelho e Marchetti (2015, p. 189) mencionam o contrário, que embora o concreto resista bem a compressão, o aço resiste melhor.

Portanto, mostra que as características do aço quanto à resistência, tanto de compressão quanto de tração, são muito superiores que a do concreto.

## 2.2 DURABILIDADE DO CONCRETO

A estrutura de concreto deve ser projetada, construída e utilizada conforme especificada em projeto, para que assim se consiga obter segurança, estabilidade e excelência em serviço enquanto a sua vida útil.

Alguns parâmetros, como consta na NBR 6118 (ABNT, 2014), no item 5.1.1, são essenciais para obtenção da durabilidade da estrutura e essa norma, segundo item 5.1.2, as divide em três grupos:

- Grupo 1: requisitos relativos à capacidade resistente da estrutura ou de seus elementos componentes.
- Grupo 2: requisitos relativos ao desempenho em serviço, que consiste na capacidade de a estrutura se manter em condições plenas de utilização, não devendo apresentar danos que comprometam, em parte ou totalmente, o uso para o qual foi projetada; e
- Grupo 3: requisitos a sua durabilidade, que consiste na capacidade de a estrutura resistir as influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante.

Carvalho e Figueiredo Filho (2016, p. 64) trazem uma explicação sucinta, mas muito bem explicativa:

Simplificadamente, as exigências do grupo 1 correspondem a segurança contra a ruptura, as exigências do grupo 2 referem-se a danos como fissuração excessiva, deformações inconvenientes e vibrações indesejáveis e as exigências do grupo 3 tem como referência a conservação da estrutura, sem necessidade de reparos de alto custo.

Quanto a durabilidade, a NBR 6118 (ABNT, 2014) é clara ao exigir que as estruturas de concreto sejam projetadas e construídas de modo a resistir às influências ambientais e que conservem a sua segurança, estabilidade e comportamento adequado de serviço durante sua vida útil de projeto.

### **2.2.1 Classe de agressividade**

Uma das principais perdas de qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado está ligada diretamente ao meio em que a estrutura está sendo implantada. Devido a esse fato, a NBR 6118 (ABNT, 2014), traz as classes de agressividade dependendo no meio onde a mesma se encontra.

A norma divide em quatro os grupos, sendo eles classes e risco de deterioração:

- Classe I – insignificantes;
- classe II – pequeno;
- classe III – grande;
- classe IV – elevado.



Com isso, observa-se a espessura de cobrimento da armadura estabelecida pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014), pois é o que irá garantir a preservação do aço contra as intempéries do ambiente. Para este trabalho, foi admitido a classe de agressividade ambiental CAA-II, pois o mesmo se admite em uma área urbana.

Além do cobrimento, outro fator predominante para qualidade da estrutura é a qualidade do concreto empregado. Para isso, a NBR 6118 (ABNT, 2014) na tabela 7.1, traz a relação máxima água/cimento (a/c) permitida para cada classe e a resistência mínima.

#### 2.2.1.1 Cobrimento

Entre os principais fatores ligados a qualidade da estrutura, sem dúvida alguma está o cobrimento das armaduras. Cobrimento mínimo é a menor distância entre a face da barra mais próxima a face da peça. O cobrimento tem por finalidade proteger as barras da corrosão e contra também ações do fogo. Para que isto seja atingido, a NBR 6118 (ABNT, 2014) traz as recomendações em seu item 7.4.7.

### 2.3 CONCEITO DA ESTRUTURA

A qualidade vem sendo fator predominante no sucesso do empreendimento e para isso existem os mais diversos meios de obtê-lo. A chamada ISO 9001 é um desses meios para se atingir essa qualidade. Para isso, a empresa necessita passar por auditoria e garantir sua qualidade para obter o certificado. No entanto na construção civil brasileira, a NBR 6118 (ABNT, 2014), no item 5.1.2, divide qualidade em três grupos distintos, sendo o primeiro deles em relação à segurança contra a ruptura, o segundo referindo-se aos inconvenientes como fissuração excessivas, deformações inconvenientes e vibrações indesejáveis. Já o grupo três tem como objetivo a durabilidade da estrutura, ou seja, a conservação da mesma sem um alto custo de reparos (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2016).

### 2.4 ESTADOS LIMITES

Há dois estados limites no cálculo das estruturas de concreto, que são o estado limite últimos e o estado limite de serviços, ambos não devem ser ultrapassados, pois caso isso ocorra, não atenderá a norma e todas especificações vistas anteriormente. A estrutura é considerada segura quando, ao efetuar os cálculos, as resistências obtidas ficam acima das

solicitadas e em vista da segurança, é considerado um coeficiente de garantia que varia de acordo com o material utilizado (SANTOS, 2014).

#### **2.4.1 Estados limites últimos**

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2016, p. 52), o estado limite último (ELU) é:

O estado limite último é aquele relacionado ao colapso ou a qualquer outra forma de ruína estrutural que determine a paralisação, no todo ou em parte, do uso da estrutura. De acordo o item 10.3 da ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) a segurança das estruturas de concreto deve sempre ser verificada em relação aos seguintes estados limites últimos: a) Perda do equilíbrio da estrutura, admitida como corpo rígido; b) Esgotamento da capacidade resistente da estrutura, em seu todo ou em parte, por causa de solicitações normais e tangenciais; admitem-se, em geral, verificações separadas dessas solicitações; c) Esgotamento da capacidade resistente da estrutura, em seu todo ou em parte, considerando os efeitos de segunda ordem; d) Provocado por solicitações dinâmicas; e) Colapso progressivo; f) Esgotamento da capacidade resistente da estrutura no seu todo ou em parte, considerando exposição ao fogo, conforme a ABNT NBR 15200 2012; g) Esgotamento da capacidade resistente da estrutura, considerando ações sísmicas, de acordo com a ABNT NBR 15421:2006; h) Outros que, eventualmente, possam ocorrer em casos especiais.

O ELU nada mais é que o colapso da estrutura, vindo a ser interdita em partes ou no todo.

#### **2.4.2 Estado limite de serviço**

O estado limite de serviço está ligado ao conforto do usuário, durabilidade, aparência e a boa utilização funcional das mesmas. Para isso a NBR 6118 (ABNT, 2014) discorre em seu item 3.2 sobre alguns parâmetros a serem verificados.

“Esses parâmetros são divididos em: formação de fissuras, aberturas de fissuras, deformação excessivas e vibrações excessivas.” (CARVALHO E FIGUEIREDO FILHO, 2016, p. 53).

#### **2.4.3 Ações**

De acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2016, p. 53):

Denomina-se ação qualquer influência, ou conjunto de influência, capaz de produzir estados de tensão ou de deformação em uma estrutura. Conforme NBR 6118 (ABNT, 2014) capítulo 11 item 11.2.1: Na análise estrutural deve ser considerada a influência de todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a segurança da estrutura em exame, levando-se em conta os possíveis estados limites e os de serviços.

As ações a serem consideradas são encontradas na NBR 8681 (ABNT, 2003), onde a mesma traz três tipos, sendo elas permanentes, variáveis e excepcionais.

São consideradas ações permanentes todas as ações que ocorrem com valores praticamente constantes durante toda vida estrutural. Já as ações variáveis se dividem em duas, as diretas que são consideradas as cargas verticais de uso das construções (pessoas, mobiliário, veículos, etc.), cargas móveis, impacto lateral, força longitudinal de frenação, aceleração e força centrífuga; e as indiretas que são causadas por variações uniformes e não uniformes de temperaturas e por ações dinâmicas. Quanto à ação excepcional a NBR 6118 (ABNT, 2014), no item 11.5, no projeto de estruturas sujeitas a situações excepcionais de carregamento, cujos efeitos não possam ser controlados por outros meios, devem ser considerados ações excepcionais com valores definidos, em cada caso particular, por normas brasileiras específicas (CARVALHO; FIGUEIRERO FILHO, 2016).

#### 2.4.4 Combinações

O carregamento de uma estrutura é determinado pela possibilidade de exercerem juntamente todas as combinações possíveis predeterminadas. Segundo o entendimento de Carvalho e Figueiredo Filho (2016, p. 60):

A combinação das ações deve ser feita de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura; a verificação da segurança em relação aos estados últimos e aos estados limites de serviço deve ser realizada em função de combinações últimas e de serviço, respectivamente. Em todas as combinações, as ações devem ser tomadas em sua totalidade; das ações variáveis devem ser tomadas apenas as parcelas que produzem efeitos desfavoráveis para a segurança.

Com isso, o objetivo da análise estrutural quanto as combinações é determinar o coeficiente de ponderação que será empregado em cada caso, onde segue abaixo os valores referentes às combinações de serviço.

- $\gamma_{f2} = 1$ , para combinações raras;
- $\gamma_{f2} = \Psi_1$ , para combinações frequentes;
- $\gamma_{f2} = \Psi_2$ , para combinações quase permanentes;

Onde  $\Psi_1$  e  $\Psi_2$  são os coeficientes retirados da norma com as ações.

## 2.5 PRÉ DIMENSIONAMENTO

Conforme descreve Carvalho e Figueiredo Filho (2016, pg. 100):

[...] a recomendação da ABNT NBR 6118:1980, item 4.2.3.1C, de que a altura útil  $d$  (distância do centro de gravidade da armadura tracionada a borda do concreto comprimido), a ser utilizada para evitar a verificações de deformações excessiva, pode ser determinada por:

$$d \geq \frac{l}{\Psi_2 * \Psi_3}$$

Sendo  $l$  o vão da nervura (nas lajes armadas em duas direções,  $l$  é o menor vão).

Porém, para um pré-dimensionamento da estrutura, é imprescindível a experiência e o conhecimento do engenheiro, visto que serão estimados valores iniciais de cálculos para as peças, respeitando sempre as dimensões mínimas como consta na NBR 6118 (ABNT, 2014).

No item 13.2.4.1 da ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) se encontra os seguintes valores mínimos para lajes maciças:

- a) 7 cm para coberturas não em balanço;
- b) 8 cm para lajes de piso não em balanço;
- c) 10 cm para lajes em balanço;
- d) 10 cm para que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- e) 12 cm para lajes que suportam veículos de peso total maior que 30 kN;
- f) 15 cm para lajes com pretensão apoiadas em vigas com o mínimo de 1/42 para lajes de piso biapoiados e 1/50 para lajes de piso contínuas;
- g) 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo fora do capitel;

### 2.5.1 Laje maciça

Sobre o significado de lajes Carvalho e Figueiredo Filho (2016 p. 319) enfatiza: “Sob o ponto de vista estrutural, lajes são placas de concreto e estas últimas são elementos estruturais de superfície plana [...]”, ou seja, lajes são superfícies planas de concreto onde possuem espessura relativamente pequena se comparada as demais. As principais ações relacionadas a esse tipo de estrutura são as normais a seu plano, podendo ser das mais diversas origens.

Quando a relação entre o maior vão e o menor vão for menor ou igual a dois considera-se, para efeito de cálculo, que a mesma é armada em duas direções e caso seja maior, é armada em uma única direção.

#### 2.5.1.1 Características do sistema

Algumas características desse sistema, são: grande consumo de formas, por ter bastantes vigas para sustentar as lajes, acabam formando muitos pórticos, que ajudam na rigidez; devido ao grande número de execuções na construção civil desse tipo de laje, a mesma já está qualificada; e aumenta o consumo de concreto do edifício devido as lajes.

