



**FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**JORDANA TAVEIRA DE OLIVEIRA
POLIANA FRANCISCA MACEDO**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJES MACIÇAS
CONVENCIONAIS E LAJES NERVURADAS**

PUBLICAÇÃO N°: 13

**GOIANÉSIA / GO
2020**



**JORDANA TAVEIRA DE OLIVEIRA
POLIANA FRANCISCA MACEDO**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJES MACIÇAS
CONVENCIONAIS E LAJES NERVURADAS**

PUBLICAÇÃO N°: 13

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA FACEG.**

ORIENTADOR: ME. IGOR CEZAR SILVA BRAGA

GOIANÉSIA / GO: 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, JORDANA TAVEIRA,
MACEDO, POLIANA FRANCISCA.

Análise Comparativa entre Lajes Maciças Convencionais e Lajes Nervuradas, 2020 xi, 96P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 20).

TCC – FACEG – FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA

Curso de Engenharia Civil.

1. Obra comercial	2. Dimensionamento
3. Comparação	4. Laje
I. ENC/UNI	II. Análise Comparativa entre Lajes Maciças Convencionais e Lajes Nervuradas

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA (exemplo)

OLIVEIRA, J. T.; MACEDO, P. F. Análise comparativa entre lajes maciças convencionais e lajes nervuradas. TCC, Publicação ENC. PF-001A/07, Curso de Engenharia Civil, Faculdade Evangélica de Goianésia (FACEG), Goianésia, GO, 96p. 2020.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: Jordana Taveira de Oliveira, Poliana Francisca Macedo

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Análise comparativa entre lajes maciças convencionais e lajes nervuradas.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2020

É concedida à FACEG a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Jordana Taveira de Oliveira
Rua Anápolis, 13, Machadinho
76420-000 - Niquelândia/GO – Brasil

Poliana Francisca Macedo
C.H.C., Qd. 16 Lt. 09, Jardim Atlântico I etapa
76420-000 - Niquelândia/GO – Brasil

**JORDANA TAVEIRA DE OLIVEIRA
POLIANA FRANCISCA MACEDO**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LAJES MACIÇAS
CONVENCIONAIS E LAJES NERVURADAS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA FACEG COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL.**

APROVADO POR:

**IGOR CÉZAR SILVA BRAGA, mestre (FACEG)
(ORIENTADOR)**

**EDUARDO MARTINS TOLEDO, mestre (FACEG)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ROBSON DE OLIVEIRA FÉLIX, especialista (FACEG)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: GOIANÉSIA/GO, 12 de junho de 2020.

*Dedicamos este trabalho:
aos nossos pais;
e aos nossos irmãos.*

AGRADECIMENTOS

Jordana Taveira de Oliveira

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado coragem e determinação no decorrer do curso, iluminando meu caminho durante essa trajetória, principalmente durante os longos 154 km que foram percorridos de ônibus todos os dias na ida e volta para a faculdade. Agradeço também por ouvir todas as orações ao longo das viagens para que nada de ruim viesse a acontecer durante o trajeto.

Em segundo lugar agradeço aos meus pais, Izabel e Luiz Mário, que sempre me incentivaram a seguir meus objetivos, correr atrás dos meus sonhos, trabalhar e conquistar minha independência; pela educação e princípios que me deram mesmo com todas as dificuldades. Agradeço principalmente ao meu pai por toda a paciência e ajuda, por me buscar todos os dias quando chegava da faculdade às 00:30 horas, mesmo doente e cansado nunca reclamou nenhum dia sequer.

Ao meu namorado, um presente de Deus na minha vida, sempre muito paciente e compreensivo, pronto para me ajudar todas as vezes que precisei, me incentivando e aconselhando em momentos que eu mesma desacreditei. Por todo o apoio e companheirismo incondicional.

Agradeço aos meus amigos Samuel, Maykon, Rogério e Poliana pelo companheirismo de anos, ajuda e paciência, em especial minha parceira de monografia, amiga e cúmplice Poliana, por toda a amizade e paciência nesses longos 5 anos, um exemplo de companheira em todos os momentos, sempre presente e disposta a me ajudar.

A meu orientador, Professor Igor Cezar Silva Braga, pelas cobranças, exigências, paciência e disponibilidade em repassar seus conhecimentos, auxiliando durante o desenvolvimento da monografia.

Aos demais professores do curso de Engenharia Civil da FACEG, por contribuírem em minha formação profissional. Obrigado por todas as dúvidas tiradas e todos os ensinamentos durante todo o curso. Em especial, agradeço aos professores, Robson Félix e Danielly Luz.

Agradeço ao Engenheiro Danilo, companheiro de trabalho, pela paciência e inúmeras ajudas nos softwares para o desenvolvimento do projeto de conclusão.

A toda minha família e em especial as minhas tias Geralda e Luiza, por toda a ajuda e apoio nos momentos difíceis que enfrentei no início do curso, que mesmo distantes nunca me desampararam.

Aos demais amigos que não citei, mesmo os distantes, o meu muito obrigado por todo auxílio e conselho que de certa forma me ajudaram a concluir essa etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Poliana Francisca Macedo

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por ter me dado o dom da vida, saúde e permitido a graça de não desanimar durante as dificuldades enfrentadas ao longo dos anos de estudo.

Aos meus familiares, minha mãe Rozania, por todo apoio e oração, às minhas irmãs, Laiany e Camila, por todo cuidado e amor e por sempre acreditarem e apoiarem os meus sonhos. Ao meu pai, que mesmo não estando mais presente em minha vida sempre me inspirou: seus incentivos foram a minha força particular durante todos esses anos.

Ao meu esposo, Murillo, por toda paciência e parceria, os momentos ao seu lado me davam força para continuar, obrigada pelos conselhos, o amor, e pelo nosso filho, que está em meu ventre e já me dá tanta força para continuar.

A minha companheira de TCC e amiga, Jordana, que não é somente dupla de TCC, foi minha companheira de estudo, que me ajudou desde o início desta caminhada.

A todos os alunos da turma, por compartilharem comigo tantas experiências, descobertas e aprendizados, em especial agradeço aos meus amigos, Samuel, Maykon, Higor, Beatriz de Paula e Rogério, por todos os dias de estudos, que sempre agregavam no processo de aprendizagem e por todos os momentos de descontração, vocês fizeram com que esses anos, fossem mais leves e mais divertidos.

A todos os meus professores, em nome do Robson, Danielle, Luana, Eduardo e Bruno, agradeço por todos os ensinamentos, por compartilharem conosco os seus conhecimentos.