### 2.5.1.2 Método de cálculo

Existem vários métodos para o cálculo de lajes maciças, porém utilizou-se o método de quadros que, segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2016, p. 84):

[...] é bastante adequado para a confecção de quadros que facilmente possibilitam determinar momentos fletores máximos e deslocamentos máximos (flechas) a partir da geometria e das condições de vinculação da placa. Para isso, o pavimento deve ser discretizado, ou seja, cada laje deve ser tratada individualmente de acordo com sua vinculação as demais (só são possíveis bordas – contorno – simplesmente apoiados ou engastados).

O processo de cálculo é realizado pela utilização de quadros onde se tem os desmembramentos das lajes em quadros, que possibilitam determinar os momentos fletores e os deslocamentos máximos, a partir da geometria e vinculação da laje.

No item 2.5.1.4 são apresentadas as possíveis vinculações das lajes, o método desenvolvido por Bares, é devidamente adaptado ao coeficiente de Poisson ( $\nu = 0,20$ ).

O roteiro de cálculo seguirá da seguinte forma: determinação das vinculações das lajes, pré-dimensionamento da altura das lajes, cálculo das cargas atuantes, verificação das flechas, cálculo dos momentos, determinação das armaduras, cálculo das reações das lajes nas vigas de apoio, verificação das forças cortantes e detalhamento da armadura.

### 2.5.1.3 Vãos

Os vãos efetivos das lajes têm por finalidade saber as suas disposições e suas direções de armaduras e devem ser calculados segundo os itens 14.7.2.2 e 14.6.2.4 da NBR 6118 (ABNT, 2014) por:

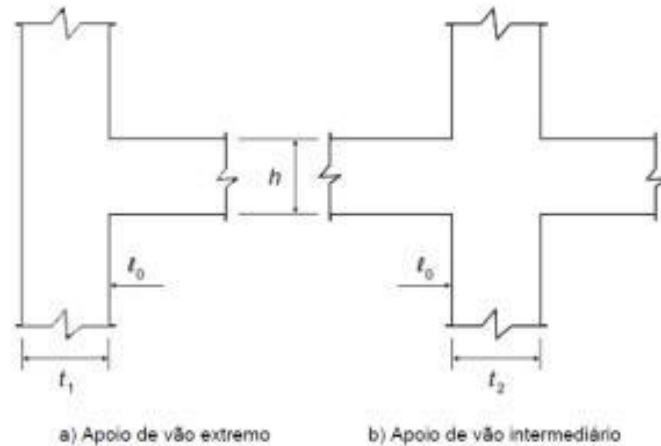
Equação 7 - Cálculo dos vãos efetivos

$$l_{ef} = l_0 + a_1 + a_2$$

Onde:

- $l_0$  é a distância entre as faces internas de dois apoios consecutivos;
- $a_1$  é o menor valor entre  $t_1/2$  e  $0,3 \cdot h$ ;
- $a_2$  é o menor valor entre  $t_2/2$  e  $0,3 \cdot h$ .

Figura 1 - Vãos efetivos em lajes



Fonte: Carvalho e Pinheiro (2009).

Desta forma, se descobre o valor de  $\lambda$ , dado pela seguinte expressão onde  $l_y$  representa o vão maior e  $l_x$  o menor, essa expressão trará de que forma a armadura da laje será efetuada.

Equação 8 – Cálculo para definição do tipo de armadura

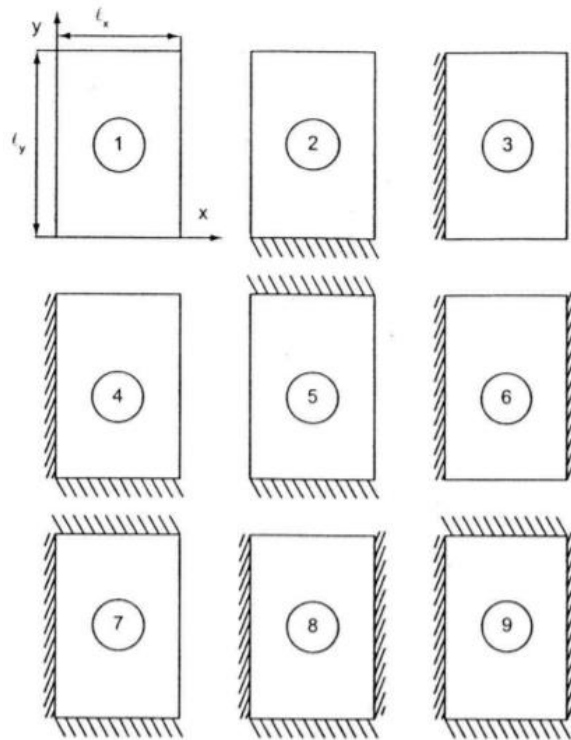
$$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$$

#### 2.5.1.4 Vinculação

Há três possíveis tipos de vinculação: borda livre, borda simplesmente apoiada e borda engastada. Deve-se salientar que para ser considerada borda engastada, a mesma deve estar no mesmo nível da laje adjacente. Caso ocorra de uma laje estar somente um pedaço apoiada é necessário analisar se esse pedaço está  $2/3$  ou mais apoiado e caso esteja, é preciso tratá-lo como engaste, caso não, será tratado como apoio simples.

Abaixo se encontra os nove casos possíveis de quadro de lajes.

Figura 2 - Situações de vinculação das placas isoladas constantes nos quadros



Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2016, p. 302).

#### 2.5.1.5 Carregamentos nas lajes

É necessário ser considerado o peso próprio do material, calculado multiplicando a espessura da laje pelo peso específico do concreto armado, peso de contra piso e revestimento e seguir a NBR 6120 (ABNT, 1980), onde consta que carga acidental se usa de acordo com a finalidade do edifício e do cômodo. Para a obtenção desse trabalho, utilizou-se como modelo um edifício residencial, o qual se tem por norma que dormitórios, salas, cozinhas e banheiros de  $1,5 \text{ kN/m}^2$  e área de serviços despensas e lavanderias de  $2 \text{ kN/m}^2$ .

Observa-se que onde não é definido em projeto o local exato das paredes, a NBR 6120 (ABNT, 1980) traz:

Quando forem previstas paredes divisórias, cuja posição não esteja definida no projeto, o cálculo de pisos com suficiente capacidade de distribuição transversal de carga, quando não for feito por processo exato, pode ser feito admitindo, além dos demais carregamentos, uma carga uniformemente distribuída por metro quadrado de piso não menor que um terço do peso por metro linear de parede pronta, observado o valor mínimo de  $1 \text{ kN/m}^2$ .

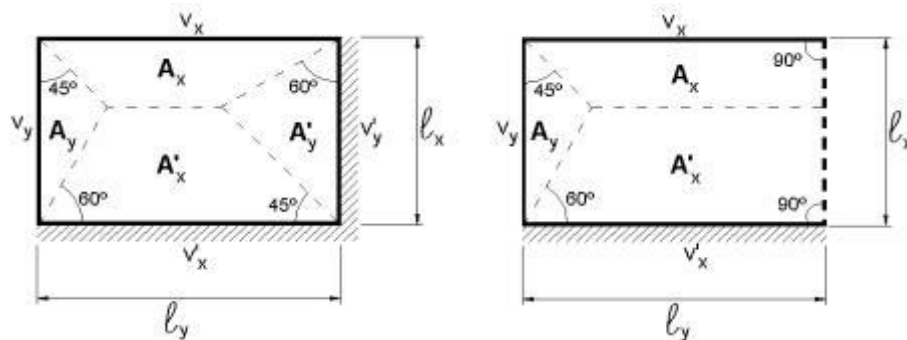
#### 2.5.1.6 Reações de apoio

Carvalho e Figueiredo Filho discorre sobre as reações de apoio (2016, p. 341):

A reação das lajes nas vigas de apoio pode ser obtida utilizando-se a expressão fundamental e o processo de séries. Entretanto, não existem referências bibliográficas em que se encontre um modo prático de calcular essas reações de forma correta, conforme pode ser verificado em Mazilli. Entretanto, de modo simplificado, pode-se considerar que a ação das lajes maciças nas vigas se faça de maneira uniforme. A ABNT:NBR 6118 (ABNT, 2014), item 14.7.6.1, traz o seguinte a respeito: a) As reações em cada apoio são as correspondentes as cargas atuantes nos triângulos ou trapézios determinados através das charneiras plásticas correspondentes a análise efetuada com os critérios de 14.7.4 (análise plástica), sendo que essas reações podem ser, de maneira aproximada consideradas uniformemente distribuídas sobre os elementos estruturais que lhes servem de apoio; b) Quando a análise plástica não for efetuada, as charneiras podem ser aproximadas por retas inclinadas, a partir dos vértices com os seguintes ângulos: - 45° entre dois apoios do mesmo tipo; - 60° a partir do apoio considerado engastado, se o outro for considerado simplesmente apoiado; - 90° a partir do apoio, quando a borda vizinha for livre.

Como mostra a figura abaixo:

Figura 3 – Exemplo de aplicação do processo das áreas



Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2007, p. 11.10).

Com isso, pode-se determinar as reações nas direções x e y, nas vigas com bordas simplesmente apoiadas:

Equação 9 - Cálculo da reação em x (bordas simplesmente apoiadas)

$$q_x = k_x * p * \frac{l_x}{10}$$

Equação 10 - Cálculo da reação em y (bordas simplesmente apoiadas)

$$q_y = k_y * p * \frac{l_x}{10}$$

Para as vigas em bordas engastadas as reações x' e y' são calculadas através das seguintes equações:

Equação 11 - Cálculo da reação em x (bordas engastadas)

$$q_x' = k_x' * p * \frac{l_x}{10}$$

Equação 12 - Cálculo da reação em y (bordas engastadas)

$$q_y' = k_y' * p * \frac{l_x}{10}$$



O fator  $k$  pode ser tabelado para os diversos casos de apoio das lajes e obtido através da Equação 8.

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2016, p. 341):

No caso de momentos negativos em face comum as duas lajes, é usual considerar o maior valor entre a média e 80% do maior; entretanto, a favor da segurança, recomenda-se tomar, para cálculo das armaduras negativas, o maior dos dois momentos nessa face.

Portanto, pode haver correções a se fazer nos momentos positivos. Sendo assim, caso haja a diminuição, ignora-se a correção e mantém-se o momento positivo a favor da segurança.

#### 2.5.1.7 Verificações de deformação excessivas

É a deformação máxima ocorrida em um elemento estrutural. Na verificação da laje deve ser considerada a existência de fissurações, o momento de inércia, as flechas imediata, diferida e total e os valores limites.

##### 2.5.1.7.1 Estado limite de formação de fissura

É calculado pela expressão abaixo, onde uma vez que  $M_d$  ultrapasse  $M_r$  (momento fletor de fissuração), a probabilidade de se iniciar uma abertura de fissura é grande.

Equação 13 - Cálculo do momento fletor

$$M_r = \frac{a * f_{ct} * I_0}{y_t}$$

Onde:

- $a = 1,5$ , para seções retangulares, no caso de lajes maciças  $Bw = 1 m$ ;
- $y_t$  é a distância do centro de gravidade a fibra mais tracionada;
- $I_0$  é o momento de inércia da seção bruta de concreto;
- $F_{ct}$  é a resistência à tração direta do concreto, adotada igual a  $f_{ctk,inf}$  para o estado limite de formação de fissura, ou seja:

Equação 14 - Cálculo da resistência à tração direta

$$F_{ct} = f_{ctk,inf} = 0,7f_{ctm} = 0,7 * 0,3 * fck^{2/3}$$

O momento fletor não deve ser maior, caso isso ocorra deve ser considerado uma probabilidade altíssima de fissuração.

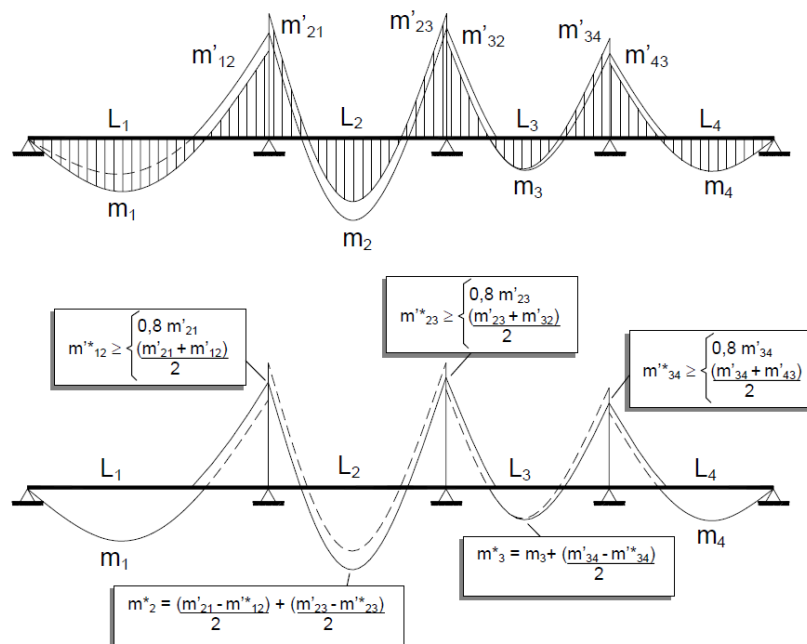
### 2.5.1.7.2 Momento fletores e compatibilização

A compatibilização dá-se devido aos momentos negativos entre as lajes engastadas terem dimensões diferentes, sendo necessário fazer uma compatibilização entre os momentos.

Segundo Giongo (2007), recomenda-se adotar, para esse momento negativo, o maior valor entre a média dos dois momentos fletores ou 80% do maior. Esse critério é razoável quando os momentos fletores negativos, entre as lajes vizinhas, são de mesma ordem de grandeza.

Muitas vezes isto acarreta em uma alteração no momento positivo, porém em fator da segurança pode-se ignorar.

Figura 4 - Compatibilização de momentos



Fonte: Pinheiro, Muzardo e Santos (2007, p. 11.14).

### 2.5.1.8 Dimensionamento das armaduras

Feita a contabilização dos momentos fletores, far-se-á necessário saber a altura útil da armadura, para que assim possa dar início ao dimensionamento da armadura. Para isso, a NBR 6118 (ABNT, 2014) traz alguns valores mínimos aos quais devem ser seguidos.

#### 2.5.1.8.1 Armaduras mínimas

- Armaduras negativas  $\rho_s \geq \rho_{min}$ ;
- Armaduras positivas de lajes armadas nas duas direções  $\rho_s \geq 0,67 * \rho_{min}$ ;
- Armaduras positiva (principal) de lajes armadas em uma direção  $\rho_s \geq \rho_{min}$ .

#### 2.5.1.8.2 Armaduras máximas

- Conforme NBR 6118 (ABNT, 2014), item 17.3.5.2.4, a soma das armaduras de tração e compressão ( $A_s + A'_s$ ) não deve ter valor maior que 4% da área de concreto da seção  $A_c$ , calculada em região fora da zona de emendas.

#### 2.5.1.8.3 Espaçamento entre as barras

O espaçamento máximo entre as barras deve ser o menor entre ambas.

Equação 15 - Cálculo do espaçamento máximo

$$S \leq \left\{ \begin{array}{l} 20 \text{ cm} \\ 2 * h \end{array} \right\}$$

O diâmetro máximo de qualquer barra da armadura de flexão deve ser:  $\phi_{max} \leq h/8$ .

#### 2.5.1.8.4 Armadura de distribuição e secundaria de flexão

- $\left(\frac{A_s}{S}\right) \geq 20\%$  da armadura principal e  $0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ ;
- $\rho_s \geq 0,5 * \rho_{min}$

Segundo item 20.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014), as lajes armadas em duas direções devem ter uma área de 20% da área da armadura principal e um espaçamento de no máximo 33 cm por metro.

Definidos os limites mínimos e máximos da armadura, deve ser determinado a altura da laje e a altura útil e definido o posicionamento da linha neutra.

Como visto anteriormente a NBR 6118 (ABNT, 2014) não traz um valor mínimo específico para a altura útil da armadura, mas a NBR 6118 (ABNT, 1980) apresenta a seguinte equação, informando que as condições de deformações limites estarão atendidas quando o valor útil respeitar a seguinte equação:

Equação 16 - Cálculo da altura útil da laje

$$d \geq \frac{l}{\Psi_2 + \Psi_3}$$

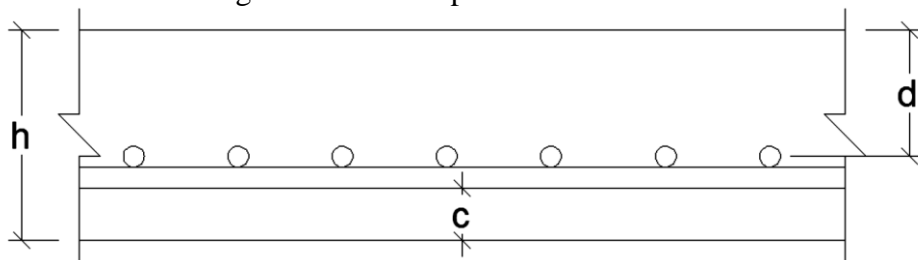
Com isso, o valor de h pode ser determinado através de:

Equação 17 - Cálculo da altura da laje

$$h = d + c + \phi + \frac{\phi}{2}$$

Como mostra a figura abaixo:

Figura 5 - Valores para cálculo do h



Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho (2016, p. 338)

Com isso, deve ser confirmado se o  $d$  calculado se encontra acima do  $d_{min}$ , podendo ser determinado com a seguinte equação:

Equação 18 - Cálculo da altura útil mínima

$$d_{min} = 2,0 * \sqrt{\frac{M_d}{b_w * f_{cd}}}$$

Com auxílio de tabelas pode-se utilizar as seguintes expressões respeitando o domínio conforme NBR 6118 (ABNT, 2014).

Equação 19 – Cálculo do KMD

$$KMD = \frac{M_d}{b_w * d^2 * f_{cd}}$$

Logo se obtém a área de aço:

Equação 20 - Cálculo da área de aço

$$A_s = \frac{M_d}{kz * d * f_s}$$

#### 2.5.1.8.5 Verificações ao cisalhamento

Geralmente, apenas o concreto é suficiente para resistir ao esforço da força cortante, porém a NBR 6118 (ABNT, 2014) cita algumas verificações que permite prescindir da armadura transversal para resistir a esse esforço, pode ser abolido, desde que a ancoragem

esteja conforme o item 9.4.5 da mesma norma, onde a força cortante solicitante de cálculo ( $V_{sd}$ ) esteja menor ou igual à resistência ao cisalhamento ( $V_{Rd1}$ ), ou seja:

Equação 21 - Verificação da força cortante

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

Onde:

- $\tau_{Rd} = 0,25 * f_{ctd} = 0,25 * f_{ctk,inf} / \gamma_c$ ;
- $K = 1$  para elementos em que 50% da armadura inferior não chegam até ao apoio;
- $K = (1,6 - d) \geq 1$ , com  $d$  em metros;
- $\rho_1 = A_{s1} / b_w * d \leq 0,02$ ;
  - $A_{s1}$  é a área da armadura de tração que se estende no mínimo até  $d - l_{b,nec}$ , além da seção considerada, sendo  $l_{b,nec}$  o comprimento de ancoragem necessário definido no item 9.4.2.5 da referida norma;
- $\sigma_{cp} = N_{sd} / A_c$  ( $N_{sd}$  é a força longitudinal na seção devida a pretensão ou carregamento);
- $b_w$  é a largura mínima da seção ao longo da altura útil  $d$ .

Para a compressão diagonal do concreto ou bielas comprimidas em um elemento sem armadura de cisalhamento, comparado à força cortante solicitante de cálculo  $V_{sd}$  com a resistência de cálculo  $V_{Rd2}$  dado por:

Equação 22 – Cálculo do esforço resistente de puncionamento

$$V_{Rd2} = 0,5 * a_{v1} * f_{cd} * b_w * 0,9 * d$$

Onde:

- $a_{v1} = \left(0,7 - \frac{f_{ck}}{200}\right) \leq 0,5$ ,  $f_{ck}$  em MPa;
- $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$  é a resistência de cálculo do concreto.

### 2.5.2 Laje nervurada

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003, p. 86), lajes nervuradas são “[...] lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração é constituída por nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte [...]”.

Esse tipo de laje elimina o sistema tradicional de construção, que seria o de lajes apoiando-se em vigas e estas nos pilares, como complementa (CARVALHO; PINHEIRO,

2009). Nos sistemas de lajes sem vigas, estas são eliminadas, de modo que as lajes se apoiam diretamente sobre os pilares, devendo estar rigidamente ligadas a eles.

Porém, por ter a carga da laje transmitida diretamente aos pilares, ocorre um efeito de punção na laje, que nada mais é do que o pilar – por ter uma área pequena comparada com a laje – tende a romper a mesma, pois quanto menor a área maior seria a tensão.

Conforme o entendimento de Carvalho e Pinheiro (2009, p. 81):

Para diminuir essas tensões e evitar a possibilidade de puncionamento, os pilares podem ter um engrossamento de sua seção na região da ligação entre a laje, que é chamado capitel. Com a mesma finalidade, as lajes podem ter a sua espessura aumentada nessa região.

Entretanto, ambas as soluções citadas acima, acabam por sobrecarregar as fundações.

#### 2.5.2.1 Características do sistema

De acordo com Carvalho e Pinheiro (2009, p. 13), o método foi desenvolvido para suprir o alto consumo de material que era empregado nas lajes maciças, assim como para vencer vãos maiores impostos pela arquitetura contemporânea. Segue algumas características:

1. Economia no consumo de material e mão de obra, quando comparado a lajes maciças cerca de 30%.
2. Possui maior resistência aos momentos positivos com isso possibilitando vencer maiores vãos.
3. Difícil compatibilização dos projetos complementares sendo obrigado a forrar para esconder os sistemas.

Pelo fato de as nervuras se encontrarem predominantemente na parte inferior, resistem mal a momento negativo.

#### 2.5.2.2 Critérios para projetos e método de cálculo

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), as lajes nervuradas podem ser moldadas *in loco* ou com nervuras pré-moldadas. Para as moldadas *in loco*, o dimensionamento pode ser feito seguindo as prescrições relativas às estruturas de elementos de placas (lajes maciças), porém a mesma ressalta algumas considerações.

Quando as verificações não atenderem aos critérios da norma citada, para realizar o cálculo através de lajes maciças, a mesma deve ter a capa dimensionada através de lajes maciças e apoiada em grelha de vigas.