Ao meu orientador, Igor César, pela paciência, por não medir esforços em nos ajudar, por todas as correções, ensinamentos e orientação, que nos ajudou desenvolver um trabalho da melhor forma possível.

Às minhas amigas, Caroline, Rozana, Michelly e Jessika, foi com vocês que compartilhava as notícias sobre provas, sempre se alegravam comigo quando elas eram boas e me incentivavam quando achava que não iria conseguir passar por uma determinada matéria, me diziam que eu era capaz e acreditaram no meu potencial e vocês estavam certas.

A todos que participaram direta ou indiretamente desse período tão importante.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.
(Albert Einstein)

RESUMO

Atualmente vários países têm se aperfeiçoado no processo de evolução de novas técnicas construtivas, com isso novos métodos surgiram para garantir o melhor desempenho das edificações. Decorrente disto surgiram algumas dificuldades enfrentadas pelos engenheiros civis em decidirem qual sistema estrutural melhor se enquadraria para cada edificação. Em virtude disso, o objetivo desse estudo foi realizar uma análise comparativa entre lajes maciças convencionais e lajes nervuradas, especificando através do dimensionamento de ambas as lajes suas respectivas áreas de aço e o quantitativo de concreto. Para tanto, foi realizado uma pesquisa bibliográfica em livros e artigos juntamente com as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas, e desenvolvido o passo a passo do pré-dimensionamento, considerando a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) igual a 25MPa e aço CA-50 para ambas as lajes. Verificou-se que a estrutura com laje maciça apresenta alto consumo de aço e concreto, em comparação com a laje nervurada, com uma área de aço com cerca de 72% mais elevada e uma quantidade de concreto com aproximadamente 51% a mais que a laje nervurada. Isso se dá devido principalmente ao peso próprio da laje maciça, que por ser executada sem nervuras, ou seja, sem vazios, o seu peso próprio é mais elevado, e somando com as demais cargas permanentes e variáveis resulta num carregamento maior, fazendo assim que sua área de aço seja maior em relação à laje nervurada, que por sua vez, possui nervuras, e que nessas nervuras não é necessário o uso de aço nem de concreto. Tanto em lajes que usam EPS, caso de estudo, como nos casos em que se usam cubetas, esses materiais inertes, podem ser retirados após a cura da laje. No entanto, outros fatores desfavorecem o emprego dessa laje, como por exemplo, a falta de mão de obra qualificada principalmente em cidades menos desenvolvidas, fazendo assim que o uso dela se torna inviável devido ao custo. Em questões como esta, que o profissional deve alinhar com seu cliente o real objetivo, seja ele econômico ou a possibilidade de vencer grandes vãos.

Palavras-chave: Lajes nervuradas; Lajes maciças; Dimensionamento; Comparativo.

ABSTRACT

Currently, several countries have perfected themselves in the evolution process of new construction techniques, with that new methods have emerged to guarantee the best performance of buildings and as a result of this, there have also been some difficulties faced by civil engineers in deciding which structural system would best fit each building, as a result, the objective of this study was to carry out a comparative analysis between conventional solid slabs and ribbed slabs, specifying through the dimensioning of both slabs their respective steel area and the quantity of concrete. To this end, a bibliographic search was carried out on books and articles together with the specifications of the Brazilian Association of Technical Standards, and the pre-dimensioning step by step was developed, where the characteristic compressive strength of concrete (f_{ck}) equal to 30MPa was considered and CA-50 steel for solid slabs and for concrete ribbed slabs of (f_{ck}) equal to 25 Mpa. It was found that the structure with solid slab has a high consumption of steel and concrete compared to the ribbed slab, with a steel area about 69% higher and an amount of concrete with approximately 26% more than the ribbed slab. This is mainly due to the weight of the solid slab, which, being executed without ribs, that is, without voids, its own weight is higher, and adding to the other permanent and variable loads results in a higher load, thus making its steel area is greater in relation to the ribbed slab, which in turn has ribs, and that in these ribs it is not necessary to use steel or concrete. Both in slabs that use EPS ribs, which was the case analyzed in this work, as in the cases in which buckets are used, these inert materials can be removed after the slab has cured. However, other factors disadvantage the use of this slab, such as, for example, the lack of qualified labor, especially in less developed cities, thus making its use impracticable due to the cost. In matters like this, that the professional must align with the client the real objective, be it economic or the possibility of overcoming large spans.

Keywords: Ribbed slabs; Massive slabs; Sizing; Comparative.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Laje maciça	2
Figura 1.2 – Laje Nervurada Quadrada com 8,5 x 8,5 m.	2
Figura 2.1 – Tipos mais comuns de lajes	14
Figura 2.2 – Classificação das lajes de acordo com o tipo de apoio	14
Figura 2.3 – Vãos de laje armada em uma direção.....	15
Figura 2.4 – Vãos de laje armada em duas direções.....	16
Figura 2.5 – Condições de apoio das lajes	16
Figura 2.6 – Vão Livre.	17
Figura 2.7 – Laje nervurada	30
Figura 3.1 – Projeto base.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classe de resistência do concreto do grupo I.....	6
Tabela 2.2 – Classe de resistência do concreto do grupo II.....	6
Tabela 2.3 – Classe de resistência para concretos não estruturais.....	7
Tabela 2.4 – Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica a compressão do concreto (considerando o uso de granito como agregado graúdo).....	9
Tabela 2.5 – Exigências de qualidade do concreto em função da agressividade do ambiente	10
Tabela 2.6 – Valores indicativos do tempo de vida útil de projeto.	10
Tabela 2.7 – Classe de agressividade ambiental (CAA).....	11
Tabela 2.8 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$	12
Tabela 2.9 – Propriedades mecânica dos aços.....	13
Tabela 2.10 – Coeficientes γ_{f1} e γ_{f3} para ponderação de ações	21
Tabela 2.11 – Coeficientes γ_{f2} para ponderação de ações.....	21
Tabela 2.12 – Combinações últimas	22
Tabela 2.13 – Combinação de serviço.....	23
Tabela 2.14 – Reações de apoio nos lados maiores das lajes	26
Tabela 3.1 – Peso específico aparente dos materiais de construção.....	37
Tabela 3.2 – Cargas variáveis.....	38
Tabela 3.3 – Valores iniciais calculados para laje maciça.....	39
Tabela 3.4 – Cálculo das ações atuantes – Laje maciça	40
Tabela 3.5 – Valores iniciais correspondentes a nervurada.....	41
Tabela 3.6 – Cálculo das ações atuantes – Laje nervurada.....	41
Tabela 4.1 – Comparativo das ações atuantes nas lajes	43
Tabela 4.2 – Valores finais das flechas	43
Tabela 4.3 – Valores finais de momentos.....	44
Tabela 4.4 – Área de aço e quantitativo de concreto relativo a estrutura com laje maciça....	44
Tabela 4.5 – Área de aço e quantitativo de concreto relativo a estrutura com laje nervurada	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