### 2.5.2.3 Vinculação

Assim como as lajes maciças, as lajes nervuradas podem ter suas bordas engastadas, apoiadas e contínuas. No entanto, evita-se utilizar engastes e contínuas pelo fato do aparecimento do momento negativo, o que para esse tipo de estrutura não é recomendado, partindo do princípio que a capa de concreto é muito resistente à compressão e não à tração.

Para suprir essa deficiência do método, uma das alternativas é a fazer uma mesa invertida, suprimindo a tração. Todavia, esse método é pouco usual devido ao grande aumento de peso próprio da estrutura, o que acarreta numa sobrecarga para as fundações. Visto isso, a solução mais adotada é a concretagem maciça de uma zona maior onde é posto aço na parte superior para atender ao momento máximo negativo.

### 2.5.2.4 Vãos efetivos

A NBR 6118 relata que, se for seguida as dimensões limites de deslocamentos e aberturas de fissuras, os vãos efetivos podem ser calculados da mesma forma que as lajes maciças, conforme o item 2.5.1.3 deste trabalho.

### 2.5.2.5 Dimensões mínimas

A NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 74-75) estabelece algumas dimensões mínimas que devem ser seguidas para lajes nervuradas:

- A espessura da mesa, quando não houver tubulações, horizontais embutidas, precisa ser maior ou igual a 1/15 das distâncias entre nervuras e não menor que 3 cm; o valor mínimo absoluto deve ser 4 cm quando existirem tubulações embutidas de diâmetro máximo 12,5 mm;
- A espessura das nervuras não pode ser inferior a 5 cm; nervuras com espessura menor que 8 cm não devem conter armadura de compressão (caso de armadura dupla) Para o projeto das lajes nervuradas, isto é determinação dos esforços solicitantes e verificação da segurança estrutural, precisam ser obedecidos as seguintes condições:
  - Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a 65 cm, pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa, e para a verificação do cisalhamento da região das nervuras, permite-se a consideração dos critérios de laje;
  - Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 cm e 110 cm, exige-se a verificação da flexão da mesa e as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas; permite-se essa verificação como lajes se o espaçamento entre eixos de nervuras for menor que 90cm e a espessura média das nervuras for maior que 12cm;
  - Para lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras maior que 110cm, a mesa deve ser projetada como laje maciça, apoiada na grelha de vigas, respeitando-se os seus limites mínimos de espessura.

A norma citada não traz nenhuma recomendação quanto à altura em relação ao vão efetivo, contudo a mesma especifica uma fórmula onde é possível determinar a altura  $d$ , o que possibilita achar a altura  $h$  da mesma. Vale ressaltar que é somente uma estimativa, podendo ser alterada dependendo dos deslocamentos (flechas) e deformações da seção transversal.

#### 2.5.2.6 Carregamentos nas lajes

As ações a serem consideradas estão dispostas na NBR 6120 (ABNT, 1980) e NBR 6118 (ABNT, 2014) são divididas em duas sendo elas diretas e ações variáveis normais.

Deve ser considerado o peso próprio do material, onde se multiplica a espessura pelo peso específico do concreto armado, peso de contra piso, revestimento que geralmente fica em torno de 0,5 kN/m<sup>2</sup> a 1 kN/m<sup>2</sup> e revestimentos de forro que varia entre 0,1 kN/m<sup>2</sup> a 0,5 kN/m<sup>2</sup>. Ressalta-se que deve ser consultado o projeto arquitetônico para conhecimento do material exato que será utilizado, pois há materiais que possuem peso específico elevado, como o granito, e seguir a NBR 6120 (ABNT, 1980), onde consta que carga acidental usar de acordo com a finalidade do edifício e do cômodo. Observando sempre que este trabalho foi baseado em um edifício residencial e tem-se por norma que em dormitórios, salas, cozinhas e banheiros considera-se 1,5 kN/m<sup>2</sup> e área de serviços despensas e lavanderias, considera-se 2kn/m<sup>2</sup>.

Analisa-se que onde não é definido em projeto o local exato das paredes a NBR 6120 (ABNT, 1980, p. 1) traz:

Quando forem previstas paredes divisórias, cuja posição não esteja definida no projeto, o cálculo de pisos com suficiente capacidade de distribuição transversal de carga, quando não for feito por processo exato, pode ser feito admitindo, além dos demais carregamentos, uma carga uniformemente distribuída por metro quadrado de piso não menor que um terço do peso por metro linear de parede pronta, observado o valor mínimo de 1kN/m<sup>2</sup>.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo é composto dos procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

#### 3.1 A PESQUISA CIENTÍFICA

A pesquisa científica é estratégia de construção do conhecimento incomparável. Permite ao investigador competência para analisar e intervir no cenário social em que se insere. Ao mesmo tempo, possibilita uma capacidade de interpretação da realidade não presente nas tradicionais e positivistas formas de reprodução até então vivenciadas por todos os brasileiros aprendizes.

Pesquisa não pode reduzir-se ao estereótipo acadêmico da sofisticação e da atividade especial. Define-se como pesquisador, de modo geral, a figura detentora pelo menos do título de mestre, e mais tipicamente de doutor, em cujo currículo conta, além do domínio acadêmico usual, manuseio estatístico e informático e, geralmente, participação de financiamentos significativos. Aí produzem-se teses, teorias, práticas alternativas, instrumentos metodológicos, etc. Ademais, pesquisa é considerada atividade especial, por ser realizada em lugar e horário especiais, ou por referir-se a uma pequena elite, ou por destacar-se das outras atividades, que já não são feitas, sobretudo ensino e extensão. (DEMO, 2012, p. 36).

Os pesquisadores, dotados de sabedoria e humildade, deixam a condição de meros lacaios sociais para serem protagonistas de novas possibilidades e perspectivas para a sociedade e para a ciência. A pesquisa significa a busca de respostas a um problema central, uma dúvida que deverá ser respondida através do planejamento rigoroso e sistematizado.

#### 3.2 O TIPO DE ESTUDO REALIZADO

A pesquisa realizada caracterizou-se como um estudo de abordagem qualitativa, de nível exploratório cujo método de procedimento adotado foi o estudo comparativo.

As pesquisas qualitativas possibilitam a percepção holística do mundo ao redor, são flexíveis porque admitem mudanças no processo durante seu percurso e respeitam a subjetividade do pesquisador.

[...] se desenvolve numa situação natural, é rico em dados descritivos, obtidos no contato direto do pesquisador com a situação estudada, enfatiza mais o processo do que o produto, se preocupa em retratar a perspectiva dos participantes, tem um plano aberto e flexível e focaliza a realidade de forma complexa e contextualizada. (ARAÚJO e OLIVEIRA, 1997, p. 11).

O nível, exploratório, é determinado quando o pesquisador não possui profundo conhecimento do tema e que está em vias de um gradual aprofundamento no mesmo.

São desenvolvidas com o objetivo de proporcionar visão geral de tipo aproximativo acerca de determinado fato. Esse tipo de pesquisa é realizada quando o tema escolhido é pouco explorado e torna-se difícil sobre ele formular hipóteses precisas e operacionáveis. (GIL, 1999, p. 43).

O método comparativo, como procedimental, consiste em procurar o avanço do conhecimento diante do exame simultâneo das semelhanças e diferenças entre os objetos que se quer conhecer. Sem dúvida, a mera busca de diferenças e semelhanças não é mais que uma operação mental de um primeiro nível, muito simples, que não ‘permite concluir nada em matéria de racionamento’.

A comparação constitui então, um método científico geral, que permite levantar os problemas a investigar, e funciona também como um dos métodos específicos, vale dizer, dos que permitem analisar os problemas assim levantados e comprovar a validade das soluções. Entretanto, não nasce simplesmente dos fatos, pressupõe uma prévia sistematização e o estabelecimento de uma teoria que o sustente. (LAHORE, 2008, p. 172).

É fundamental destacar que, os sistemas a serem comparados devem, sempre, apresentarem determinado grau de analogia, para que os resultados sejam relevantes a partir de criteriosa análise comparativa.

### 3.3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Foi realizado um levantamento bibliográfico e estudo das características de cada laje. Em seguida, foi efetuado o cálculo de 8 lajes, sendo as mesmas com vãos entre 6 m a 10,5 m, onde 4 serão dimensionadas como lajes maciças e 4 como lajes nervuradas. Para o cálculo de dimensionamento, foram utilizadas tabelas de aço e de lajes, apresentadas no anexo 1.

Nos resultados serão comparados alguns aspectos como o volume de concreto, aço e forma obtido em cada caso, as flechas imediatas e seus pesos próprios.

## 4 ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para os dimensionamentos de lajes nervuradas e maciças. Os resultados estão organizados com os dados individuais dos tipos de laje e, em seguida, uma comparação entre os dados obtidos para os dois tipos de lajes aqui investigados.

### 4.1 LAJE MACIÇA

Abaixo segue planilha apresentando os valores referentes ao tempo de desforma das lajes maciças.

Tabela 1 - Valores referentes à desforma

Laje Maciça	6,0 x 6,0	6,0 x 7,5	6,0 x 9,0	6,0 x 10,5
Tempo de desforma (dias)	14	14	14	14
Idade em meses ( $t_0$ )	0,46	0,46	0,46	0,46
Tempo infinito (NBR 6118)	2	2	2	2
Flecha no tempo	1,46	1,46	1,46	1,46
Fluência do concreto	2,46	2,46	2,46	2,46

Fonte: Autor (2018).

Para que pudesse haver uma comparação, algumas cargas foram mantidas constantes, como o revestimento e a carga acidental que foram retiradas da NBR 6120, considerando a máxima carga para utilização em um edifício multifamiliar, visto que para dormitórios e outros cômodos, a norma traz valores menores. Para a alvenaria de vedação, foi utilizado tijlo cerâmico vazado, com dimensões de 14 x 19 x 29 cm, sendo que o pé direito considerado foi de 2,8 m.

Tabela 2 - Carregamento das lajes

Laje Maciça	6,0 x 6,0	6,0 x 7,5	6,0 x 9,0	6,0 x 10,5
Peso próprio (kN/m <sup>2</sup> )	3,75	4,25	4,5	5
Revestimento (kN/m <sup>2</sup> )	1,00	1,00	1,00	1,00
Carga Acidental (kN/m <sup>2</sup> )	2,00	2,00	2,00	2,00
Paredes (kN/m <sup>2</sup> )	1,70	1,53	1,42	1,33
Total (kN/m <sup>2</sup> )	8,45	8,78	8,92	9,33

Fonte: Autor (2018).

Abaixo, são apresentados os valores limites das flechas para cada situação de carregamentos e tamanho das lajes, recordando que o valor utilizado, considerando somente a flecha nas lajes, é de  $(l/375)$ .

Tabela 3 - Combinações utilizadas para o cálculo

Laje Maciça	6,0 x 6,0	6,0 x 7,5	6,0 x 9,0	6,0 x 10,5
Combinações permanentes (cm)	1,6	1,6	1,6	1,6
Combinações carga acidental (cm)	1,14	1,14	1,14	1,14

Fonte: Autor (2018).

Para o cálculo das flechas elásticas não se deve considerar o efeito de fissuração do concreto. É possível verificar duas flechas, sendo uma para cargas permanentes na estrutura e outra para carga acidental. Porém, o mais provável é que a verificação que não venha a obter êxito seja por meio da flecha elástica total, considerando o efeito de fluência no concreto, uma vez que foi considerado a desforma com 14 dias e efetuado para o tempo infinito acima de 70 meses. Os valores se encontram a seguir:

Tabela 4 – Cálculo da flecha para os diferentes vãos

Laje Maciça	6,0 x 6,0	6,0 x 7,5	6,0 x 9,0	6,0 x 10,5
Combinações permanentes (cm)	0,55	0,58	0,64	0,58
Combinações carga acidental (cm)	0,15	0,15	0,17	0,14
Flecha total (m)	1,34	1,44	1,57	1,42

Fonte: Autor (2018).