FACEG – Faculdade Evangélica de Goianésia

MPa – Mega Páscal

NBR – Norma Técnica

CAA – Classe de agressividade ambiental

ELS – Estado limite de serviço

ELU – Estado limite último

CPQ – Combinações quase permanentes de serviço

CF – Combinações frequentes de serviço

CR – Combinações raras de serviço

KMD – Valores de cálculo de armaduras longitudinal

EPS – Poliestireno Expandido

CA-25 – Aço 250 MPa

CA-50 – Aço 500 MPa

CA-60 – Aço 600 MPa

LISTA DE SÍMBOLOS

- f_{cmj} – Resistência à compressão média do concreto
 f_{ck} – Resistência característica do concreto a compressão
 $f_{ct,m}$ – Resistência à tração média
 $f_{ctk,sup}$ – Resistência a tração superior
 $f_{ctk,inf}$ – Resistência a tração inferior
 E_0 – Módulo de deformação tangente na origem
 E_{cs} – Módulo de elasticidade secante
 f_{yk} – Resistência característica de escoamento do aço
 f_{yd} – Resistência característica de cálculo do aço
 \mathcal{E}_{yd} – Alongamento do aço no início do escoamento
 f_{cd} – Resistência característica do Concreto
 σ – Tensão
 ε – Deformação
 γ – Peso específico
 λ – Parâmetro lambda que reflete a geometria da laje
 γ – Peso específico do material
 ψ_2 – Coeficiente dependente das condições de vinculação e dimensões da laje
 ψ_3 – Coeficiente que depende do tipo de aço
 Φ – Diâmetro máximo
 $\mu_x, \mu_y, \mu'_x, \mu'_y$ – Coeficientes para cálculo do momento máximo em lajes retangulares
 α – Coeficiente para o cálculo das flechas elásticas em lajes retangulares
 ξ – Profundidade da linha neutra
 ν – Coeficiente de Poisson
 φ – Coeficiente de fluência
 α_E – Tipo de agregado graúdo
kN – Quilonewton
cm – Centímetros
m – Metro
 cm^2 – Centímetro quadrado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	3
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo Geral.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 CONCRETO ARMADO	5
2.1.1 Resistência à compressão	5
2.1.2 Resistência à tração	7
2.1.3 Módulo de Elasticidade	8
2.1.4 Durabilidade do concreto	9
2.1.5 Qualidade do concreto.....	9
2.1.6 Vida Útil.....	10
2.1.7 Classe de agressividade ambiental	11
2.1.8 Cobrimento.....	11
2.1.9 Aço.....	12
2.2 DIMENSIONAMENTO.....	13
2.2.1 Classificação das Lajes	13
2.2.2 Condições de contorno.....	16
2.2.3 Vão de Cálculo	17
2.2.4 Carregamento.....	18
2.2.4.1 Ações	18
2.2.4.2 Ações permanentes	18
2.2.4.3 Ações variáveis	18
2.2.4.4 Ações excepcionais	19

2.2.5 Cargas atuantes nas lajes	19
2.2.5.1 Cargas permanentes	19
2.2.5.2 Cargas variáveis	20
2.2.6 Combinação de ações.....	21
2.2.6.1 Combinações últimas.....	22
2.2.6.2 Combinações de serviços	23
2.2.7 Espessura de laje.....	24
2.2.7.1 Laje maciça.....	24
2.2.7.1.1 Altura útil	25
2.2.7.1.2 Altura total	25
2.2.7.1.3 Esforços solicitantes	26
2.2.7.1.4 Cálculo das lajes armadas em uma direção.....	26
2.2.7.1.5 Cálculo das lajes armadas em duas direções.....	27
2.2.7.1.6 Flecha	29
2.2.7.1.7 Armadura	30
2.2.7.1.8 Armadura Longitudinal.....	31
2.2.7.2 Lajes nervuradas.....	31
2.2.7.2.1 Vão de Cálculo	33
2.2.7.2.2 Distância livre entre nervuras	33
2.2.7.2.3 Altura útil	33
2.2.7.2.4 Altura adotada	33
2.2.7.2.5 Carregamentos	34
2.2.7.2.6 Verificação da Flecha	34
2.2.7.2.7 Cálculo da armadura longitudinal	36
3 METODOLOGIA.....	38
3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO	38
3.2 LANÇAMENTO DE DADOS	40

3.3 ROTINA DE CÁLCULO, LAJE MACIÇA	40
3.4 ROTINA DE CÁLCULO, LAJE NERVURADA	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS	45
4.1.1 Comparação das cargas atuantes nas lajes.....	45
4.1.2 Comparação das flechas	45
4.1.3 Comparação dos momentos	46
4.1.4 Comparação quanto à área de aço e quantitativo de concreto.....	46
5 CONCLUSÕES.....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	49
APÊNDICE A – ROTEIRO DE CÁLCULOS DA LAJE MACIÇA.....	52
A.1 PRÉ-DIMENCIONAMENTO.....	52
A.1.1 Laje Maciça	52
A.1.1.1 Dados.....	52
A.1.1.2 Equação 2.16 - Altura útil.	52
A.1.1.3 Equação 2.18 – Altura total.....	52
A.1.1.4 Equação 2.15 – Carregamento Atuantes	53
A.1.1.5 Equação 2.33 – Cálculo das flechas	53
A.1.1.6 Equação 2.34 – Flecha Diferida	54
A.1.1.7 Equação 2.35 – Flecha Total	54
A.1.1.8 Equação 2.36 – Cálculo da Flecha limite	54
A.1.1.9 Equações 2.25 e 2.26 – Cálculo dos momentos	54
A.1.1.10 Equação 2.17 – Cálculo da nova Altura útil.....	55
A.1.1.11 Equação 2.18 – Cálculo da nova Altura da laje	55
A.1.1.12 Equação 2.15 – Recalculando os carregamentos Atuantes para h= 19 cm....	55
A.1.1.13 Equação 2.33 – Recalculando as flechas atuantes para h= 19 cm	56
A.1.1.14 Equação 2.35 – Flecha Total	57

A.1.1.15 Equação 2.15 – Recalculando os carregamentos Atuantes para $h = 23$ cm....	57
A.1.1.16 Equação 2.33 – Recalculando as flechas atuantes para $h = 23$ cm	58
A.1.1.17 Equação 2.35 – Flecha Diferida	58
A.1.1.18 Equação 2.15 – Recalculando os carregamentos Atuantes para $h = 25$ cm....	58
A.1.1.19 Equação 2.33 – Recalculando as flechas atuantes para $h = 25$ cm	59
A.1.1.20 Equação 2.35 – Flecha Diferida	59
A.1.1.21 Equação 2.15 – Recalculando os carregamentos Atuantes para $h = 27$ cm....	59
A.1.1.22 Equação 2.33 – Recalculando as flechas atuantes para $h = 27$ cm	60
A.1.1.23 Equação 2.35 – Flecha Diferida	61
A.1.1.24 Equações 2.25 e 2.26 – Recalculando os novos momentos para $h = 27$	61
A.1.1.25 Equação 2.17 – Cálculo da nova Altura útil	61
A.1.1.26 Equação 2.18 – Cálculo da nova Altura da laje	62
A.1.1.27 Equação 2.39 – Cálculo do KMD.....	62
A.1.1.28 Equação 2.40 – Cálculo do As	63
APÊNDICE B – ROTEIRO DE CÁLCULOS DA LAJE NERVURADA	64
B.2 PRÉ-DIMENCIONAMENTO	64
B.2.2 Laje Nervurada	64
B.2.2.1 Dados:	64
B.2.2.2 Vão de Cálculo.....	64
B.2.2.3 Altura útil – Equação 2.45.....	64
B.2.2.4 Altura adotada.....	64
B.2.2.5 Carregamentos	65
B.2.2.6 Verificação da Flecha.....	66
B.2.2.7 Cálculo da armadura longitudinal	68
ANEXO A – TABELAS USADAS NOS CÁLCULOS DO DIMENSIONAMENTO	71

1. INTRODUÇÃO

A Engenharia Civil vem se desenvolvendo ao longo dos anos, assumindo mais espaço no mercado de trabalho, e decorrente disso os profissionais da área tem o desafio de enfrentar e acompanhar esses avanços com estudos inovadores, oferecendo novas técnicas construtivas tanto econômicas como eficazes (SILVA, 2010).

O sistema construtivo atual se deu pela busca por melhorias, o que era feito de forma manual, (projetos, processo de escavação, estudos), hoje é executada de forma automatizada e sistêmica (máquinas industriais, sistemas de alto desempenho). Nos últimos anos, vários países têm se aperfeiçoado no processo de evolução de novas técnicas construtivas. Novos métodos surgiram para garantir o melhor desempenho das edificações e sua maior durabilidade e vida útil (CORDOVIL, 2013).

Toda edificação necessita de elementos estruturais para se manter fixa ao solo, por isso diante das inúmeras alternativas de estruturas, cabe ao engenheiro buscar dentro das possibilidades a solução estrutural mais satisfatória ao projeto (FARIA, 2010). Elementos estruturais são peças que compõem uma estrutura, com uma ou duas dimensões predominante sobre as demais, sendo elas vigas, lajes e pilares (CARVALHO; FILHO, 2016).

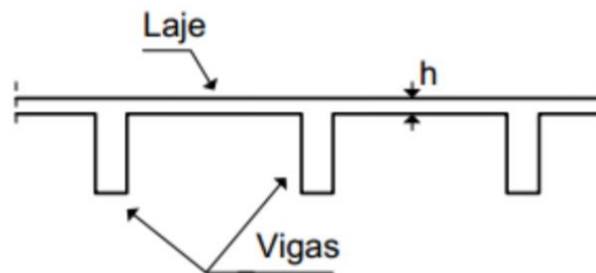
Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), no item 14.4.2.1, as lajes ou placas são elementos de superfície plana sujeitos principalmente a ações normais a seu plano. As placas de concreto são usualmente denominadas lajes. Dentre os tipos de lajes usuais, podemos citar as lajes maciças convencionais e as lajes nervuradas (LOPEZ; BONO; BONO, 2013), sendo que as duas tem a mesma finalidade: resistir aos esforços e transmiti-los até que cheguem à fundação.

Araújo (2014), caracteriza as lajes maciças como placas uniformes, apoiadas ao longo do seu comprimento. Os apoios são constituídos por vigas e pilares, sendo esse tipo de laje mais usual em edifícios residenciais com vãos relativamente pequenos, conforme a Figura 1.1.

De acordo com Vasconcelos (2004) em 1854, o inglês William Boutland Wilkinson, foi o primeiro a patentear um sistema de lajes em concreto armado, ele construiu uma casa com dois pavimentos de alvenaria em que reforçou os planos de concreto (pisos e telhados) com barras de ferro e arame. A patente de Wilkinson foi classificada como melhorias na construção a prova de fogo, em moradias, armazéns e outros edifícios, esse foi o registro formal e oficial mais antigo em termos da utilização efetiva de lajes em concreto armado.

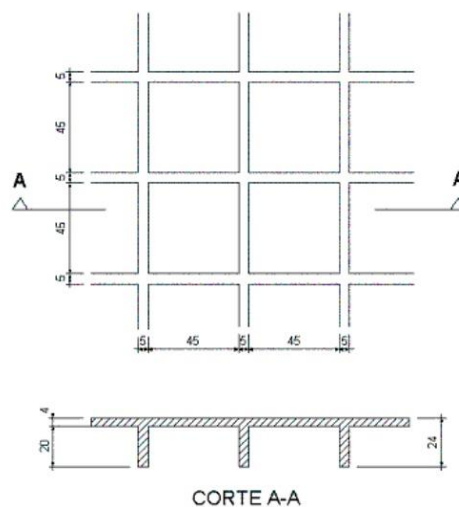
Para Chust (2013) a laje nervurada é uma evolução da laje maciça, pois ela reduz a quantidade de concreto que não exerce função estrutural, produzindo assim, os vãos que caracterizam as nervuras, como mostra a Figura 1.2. Souza e Cunha (1998) conclui que as lajes nervuradas são empregadas para vencer grandes vãos, geralmente maiores que oito metros. Dias (1970) apud Schwezt (2005, pg. 30) afirma que o primeiro registro da laje nervurada, se dá nos Estados Unidos da América, patenteado em 1854 por William Boutland Wilkinson. A laje era elaborada da seguinte maneira: um sistema de concreto armado de pequenas vigas regularmente espaçadas, no qual os vazios entre as nervuras eram formados pela colocação de moldes de gesso.

Figura 1.1 – Laje Maciça.



Fonte: ARAÚJO, 2014.

Figura 1.2 – Laje Nervurada Quadrada com 8,5 x 8,5 m.



Fonte: COELHO, 2013.