Continuamente, serão apresentados os cálculos referentes ao cisalhamento e se é necessário ou não a utilização de armadura. Para o dimensionamento, foi utilizado a força cortante em cada laje, que foram submetidas a todas as verificações, sendo totalmente admitidos, pois quanto mais aumentava-se a altura da mesma, mais resistência fornecia para verificar a compressão diagonal do concreto e compressão excessiva nas bielas de concreto, como demonstrado em seguida:

Tabela 5 – Resultados dos cálculos de laje maciça

Laje Maciça	6,0 x 6,0	6,0 x 7,5	6,0 x 9,0	6,0 x 10,5
$V_s$	12,67	15,8	17,81	19,99
$V_{sd}$	17,74	22,12	24,98	27,99
$\tau_{rd}$ (kN/m <sup>2</sup> )	320,62	320,62	320,62	320,62
K	1,49	1,47	1,46	1,44
$\rho_l$	0	0	0	0
$V_{rd1}$	63,05	73,52	78,64	88,64
$\alpha_l$	0,5	0,5	0,5	0,5
$F_{cd}$ (kN/m <sup>2</sup> )	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71
$V_{rd2}$	44,19	52,23	56,25	64,28

Fonte: Autor (2018).

O dimensionamento das armaduras é semelhante ao de vigas à flexão simples, mudando somente a largura, que para lajes é de 1 m. Sabendo disso, apresenta-se os resultados para as duas direções, uma vez que todas as lajes contidas nesse trabalho serão

armadas em cruz e portanto, duas direções de armaduras. Como era esperado, a quantidade de aço aumenta conforme a espessura da laje cresce, como comprova a tabela.

Tabela 6 – Valores de área de aço

Laje Maciça	6,0 x 6,0		6,0 x 7,5		6,0 x 9,0		6,0 x 10,5	
Direção	x	y	x	y	x	y	x	y
KMD	0,086	0,086	0,091	0,065	0,1	0,054	0,093	0,0,4
Kz	0,947	0,947	0,943	0,96	0,937	0,969	0,943	0,975
As (cm <sup>2</sup> /m)	5,04	5,04	6,33	4,41	7,53	3,93	7,9	3,34
As,min (cm <sup>2</sup> /m)	1,65		1,95		2,1		2,4	

Fonte: Autor (2018).

As reações das lajes nas vigas ocorreram conforme previsto, quanto mais quadrada for a laje, mais distribuída entre as vigas ficará a carga da laje. Além disso, quanto mais retangular for a laje, maior vai ser a carga nos sentidos perpendiculares do menor vão, como demonstrado.

Tabela 7 – Valores de reações nas vigas

Laje Maciça	6,0 x 6,0		6,0 x 7,5		6,0 x 9,0		6,0 x 10,5	
Direção	Qx	Qy	Qx	Qy	Qx	Qy	Qx	Qy
As,min (cm <sup>2</sup> /m)	12,67	12,67	15,80	13,16	17,8	13,4	19,99	14,00

Fonte: Autor (2018).

## 4.2 LAJE NERVURADA

Para o cálculo de lajes nervuradas, alguns aspectos foram fixados, com o intuito de estabelecer um padrão ao dimensionamento e assim poder fazer as devidas comparações. Fixou-se o tamanho da cubeta, sendo quadrada de 60 cm, enquanto as nervuras foram mantidas em 9 cm, assim como a capa de concreto que ficou em 4 cm. O material utilizado como inerte foi o EPS, que possui peso específico 0,25 kN/m<sup>3</sup>, portanto foram alterados somente a altura final das lajes.

Abaixo segue planilha apresentando os valores referentes ao tempo de desforma das lajes nervuradas

Tabela 8 - Tempo de desforma das lajes nervuradas

Laje Nervurada	6,0 x 6,0	6,0 x 7,5	6,0 x 9,0	6,0 x 10,5
Tempo de desforma (dias)	14	14	14	14
Idade em meses (t <sub>0</sub> )	0,46	0,46	0,46	0,46
Tempo infinito (NBR 6118)	2	2	2	2
Flecha no tempo	1,46	1,46	1,46	1,46
Fluência do concreto	2,46	2,46	2,46	2,46

Fonte: Autor (2018).

Para que pudesse haver uma comparação, algumas cargas foram mantidas constantes, como o revestimento e a carga accidental que foi retiradas da NBR 6120, considerando a máxima carga para utilização em um edifício multifamiliar, visto que para dormitórios e outros cômodos, a norma traz valores menores. Para a alvenaria de vedação, o tijolo utilizado foi cerâmico vazado, com dimensões de 14 x 19 x 29 cm, sendo que o pé direito considerado foi de 2,8 m.

Tabela 9 - Carregamento das lajes nervuradas

Laje Nervurada	6,0 x 6,0	6,0 x 7,5	6,0 x 9,0	6,0 x 10,5
Peso próprio (kN/m <sup>2</sup> )	1,57	1,69	1,75	1,82
Revestimento (kN/m <sup>2</sup> )	1,00	1,00	1,00	1,00
Carga Accidental (kN/m <sup>2</sup> )	2,00	2,00	2,00	2,00
Paredes (kN/m <sup>2</sup> )	1,70	1,53	1,42	1,33
Total (kN/m <sup>2</sup> )	6,27	6,22	6,17	6,15

Fonte: Autor (2018).

Abaixo, apresentam-se os valores limites das flechas para cada situação de carregamentos e tamanho das lajes, recordando que o valor utilizado considerando somente a flecha nas lajes é de  $(l/375)$ .

Tabela 10 - Carregamento das lajes nervuradas

Laje Nervurada	6,0 x 6,0	6,0 x 7,5	6,0 x 9,0	6,0 x 10,5
Combinações permanentes (cm)	1,6	1,6	1,6	1,6
Combinações carga accidental (cm)	1,14	1,14	1,14	1,14

Fonte: Autor (2018).

Para o cálculo das flechas elásticas não deve-se considerar o efeito de fissuração do concreto. É possível verificar duas flechas, sendo uma para cargas permanentes na estrutura e outra para carga accidental. Porém, o mais provável é que a verificação que não venha a obter êxito seja por meio da flecha elástica total, considerando o efeito de fluência no concreto, uma vez que foi considerado a desforma com 14 dias e efetuado para o tempo infinito acima de 70 meses. Os valores de encontram a seguir:

Tabela 11 - Cálculo da flecha para os diferentes vãos

Laje Nervurada	6,0 x 6,0	6,0 x 7,5	6,0 x 9,0	6,0 x 10,5
Combinações permanentes (cm)	0,58	0,56	0,58	0,57
Combinações carga accidental (cm)	0,23	0,22	0,23	0,23
Flecha total (m)	1,44	1,39	1,45	1,41

Fonte: Autor (2018).

Continuamente, serão apresentados os cálculos referentes ao cisalhamento e se é necessário ou não a utilização de armadura. Para o dimensionamento, foi utilizado a força cortante em cada laje, que foram submetidas a todas as verificações, sendo totalmente aprovadas, pois quanto mais aumentava-se a altura da mesma, mais resistência fornecia para

verificar a compressão diagonal do concreto e compressão excessiva nas bielas de concreto, como demonstrado em seguida:

Tabela 12 - Resultados dos cálculos de laje nervurada

Laje Nervurada	6,0 x 6,0	6,0 x 7,5	6,0 x 9,0	6,0 x 10,5
Vs	9,32	11,08	12,19	13,02
Vsd	13,05	15,52	17,17	18,23
$\tau_{rd}$ (kN/m <sup>2</sup> )	166,1	186,45	179,67	207,57
K	1,5	1,48	1,47	1,46
$\rho_1$	0	0	0	0
Vrd1	29,89	39,73	45,55	50,91
$\alpha_1$	0,5	0,5	0,5	0,5
Fcd (kN/m <sup>2</sup> )	1785,71	1785,71	1785,71	1785,71
Vrd2	40,17	48,21	52,23	56,25

Fonte: Autor (2018).

O dimensionamento das armaduras é semelhante ao de vigas à flexão simples, uma vez que a linha neutra esteja dentro da capa de concreto, mudando somente a largura que, para lajes nervuradas, seria a distância entre nervuras. Sabendo disso, apresenta-se os resultados para as duas direções, uma vez que todas as lajes contidas neste trabalho foram armadas em cruz e portanto terão duas direções de armaduras. Como era de se esperar a quantidade de aço aumenta conforme a espessura da laje cresce como comprova a tabela.

Tabela 13 – Cálculo da área de aço

Laje Nervurada	6,0 x 6,0		6,0 x 7,5		6,0 x 9,0		6,0 x 10,5	
Direção	x	y	x	y	x	y	x	y
KMD	0,13	0,13	0,127	0,065	0,135	0,073	0,134	0,058
Kz	0,92	0,92	0,92	0,96	0,917	0,957	0,917	0,967
As (cm <sup>2</sup> /m)	3,69	3,69	4,33	3	5	2,58	5,33	2,21

Fonte: Autor (2018).

As reações das lajes nas vigas ocorreram conforme previsto. Quanto mais quadrada for a laje, mais distribuída entre as vigas ficara a carga da laje, como também quanto mais retangular for a laje maior vai ser a carga nos sentidos perpendiculares do menor vão. No entanto, como era de se esperar quando maior a laje, maior a carga distribuída nas vigas como demonstrado.

Tabela 14 – Valores de reações nas vigas

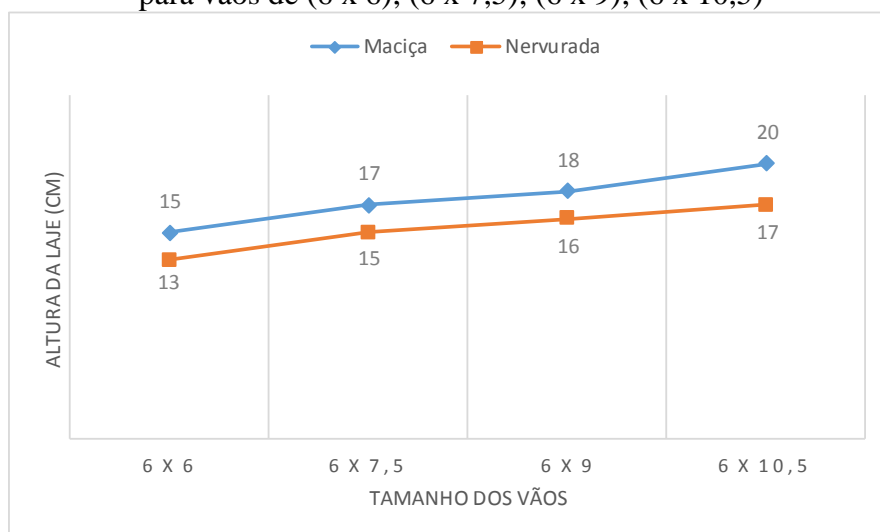
Laje Maciça	6,0 x 6,0		6,0 x 7,5		6,0 x 9,0		6,0 x 10,5	
Direção	Qx	Qy	Qx	Qy	Qx	Qy	Qx	Qy
As,min (cm <sup>2</sup> /m)	9,39	9,39	11,19	9,33	12,32	9,25	13,17	9,22

Fonte: Autor (2018).