1.1 JUSTIFICATIVA

As lajes maciças e nervuradas são as lajes mais utilizadas nas edificações, o que justifica um estudo mais detalhado (CARVALHO, 2012), no entanto, muitas vezes não é a opção mais adequada para a edificação, devido cada obra ter suas particularidades arquitetônicas e construtivas.

Em virtude da ausência de aperfeiçoamento nos estudos de lajes, muitas dúvidas aparecem principalmente sobre os novos métodos que surgiram no decorrer do tempo. Portanto este trabalho terá o intuito de expor as características das duas tipologias de lajes escolhidas, deixar claro os pontos fortes que uma tem em relação a outra. Um estudo voltado a demonstrar por meio de cálculos estruturais o comportamento de ambas as lajes em relação a grandes vãos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise comparativa entre lajes maciças convencionais e lajes nervuradas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar as tipologias de lajes;
- Dimensionar laje maciça convencional e laje nervurada;
- Especificar as vantagens e desvantagens dos sistemas construtivos de cada laje;
- Analisar a área de aço e o quantitativo de concreto entre ambas as lajes;
- Orientar os profissionais na escolha adequada para cada empreendimento, levando-se em consideração todos os aspectos do processo executivo, além de contribuir para a redução de custos nas construções.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em seis capítulos, em que são abordados diversos assuntos visando uma melhor compreensão dos tópicos trabalhados. A seguir é apresentado o tema tratado em cada tópico:

Capítulo 1: contém a introdução da monografia, o tema e uma abordagem geral do trabalho, incluindo também a justificativa, objetivos e organização do trabalho.

Capítulo 2: apresenta uma comprovação teórica sobre as particularidades da laje maciça convencional e da laje nervurada, assim como do concreto armado e outros requisitos como qualidade, durabilidade e vida útil da estrutura. Neste capítulo também estão presentes os dimensionamentos das lajes, expondo o passo a passo do método de cálculo empregado com equações e tabelas, destacando as considerações feitas da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Capítulo 3: apresenta a metodologia utilizada, contendo a especificação e a planta de formas da laje que será analisada, e outros critérios mais detalhados.

Capítulo 4: exhibe através de tabelas as áreas de aço que serão necessárias para execução de cada laje, o quantitativo de concreto, é apresentado os resultados obtidos através da análise, chegando a um entendimento de qual sistema é mais eficaz e econômico para ser empregado em determinado tipo de edificação.

Capítulo 5: apresenta a conclusão do assunto abordado, com o intuito de orientar os profissionais da área sobre o melhor método a ser aplicado, respeitando todos os conceitos apresentados na pesquisa.

Posteriormente segue a bibliografia, os apêndices e anexos, que contribuirão no entendimento dos dados apresentados ao longo deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Bastos (2019), lajes são elementos estruturais apoiados em vigas e responsáveis por receberem a maior parte dos carregamentos de uma edificação. Estas recebem a maioria das ações aplicadas numa construção, geralmente de pessoas, móveis, pisos, paredes e os mais variados tipos de cargas que pode haver em função da finalidade arquitetônica do espaço que a laje se encontra. (GOMES, J. H. D. 2018).

2.1 CONCRETO ARMADO

Concreto armado é um material obtido pela união do concreto com armaduras de aço devidamente colocadas em seu interior. Visto que o concreto apresenta pouca resistência a tração, as armaduras de aço exercem a função de receber os esforços de tração na estrutura. Outra função das armaduras de aço é aumentar a capacidade de cargas e resistir aos esforços solicitantes, conforme apresentado por Araújo (2014).

As principais desvantagens do concreto armado, segundo Porto e Fernandes (2015), são: peso das construções elevado, isolamento acústico baixo, fissuração e baixo grau de proteção térmica. Já as vantagens, estão na durabilidade, economia, facilidade de execução e alta resistência à compressão e tração.

2.1.1 Resistência à compressão

Neville (2016), afirma que a resistência à compressão do concreto é a propriedade mais importante e depende principalmente da relação água/cimento e de sua compactação. Conforme Araújo (2014), quanto maior é o consumo de cimento e quanto menor é a relação água cimento, maior é a resistência à compressão.

A resistência à compressão é determinada através de ensaios com corpos de provas submetidos a compressão centrada conforme destaca Carvalho; Filho (2016). Normalmente adota-se a resistência cúbica, obtida em cubos de 15 cm ou 20 cm de lado. Já no Brasil, adota-se a resistência à compressão obtida em corpos de provas cilíndricos com dimensões geralmente de 15x30 cm. Os ensaios são realizados na idade padrão de 28 dias, devido ser a idade em que a estrutura deverá entrar em carga. (ARAÚJO, 2014).

Após os ensaios é possível determinar a resistência à compressão média, através da Equação 2.1.

$$f_{cmj} = \frac{N_{rup}}{A} \quad 2.1$$

Onde:

N_{rup} = Carga da Ruptura (N);

A = Área da seção transversal (m²).

Em função da resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}), a NBR 8953 (ABNT, 2015) divide os concretos nas classes I e II. Os números indicados das classes representam a resistência característica à compressão especificada em MPa para a idade de 28 dias. Os concretos são designados pela letra C seguida do valor da resistência característica, expressa em MPa, como mostra a Tabela 2.1 e 2.2. A Tabela 2.3, apresenta a classe de resistência para concretos não estruturais.

Tabela 2.1 – Classe de resistência do concreto do grupo I.

Classe de resistência Grupo I	Resistencia característica a Compressão MPa
C20	20
C25	25
C30	30
C35	35
C40	40
C45	45
C50	50

Fonte: NBR 8953 ABNT, 2015.

Tabela 2.2 – Classe de resistência do concreto do grupo II.

Classe de resistência Grupo II	Resistência característica a compressão MPa
C55	55
C60	60
C70	70
C80	80
C90	90
C100	100

Para os concretos de grupo II permite-se, na ausência de Norma brasileira em vigor, adotar os critérios de projeto estrutural de Normas Internacionais.

Fonte: NBR 8953 ABNT, 2015.

Tabela 2.3 – Classe de resistência para concretos não estruturais.

Classe de resistência	Resistência característica a compressão MPa
C10	10
C15	15

Fonte: NBR 8953 ABNT, 2015.

2.1.2 Resistência à tração

A resistência à tração do concreto é relativamente baixa e desprezada no dimensionamento, porém é considerada importante para obter algumas verificações no estado limite de serviço e pode ser determinada em três ensaios diferentes: ensaio de tração axial, ensaio de compressão diametral, ensaio de flexão e ensaio de tração direta conforme Bezerra (2016).

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) de maneira análoga a resistência à compressão e a resistência à tração do concreto apresenta uma significativa variabilidade em torno de um valor médio.