### 4.3 COMPARAÇÃO ENTRE LAJE MACIÇA E NERVURADA

As lajes maciças apresentaram um valor de altura maior que as lajes nervuradas. Isso se deu em grande parte, devido ao seu próprio peso, pois quanto mais aumentava-se a altura para que fosse possível atender todas especificações normativas, mais o peso próprio aumentava. Conforme sabido que abaixo da linha neutra o concreto auxilia pouco em relação à tração, o mesmo poderia ser substituído por um material inerte ou até mesmo que tenha um peso próprio inferior ao do concreto, visto que o mesmo possui um alto peso específico. De acordo com a pesquisa, a altura das lajes nervuradas ficou abaixo das maciças. Grande parte desse resultado é pelo fato da laje nervurada trabalhar com um material de baixo peso específico abaixo da linha neutra.

Figura 6 - Relação entre Altura da laje vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5)

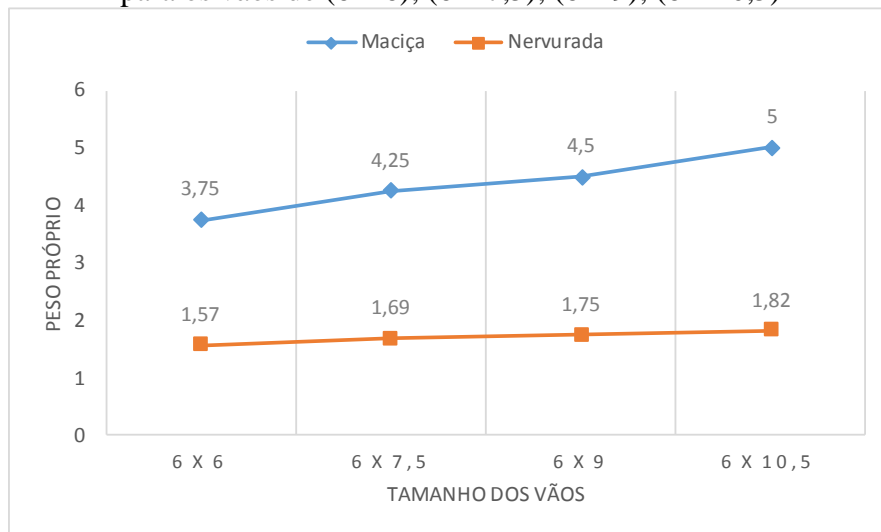


Fonte: Autor (2018).

Um dos resultados que mais apresentaram diferenças entre um método e outro foi o peso próprio da laje. A laje maciça de dimensões 6,0 m x 7,5 m, quando comparada à laje nervurada de mesma dimensão e carga, apresenta uma diferença de 60%. Essa diferença cresce quanto maior os vãos. Quando ocorre uma diferença de peso próprio dessa magnitude, imediatamente pensa-se em toda a estrutura, pois as vigas absorveram esse peso que passa para os pilares, e são transmitidos para as fundações, que dissipam no solo. Pensando nisto como um todo, pode-se afirmar que o peso da laje interfere não somente no dimensionamento da laje em si, mas em todos os dimensionamentos.



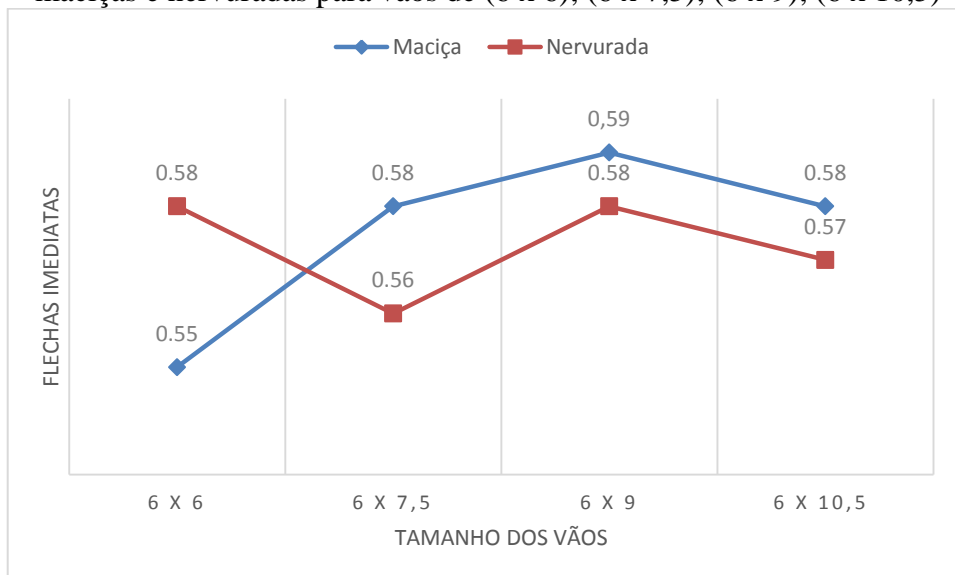
Figura 7 – Relação entre peso próprio vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para os vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5)



Fonte: Autor (2018).

Como todos os cálculos foram efetuados no limite da flecha permitida pela norma brasileira, a flecha máxima de ambas as lajes não teve grandes variações. No entanto, foi analisada a flecha imediata perante as cargas permanentes e foi observada uma não linearidade nos resultados, a qual deve-se pela pouquíssima diferença entre um dimensionamento e outro, visto que não é usual dimensionar lajes com números fracionados, pois ficaria inviável ter essa precisão na obra.

Figura 8 - Relação entre flecha imediata de carga permanente vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5)

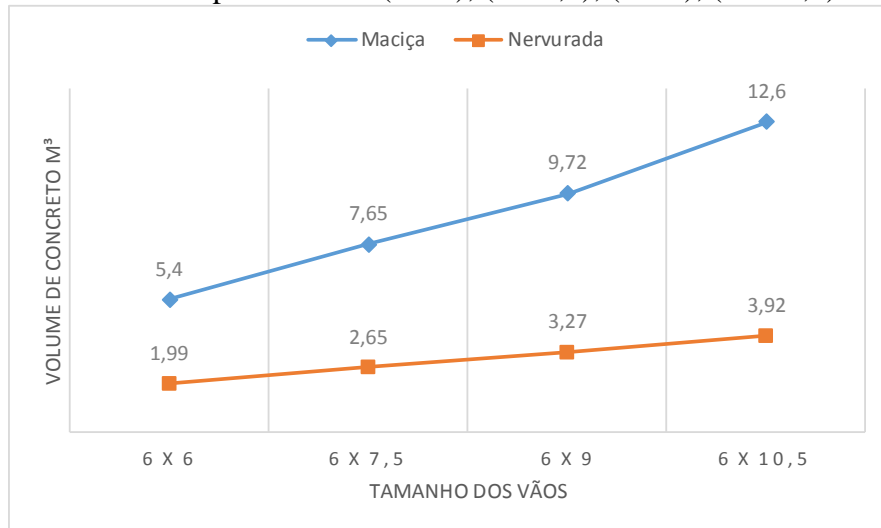


Fonte: Autor (2018).

O peso próprio da laje maciça fez com o consumo de concreto, quando comparado ao outro método, obtivesse uma diferença média de 63%, ou seja, enquanto uma laje maciça de 6,0 x 10,5 m consome 12,6 m<sup>3</sup> de concreto, a laje nervurada com as mesmas dimensões e

cargas consome 3,92 m<sup>3</sup>. Ao analisar esses valores em questões financeiras, pode-se considerar um grande desperdício de dinheiro e material.

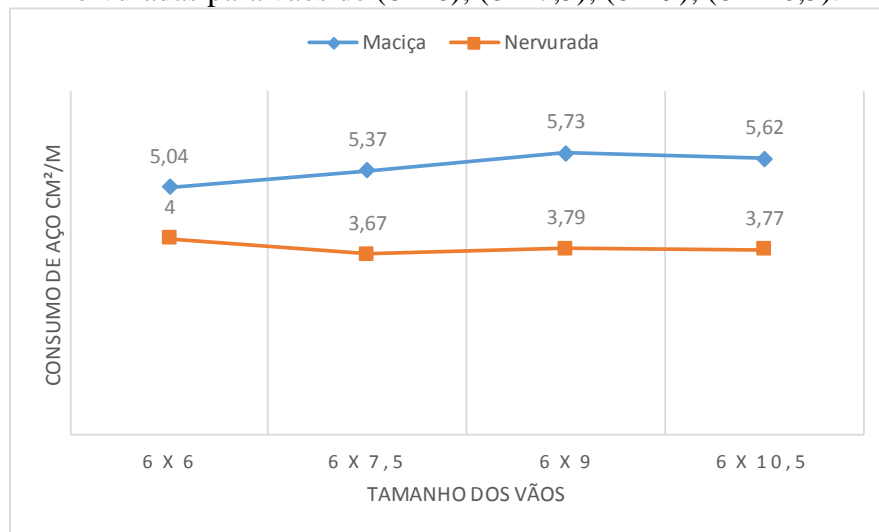
Figura 9 - Relação entre volume de concreto vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5)



Fonte: Autor (2018).

Como a resistência a tração do concreto equivalendo a 1/10 da de compressão, aceita-se que o concreto não é o melhor material para trabalhar nesse tipo de esforço, então coloca-se o aço que possui uma resistência a tração maior que a do concreto. As lajes maciças por possuírem propriedades como o peso próprio maior que da laje nervurada, acabam tendo que receber uma quantidade maior de aço por metro para poder suprir esse momento positivo, ocasionado em partes pelo próprio peso da estrutura. Para as dimensões de lajes estudadas, as variações ficam em torno de 21% a 34%. Supondo uma laje maciça de dimensões de 6 x 9 m e sabendo-se que a mesma deve ser armada em cruz, tem-se uma quantidade de aço necessária para os sentidos em  $x$  e  $y$ , também conhecidos  $L_x$  e  $L_y$ , sendo respectivamente para a laje citada acima 7,54 e 3,94 cm<sup>2</sup>/m; já para uma laje nervurada chegamos a valor de 5,0 cm<sup>2</sup>/m em  $L_x$  e 2,59 cm<sup>2</sup>/m em  $L_y$ , mostrando uma redução de quase 35% no consumo de aço.

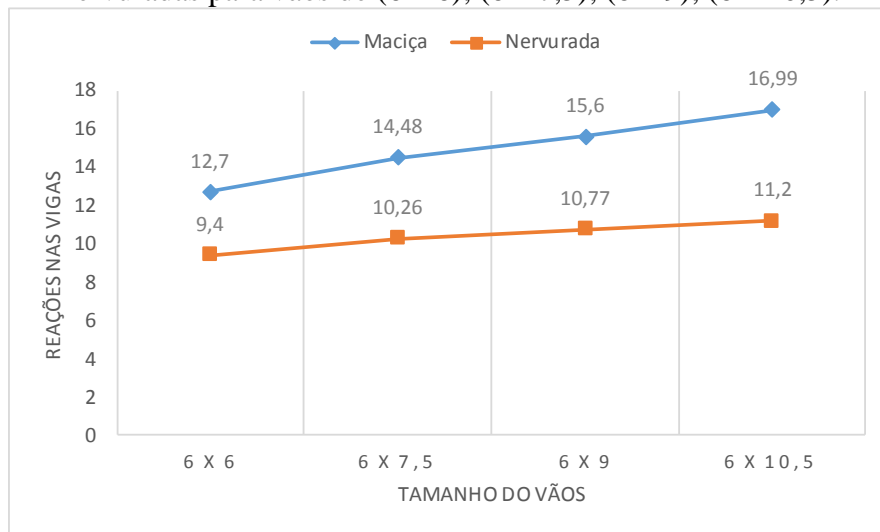
Figura 10 - Relação entre consumo de aço vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5).