A resistência à tração média pode ser calculada, através da Equação 2.2, para o concreto de classes até C50 MPa.

$$f_{ct,m} = 0,3 (f_{ck})^{2/3} \quad 2.2$$

Onde:

$f_{ct,m}$ = Resistência à tração média (MPa);

f_{ck} = Resistência Característica a compressão (MPa).

Para concretos com classes superiores a C50 MPa, a NBR 6118 (ABNT, 2014) adota a Equação 2.3 a seguir:

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln (1+0,11 f_{ck}) \quad 2.3$$

Na falta de ensaios pode ser avaliado seu valor médio ou característico por meio das Equações 2.4 e 2.5.

Cálculo da resistência a tração superior:

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ct,m} \quad 2.4$$

Cálculo da resistência a tração inferior:

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m} \quad 2.5$$

2.1.3 Módulo de Elasticidade

Módulo de elasticidade ou módulo de deformação é uma grandeza mecânica que mede a rigidez de um material sólido, e pode ser definida a partir das relações entre tensões e deformações, (CARVALHO; FILHO, 2016). No concreto armado, com relação a compressão, têm-se os seguintes módulos de elasticidade:

- Módulo Tangente: seu valor é variável em cada ponto e é dado pela inclinação da reta tangente à curva nesse ponto;

- Módulo de deformação tangente na origem (E_0), ou módulo de deformabilidade inicial: é dado pela inclinação da reta tangente à curva na origem;

- Módulo secante (módulo de elasticidade ou módulo de deformação longitudinal à compressão (E_{cs})): seu valor é variável em cada ponto e é obtido pela inclinação da reta que une a origem com esse ponto, de acordo com a Equação 2.6:

$$E_{cs} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad 2.6$$

Onde:

E_{cs} = Módulo de elasticidade secante (MPa);

σ = Tensão (N/m^2);

ε = Deformação. (Adimensional)

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) item 8.2.8, O valor do módulo de elasticidade inicial, quando não forem realizados ensaios, pode-se estimar a seguir, para f_{ck} de 20 MPa a 50 MPa, a Equação 2.7 trás os parâmetros de cálculo:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}, \text{ para } f_{ck} \text{ de 20 MPa a 50 MPa;} \quad 2.7$$

Onde α_E é o tipo de agregado graúdo.

Sendo:

$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio

$\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse

$\alpha_E = 0,9$ para calcário

$\alpha_E = 0,7$ para arenito

O módulo de deformação secante pode ser obtido, ou estimado pela Equação 2.8:

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad 2.8$$

Sendo:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{F_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad 2.9$$

A Tabela 2.4 apresenta valores estimados do módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto (considerando o uso de granito como agregado graúdo).

Tabela 2.4 – Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica a compressão do concreto (considerando o uso de granito como agregado graúdo).

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
E_{ci} (GPa)	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
E_{cs} (GPa)	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47
α_i	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91	0,93	0,95	0,98	1,00	1,00

Fonte: NBR 6118 ABNT, 2014.

2.1.4 Durabilidade do concreto

A durabilidade das estruturas de concreto é um dos aspectos mais importantes, dentro das modernas normas de projeto. As exigências estão se tornando cada vez mais rígidas, tanto na fase de projeto, quanto na fase de execução da estrutura (ARAÚJO, 2014).

2.1.5 Qualidade do concreto

Segundo Araújo (2014), a qualidade do concreto está diretamente interligada à relação água-cimento, devido ser esta que determina a porosidade da massa já endurecida e, portanto, define a penetração de água ou de gases no concreto. Existe uma forte ligação entre a relação água-cimento e a resistência à compressão do concreto, a Tabela 2.5 apresenta a relação à qual permite escolher a resistência à compressão do concreto em função da classe de agressividade ambiental.

Tabela 2.5 – Exigências de qualidade do concreto em função da agressividade do ambiente.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (ver tabela 2.3.2)			
		I	II	III	IV
Relação água-cimento máxima (em massa)	CA	0,65	0,60	0,55	0,45
	CP	0,60	0,55	0,50	0,45
Classe de resistência mínima	CA	C20	C25	C30	C40
	CP	C25	C30	C35	C40
Consumo mínimo de cimento Kg/m ³ , segundo a NBR – 12655		260	280	320	360

CA: elementos estruturais de concreto armado
CP: elementos estruturais de concreto protendido

Fonte: NBR 6118 ABNT, 2014.

2.1.6 Vida Útil

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014) item 6.2.1, entende-se por vida útil de projeto o período de tempo ao quais as estruturas de concreto mantêm suas características, sem intervenções significativas, atendendo assim os requisitos de uso, ocupação e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, a Tabela 2.6 trás os valores indicativos do tempo de vida útil de projeto.

Tabela 2.6 – Valores indicativos do tempo de vida útil de projeto.

Categoria	Vida útil (anos)	Exemplos
1	10	Estruturas provisórias
2	10 a 25	Componentes estruturais que possam ser substituídos
3	15 a 30	Estruturas agrícolas e semelhantes
4	50	Estruturas de edifícios e outras estruturas correntes
5	100	Estruturas de edifícios monumentais, pontes e outras estruturas similares

1) As estruturas ou componentes estruturais que possam ser desmontados, tendo em vista a sua reutilização, não deverão ser considerados como provisórios.

Fonte: ARAÚJO, 2014.

2.1.7 Classe de agressividade ambiental

A agressividade ambiental, conforme descrito na NBR 6118 (ABNT, 2014) item 6.4.1, está diretamente ligada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independente das variações volumétricas de origem térmica, das ações mecânicas, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas de concreto.

A agressividade ambiental deve ser classificada de acordo com o apresentado na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Classe de agressividade ambiental (CAA).

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

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais banda(uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura.
^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegida de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.
^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118 ABNT, 2014.

2.1.8 Cobrimento

De acordo com os requisitos prescritos na norma NBR 6118 (ABNT, 2014), o cobrimento mínimo da armadura é o menor valor que deve ser respeitado ao longo de todo o elemento e as armaduras devem estar protegidas por uma camada de cobrimento de concreto com uma espessura adequada.

Conforme Araújo (2014), a não observância do cobrimento mínimo pode comprometer a durabilidade da estrutura sendo este um dos grandes problemas verificados nas estruturas de concreto aparente.

Os cobrimentos estão descritos na Tabela 2.8 com sua devida classe de agressividade ambiental, já definida no item 2.1.7.

Tabela 2.8 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

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

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

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

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

Fonte: NBR 6118 ABNT, 2014.

2.1.9 Aço

A NBR 7480 (ABNT, 2007), especifica que as armaduras para concreto armado podem ser classificadas em barras e fios. As barras são obtidas por laminação a quente e os fios são obtidos por trefilação ou laminação a frio (ARAÚJO, 2014).

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

As características mecânicas mais importantes para definição de um aço, obtidas em ensaios de tração são: resistência característica de escoamento, limite de resistência e alongamento na ruptura (CARVALHO; FILHO, 2016).

A Tabela 2.9, mostra as propriedades mecânicas dos aços.

Tabela 2.9 – Propriedades mecânicas dos aços.

Aço	F_{yk} (Mpa)	F_{yd} (Mpa)	ϵ_{vd} (%)	$\xi = x/d$
CA25	250	217	0,104	0,7709
CA50	500	435	0,207	0,6283
CA60	600	522	0,248	0,5900

Fonte: CARVALHO; FILHO, 2016.

Botelho e Marchetti (2015) mencionam que embora o concreto resista bem à compressão, o aço resiste melhor.

2.2 DIMENSIONAMENTO

Segundo Carvalho; Filho (2016), o dimensionamento de uma estrutura deve certificar que ela suporte, de forma estável e segura, todos os esforços a que será sujeita durante sua execução e utilização. O dimensionamento consiste em impedir a ruptura da estrutura ou de determinada parte da mesma.

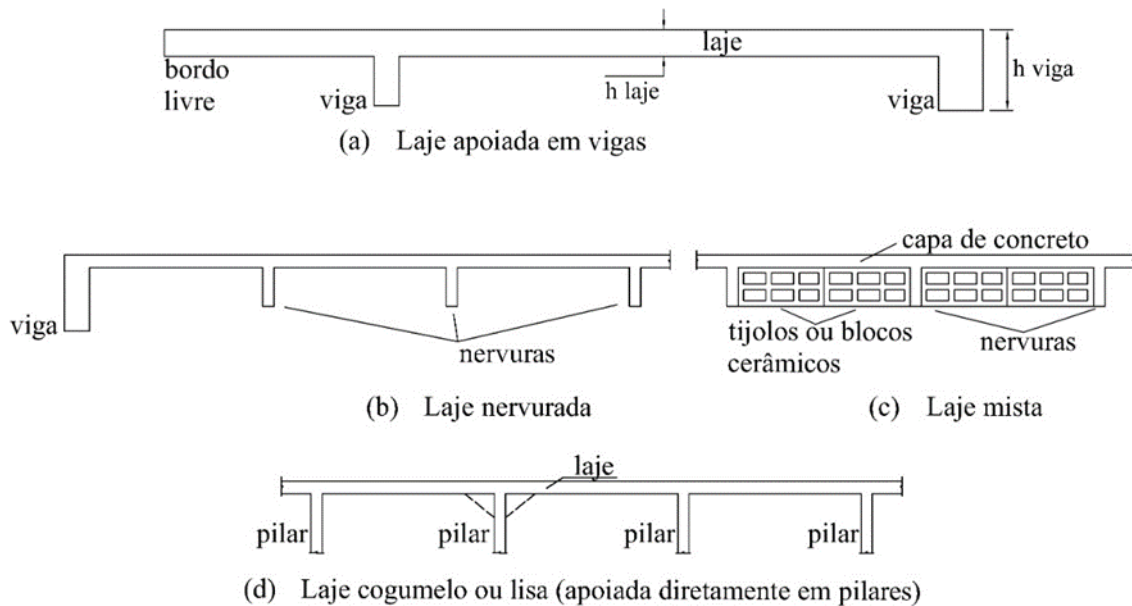
2.2.1 Classificação das Lajes

As lajes são os elementos estruturais que têm a função básica de receber as cargas de utilização das edificações, aplicadas nos pisos, e transmiti-las às vigas. As vigas transmitem as cargas aos pilares e, a partir destes o carregamento é transferido para as fundações. Apesar de existir outras possibilidades de concepção, este é o modelo estrutural básico das edificações. (ARAÚJO, 2014). Existem diferentes tipos de lajes empregadas nas obras de um modo geral, e são classificadas da seguinte forma.

- De acordo com Clímaco (2005), podem ser classificadas quanto à natureza de suas formas nos seguintes tipos, conforme Figura 2.1:

- Lajes apoiadas em vigas;
- Laje nervurada;
- Laje mista;
- Laje cogumelo ou lisa.

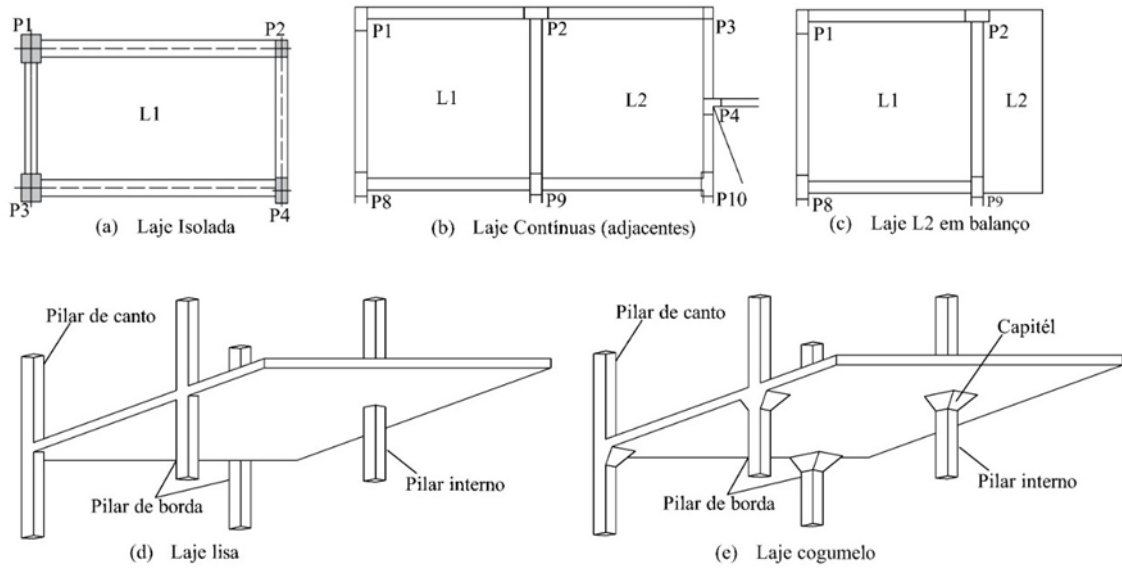
Figura 2.1 – Tipos mais comuns de lajes.



Fonte: CLÍMACO, 2005. (Modificada pelo autor).