Fonte: Autor (2018).

Como citado anteriormente, as cargas oriundas das lajes são descarregadas nas vigas, o que é chamado de reações nas vigas, ou seja, é o peso que a laje transfere às vigas por metro. Com o aumento do peso próprio da laje, automaticamente o peso que deve ser absorvido pela viga também aumenta. Os valores apresentados a seguir no exemplo correspondem às médias das reações nas vigas perpendiculares às direções  $L_x$  e  $L_y$ , respectivamente; a viga que recebe a carga oriunda do sentido em  $L_x$  de uma laje maciça de 6 x 10,5 m é de 19,99 kN/m, já em  $L_y$  é de 14,00 kN/m. Se comparar isso com a reação de uma laje nervurada, chegam-se às seguintes reações nas vigas:  $L_x$  de 13,18 kN/m e  $L_y$  de 9,22 kN/m. Isso mostra o quanto a estrutura fica carregada com as lajes maciças. Para se ter ideia do aumento das reações nas vigas, obtêm-se valores em média de 30% maiores em vigas com laje maciças.

Figura 11 - Relação entre reações nas vigas vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5).

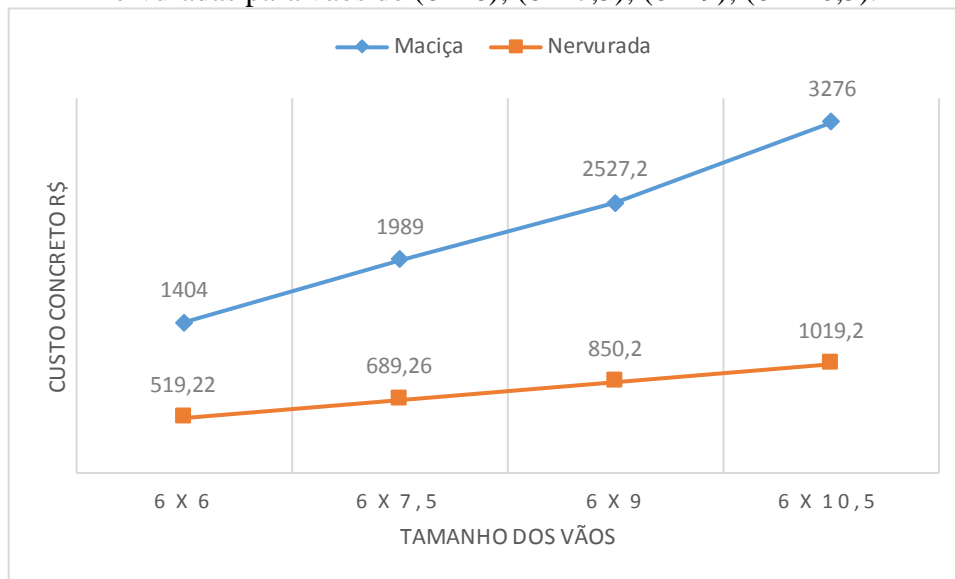


Fonte: Autor (2018).

Botelho e Marchetti (2015) dizem que um livro de engenharia que não fala em custo, pode ser de tudo, mas não de engenharia. Seguindo esta linha, foi realizada uma parte importante neste trabalho de conclusão de curso, os custos.

Inicia-se a análise pelo material mais consumido: o concreto. O mesmo, quando empregado em lajes maciças, obteve valores assombrosos relativos à quantidade de material consumido, o que fez gerar custos altíssimos. Isso lembrando que o estudo feito foi somente nas lajes, porém todo esse peso irá chegar até o solo. Tratando-se de valores, pode-se citar a diferença catastrófica entre uma laje maciça e uma nervurada de tamanho 6 x 10,5 metros, onde a segunda custa R\$ 1019,20, enquanto sua concorrente chega ao valor de R\$ 3276,00, sendo um resultado três vezes maior.

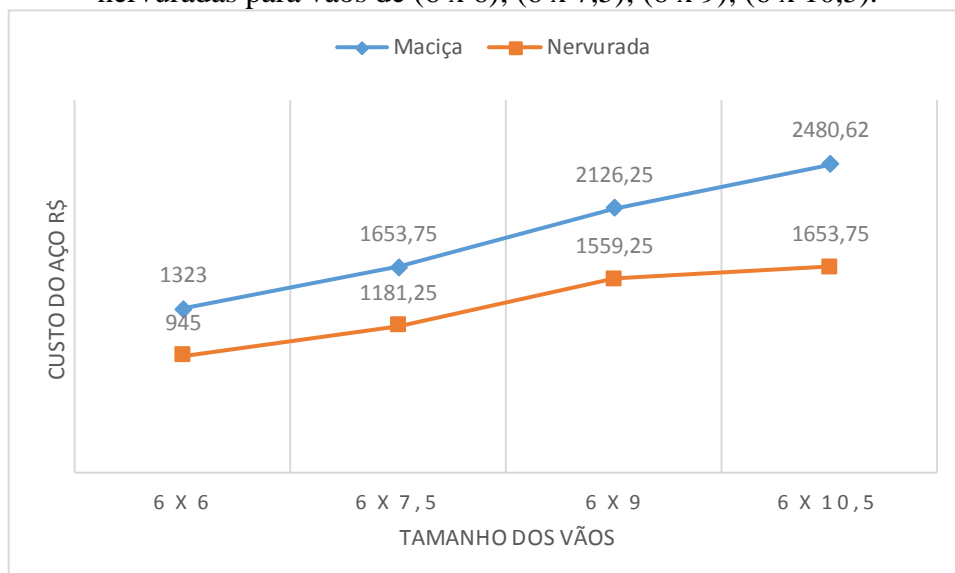
Figura 12 - Relação entre custo do concreto vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5).



Fonte: Autor (2018).

O aço é um dos materiais com maior valor agregado. Sendo assim, considera-se mais vantajoso aumentar a seção de concreto, se isto acarretar em uma redução na área de aço. Porém, no caso estudado isso não ocorreu. O estudo mostrou que devido ao alto peso da laje, a mesma necessitou de uma maior taxa de aço, o que ocasionou um exorbitante gasto na laje maciça.

Figura 13 - Relação entre consumo de aço vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5).



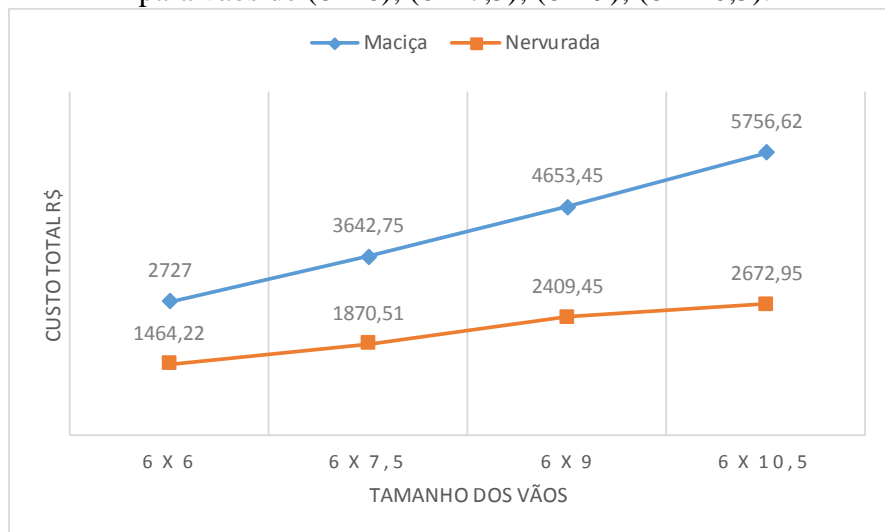
Fonte: Autor (2018).

Como era esperado, visto que os resultados do gasto de uma laje maciça perante uma nervurada são absurdamente desproporcionais, uma vez que a nervurada consegue

contemplar grandes vãos com resultados de peso próprios relativamente baixos. Contudo, a laje maciça mostra-se em segundo plano, visto a eficiência de sua concorrente.

A seguir, é demonstrado a diferenças em reais entre o custo total de matérias de ambas e podemos notar o quão econômica a nervurada é quando comparada a maciça. Portanto pode-se afirmar, categoricamente, que para edifícios multifamiliares para a cidade de Tubarão, o método construtivo mais viável financeiramente é o de laje nervurada, uma vez comprovado através de comparativo com lajes maciças.

Figura 14 - Relação entre custo total vs. tamanho dos vãos para lajes maciças e nervuradas para vãos de (6 x 6); (6 x 7,5); (6 x 9); (6 x 10,5).



Fonte: Autor (2018).

## 5 CONCLUSÃO

O resultado deste trabalho correspondeu às expectativas iniciais, onde o âmbito da pesquisa era não somente responder ao questionamento inicial do trabalho, mas também emergir no âmbito do cálculo estrutural.

Através das pesquisas foi possível constatar o quão amplo é o cálculo estrutural e o quanto uma determinada escolha de laje implica nos custos finais da obra.

Com o dimensionamento feito através de planilhas criadas no software Excel®, com base nas tabelas de Bares, foi possível chegar a valores que estavam no limite da flecha permitida pela norma, o que tornou possível fazer vários comparativos entre as lajes, pois todas foram dimensionadas no limite último de serviço, considerando a flecha máxima.

Os resultados obtidos comprovaram a eficiência e a economia em termos de material que o tipo de laje, nervurada, proporciona quando comparada a uma laje maciça para vãos de edifícios multifamiliares na região de Tubarão, porém seria aconselhável o estudo complementar a este trabalho no que se refere a onerosidade de cada método construtivo.

Foi analisado através de gráficos que conforme aumenta-se os vãos se faz necessário o aumento da altura das lajes, porém é sabido que em casos com todas as bordas apoiadas haverá somente momento positivo que é combatido com a colocação de aço para resistir ao mesmo, no entanto o material abaixo da linha neutra poderá ser inerte o que no caso da laje nervurada a faz ser mais leve comparada a maciça.

Assim, pode-se afirmar que os objetivos geral e específicos foram alcançados, uma vez foi possível verificar que para edifícios multifamiliares no município de Tubarão o emprego de laje nervurada é muito mais viável, visto não somente a laje em si mais todos os demais fatores, como o custo.

Isto pode ser comprovado por Carvalho e Pinheiro (2009), que afirmam que o método tem a capacidade de suprir o alto consumo de material, diferente do ocorrido com as lajes maciças. Ainda, este tipo de laje – nervurada – apresenta também economia com a mão de obra.

Por fim, conclui-se que o trabalho teve um resultado satisfatório, apesar de trabalhoso, o mesmo trouxe muito conhecimento ao acadêmico em relação a sensibilidade ao cálculo estrutural e o quanto ele implica de todas as formas em um edifício multifamiliar.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, A. O.; OLIVEIRA, M. C.. **Tipos de pesquisa**. Trabalho da aula de Metodologia de Pesquisa Aplicada a Contabilidade da USP, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimentos. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – procedimentos. Rio de Janeiro, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Cargas para cálculos de estrutura de edificações. Rio de Janeiro, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- BOTELHO, M. H. C.; MARCHETTI, O.. **Concreto armado eu te amo**. vol 1. 8º ed. Revista segundo a nova norma de concreto armado NBR 6118/2014. São Paulo: Blucher, 2015.
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R.. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014)**. 4º ed. 2ª reimpressão: EDUFSCAR, 2016,
- CARVALHO, R. C.; PINHEIRO L. M.. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. Vol. 2 São Paulo: Pini 2009.
- DEMO, P.. **Pesquisa e construção de conhecimento: metodologia científica no caminho de Habermas**. 7º. ed. Rio de Janeiro: Tempo brasileiro, 2012.
- GIL, A. C.. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5º. ed. São Paulo: Atlas, 1999.
- GIONGO, J. S.. **Concreto Armado**: Projeto estrutural de edifícios. São Carlos: Usp São Carlos, 2007.
- LAHORE, Carlos F. **O Introducción à la educacion comparada**. 2º ed. San José, C.R.: EUNED, 2008.
- PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P.. Lajes Maciças. In: PINHEIRO, L. M.. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos: Usp São Carlos, 2007. p. 11.1-11.29.
- SANTOS, P. R. dos. **Análise e cálculo de elementos estruturais em concreto armado de um edifício residencial**. 2014.



**ANEXOS**

### ANEXO A – Tabelas utilizadas para os cálculos

Tabela A 1 - Coeficientes  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_x'$  e  $k_y'$  para o cálculo das reações nas vigas de apoio de lajes retangulares uniformemente carregadas (casos 1, 2 e 3)

$\lambda$	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	3,23	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
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

Fonte: Carvalho e Pinheiro (2009, p. 344-345).

Tabela A 2 - Coeficientes  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_x'$  e  $k_y'$  para o cálculo das reações nas vigas de apoio de lajes retangulares uniformemente carregadas (casos 4, 5 e 6)

$\lambda$	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

Fonte: Carvalho e Pinheiro (2009, p. 345).

Tabela A 3 - Coeficientes  $\alpha$  para o cálculo de flechas elásticas em lajes retangulares submetidas a carregamento uniformemente distribuído

$\lambda$	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9
1,00	4,67	3,20	3,20	2,42	2,21	2,21	1,81	1,81	1,46
1,05	5,17	3,61	3,42	2,67	2,55	2,31	2,04	1,92	1,60
1,10	5,64	4,04	3,63	2,91	2,92	2,41	2,27	2,04	1,74
1,15	6,09	4,47	3,82	3,12	3,29	2,48	2,49	2,14	1,87
1,20	6,52	4,91	4,02	3,34	3,67	2,56	2,72	2,24	1,98
1,25	6,95	5,34	4,18	3,55	4,07	2,63	2,95	2,33	2,10
1,30	7,36	5,77	4,35	3,73	4,48	2,69	3,16	2,42	2,20
1,35	7,76	6,21	4,50	3,92	4,92	2,72	3,36	2,48	2,30
1,40	8,14	6,62	4,65	4,08	5,31	2,75	3,56	2,56	2,37
1,45	8,51	7,02	4,78	4,23	5,73	2,80	3,73	2,62	2,45
1,50	8,87	7,41	4,92	4,38	6,14	2,84	3,91	2,68	2,51
1,55	9,22	7,81	5,00	4,53	6,54	2,86	4,07	2,53	2,57
1,60	9,54	8,17	5,09	4,65	6,93	2,87	4,21	2,87	2,63
1,65	9,86	8,52	5,13	4,77	7,33	2,87	4,37	2,78	2,68
1,70	10,15	8,87	5,17	4,88	7,70	2,88	4,51	2,79	2,72
1,75	10,43	9,19	5,26	4,97	8,06	2,88	4,63	2,81	2,76
1,80	10,71	9,52	5,36	5,07	8,43	2,89	4,75	2,83	2,80
1,85	10,96	9,82	5,43	5,16	8,77	2,89	4,87	2,85	2,83
1,90	11,21	10,11	5,50	5,23	9,08	2,90	4,98	2,87	2,85
1,95	11,44	10,39	5,58	5,31	9,41	2,90	5,08	2,89	2,88
2,00	11,65	10,68	5,66	5,39	9,72	2,91	5,19	2,91	2,91
$\infty$	15,35	15,35	5,38	6,38	15,35	3,07	6,38	3,07	3,07

Fonte: Carvalho e Pinheiro (2009, p. 332).

Tabela A 4 - Coeficientes  $\mu_x$ ,  $\mu_y$ ,  $\mu_x'$  e  $\mu_y'$  para o cálculo dos momentos máximos em lajes retangulares uniformemente carregadas (casos 1, 2 e 3)

$\lambda$	Caso 1		Caso 2			Caso 3		
	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu_y'$	$\mu_x$	$\mu_x'$	$\mu_y$
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
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

(continua)

(continuação)

$\lambda$	Caso 1		Caso 2			Caso 3		
	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu_{y'}$	$\mu_x$	$\mu_{x'}$	$\mu_y$
<b>1,85</b>	9,45	3,83	8,22	3,97	12,03	6,38	12,14	1,64
<b>1,90</b>	9,63	3,75	8,74	3,94	12,14	6,43	12,24	1,59
<b>1,95</b>	9,77	3,71	8,97	3,88	12,17	6,47	12,29	1,54
<b>2,00</b>	10,00	3,64	9,18	3,80	12,20	6,51	12,34	1,48
$\infty$	12,57	3,67	9,18	3,80	12,20	7,61	12,76	1,48

Fonte: Carvalho e Pinheiro (2009, p. 333-334).

Tabela A 5 - Coeficientes  $\mu_x$ ,  $\mu_y$ ,  $\mu_{x'}$  e  $\mu_{y'}$  para o cálculo dos momentos máximos em lajes retangulares uniformemente carregadas (casos 4, 5 e 6)

$\lambda$	Caso 4				Caso 5			Caso 6		
	$\mu_x$	$\mu_{x'}$	$\mu_y$	$\mu_{y'}$	$\mu_x$	$\mu_y$	$\mu_{y'}$	$\mu_x$	$\mu_{x'}$	$\mu_y$
<b>1,00</b>	2,81	6,99	2,81	6,99	2,15	3,17	6,99	3,17	6,99	2,15
<b>1,05</b>	3,05	7,43	2,81	7,18	2,47	3,32	7,43	3,29	7,20	2,07
<b>1,10</b>	3,30	7,84	2,81	7,36	2,78	3,47	7,87	3,42	7,41	1,99
<b>1,15</b>	3,53	8,28	2,80	7,50	3,08	3,58	8,26	3,52	7,56	1,89
<b>1,20</b>	3,76	8,69	2,79	7,63	3,38	3,70	8,65	3,63	7,70	1,80
<b>1,25</b>	3,96	9,03	2,74	7,72	3,78	3,80	9,03	3,71	7,82	1,74
<b>1,30</b>	4,16	9,37	2,69	7,81	4,15	3,90	9,33	3,79	7,93	1,67
<b>1,35</b>	4,33	9,65	2,65	7,88	4,50	3,96	9,69	3,84	8,02	1,59
<b>1,40</b>	4,51	9,93	2,60	7,94	4,85	4,03	10,00	3,90	8,11	1,52
<b>1,45</b>	4,66	10,41	2,54	8,00	5,19	4,09	10,25	3,94	8,13	1,45
<b>1,50</b>	4,81	10,62	2,47	8,06	5,53	4,14	10,49	3,99	8,15	1,38
<b>1,55</b>	4,93	10,82	2,39	8,09	5,86	4,16	10,70	4,03	8,20	1,34
<b>1,60</b>	5,06	10,99	2,31	8,12	6,18	4,17	10,91	4,06	8,25	1,28
<b>1,65</b>	5,16	11,16	2,24	8,14	6,48	4,14	11,08	4,09	8,28	1,23
<b>1,70</b>	5,27	11,30	2,16	8,15	6,81	4,12	11,24	4,12	8,30	1,18
<b>1,75</b>	5,36	11,43	2,11	8,16	7,11	4,12	11,39	4,14	8,31	1,15
<b>1,80</b>	5,45	11,55	2,04	8,17	7,41	4,10	11,43	4,15	8,32	1,11
<b>1,85</b>	5,53	11,57	1,99	8,17	7,68	4,08	11,65	4,16	8,33	1,08
<b>1,90</b>	5,60	11,67	1,93	8,18	7,95	4,04	11,77	4,17	8,33	1,04
<b>1,95</b>	5,67	11,78	1,91	8,19	8,21	3,99	11,83	4,17	8,33	1,01
<b>2,00</b>	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

Fonte: Carvalho e Pinheiro (2009, p. 334-335).

Tabela A 6 - Coeficientes  $\mu_x$ ,  $\mu_y$ ,  $\mu_{x'}$  e  $\mu_{y'}$  para o cálculo dos momentos máximos em lajes retangulares uniformemente carregadas (casos 7, 8 e 9)

$\lambda$	Caso 7				Caso 8				Caso 9			
	$\mu_x$	$\mu_{x'}$	$\mu_y$	$\mu_{y'}$	$\mu_x$	$\mu_{x'}$	$\mu_y$	$\mu_{y'}$	$\mu_x$	$\mu_{x'}$	$\mu_y$	$\mu_{y'}$
<b>1,00</b>	2,13	5,46	2,60	6,17	2,60	6,17	2,13	5,46	2,11	5,15	2,11	5,15
<b>1,05</b>	2,38	5,98	2,66	6,46	2,78	6,47	2,09	5,56	2,31	5,50	2,10	5,29
<b>1,10</b>	2,63	6,50	2,71	6,75	2,95	6,76	2,04	5,65	2,50	5,85	2,09	5,43
<b>1,15</b>	2,87	7,11	2,75	6,97	3,09	6,99	1,98	5,70	2,73	6,14	2,06	5,51
<b>1,20</b>	3,11	7,72	2,78	7,19	3,23	7,22	1,92	5,75	2,94	6,43	2,02	5,59
<b>1,25</b>	3,43	8,81	2,79	7,36	3,34	7,40	1,85	5,75	3,04	6,67	1,97	5,64

(continua)

(continuação)

$\lambda$	Caso 7				Caso 8				Caso 9			
	$\mu_x$	$\mu_x'$	$\mu_y$	$\mu_y'$	$\mu_x$	$\mu_x'$	$\mu_y$	$\mu_y'$	$\mu_x$	$\mu_x'$	$\mu_y$	$\mu_y'$
<b>1,30</b>	3,56	8,59	2,77	7,51	3,46	7,57	1,78	5,76	3,13	6,90	1,91	5,68
<b>1,35</b>	3,76	8,74	2,74	7,63	3,55	7,70	1,72	5,75	3,25	7,09	1,86	5,69
<b>1,40</b>	3,96	8,88	2,71	7,74	3,64	7,82	1,64	5,74	3,38	7,28	1,81	5,70
<b>1,45</b>	4,15	9,16	2,67	7,83	3,71	7,91	1,59	5,73	3,48	7,43	1,73	5,71
<b>1,50</b>	4,32	9,44	2,63	7,91	3,78	8,00	1,53	5,72	3,58	7,57	1,66	5,72
<b>1,55</b>	4,48	9,68	2,60	7,98	3,84	8,07	1,47	5,69	3,66	7,68	1,60	5,72

Fonte: Carvalho e Pinheiro (2009, p. 335)