- Quanto ao tipo de apoio, conforme Figura 2.2:
 - Lajes contínuas;
 - Lajes isoladas;
 - Lajes em balanço;
 - Lajes cogumelo e lisas.

Figura 2.2 – Classificação das lajes de acordo com o tipo de apoio.



Fonte: NOLASCO, 2014. (Modificada pelo autor).

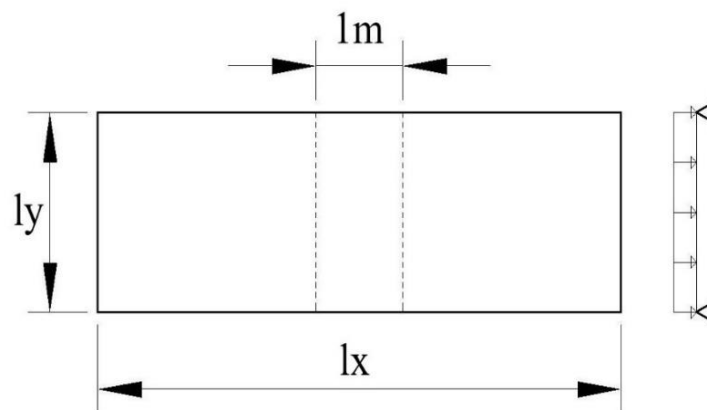
- Quanto ao esquema de cálculo: As lajes podem ser armadas em uma direção ou em duas.

- Lajes armadas em uma direção

A laje armada em uma direção tem relação entre o lado maior e o lado menor superior a dois, conforme ilustrado na Equação 2.10:

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} > 2 \quad 2.10$$

Figura 2.3 – Vãos de laje armada em uma direção.



Fonte: MOTA, 2017. (Modificada pelo autor)

- Laje armada em duas direções

As lajes armadas em duas direções têm a relação entre os vãos menor ou igual a dois, conforme Equação 2.11:

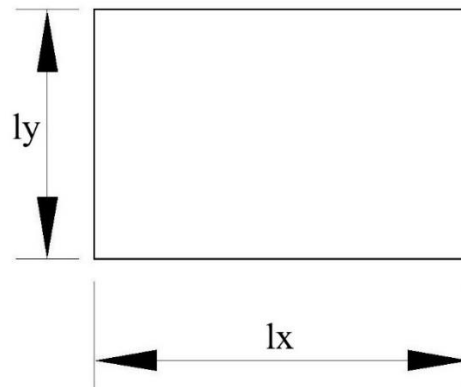
$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} \leq 2 \quad 2.11$$

Onde:

l_x = Menor vão (m);

l_y = Maior vão (m).

Figura 2.4 – Vão de laje armada em duas direções.

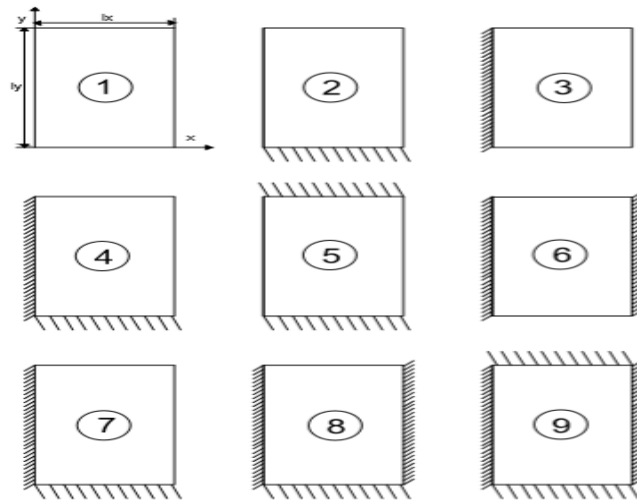


Fonte: MOTA, 2017 (Modificada pelo autor).

2.2.2 Condições de contorno

Existem basicamente três tipos de contornos, borda livre, borda simplesmente apoiada e borda engastada.

Considera-se apoiada quando de fato a laje está continuamente apoiada sobre vigas ou paredes. Livre acontece quando a borda da laje não contém vinculação ou apoio ao longo de um dos lados. Engastada quando a borda da laje tem continuidade além do apoio correspondente daquele lado (CAMPOS FILHO 2014).

Figura 2.5 – Condições de apoio das lajes.

Fonte: CARVALHO; FILHO, 2017 (Modificada pelo autor).

2.2.3 Vão de Cálculo

De acordo com Araújo (2014), o vão de cálculo, l , é a distância entre os centros dos apoios e deve ser calculado pela Equação 2.12:

$$l = l_0 + a_1 + a_2 \quad 2.12$$

Com:

$$a_1 \leq \begin{cases} t_1/2 \\ 0,3h \end{cases} \quad 2.13$$

$$a_2 \leq \begin{cases} t_2/2 \\ 0,3h \end{cases} \quad 2.14$$

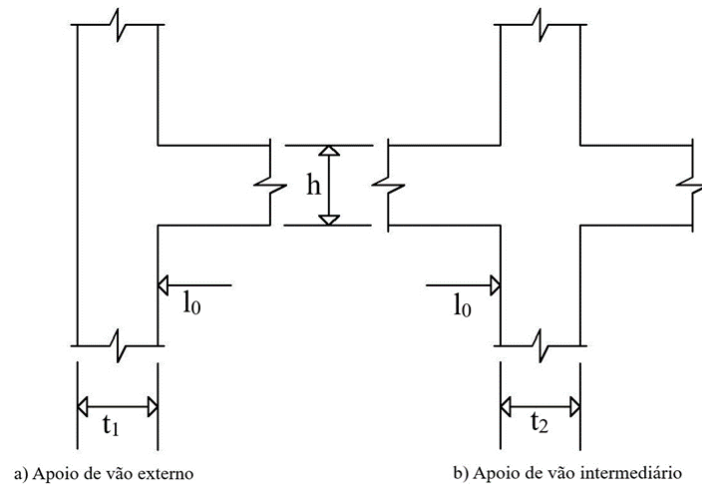
Onde:

l_0 = distância entre as faces internas dos apoios (m);

a_1 e a_2 = metade do apoio (m);

t_1 e t_2 = comprimento do apoio paralelo ao vão da laje (m);

h = espessura da laje (m).

Figura 2.6 – Vão livre.

Fonte: NBR 6118 ABNT, 2014.

2.2.4 Carregamento

2.2.4.1 Ações

Denominam-se ações como qualquer influência, ou conjunto de influências, com a possibilidade de produzir estados de tensão ou de deformação em uma estrutura. As principais ações a serem analisadas são as ações permanentes e as ações variáveis, chamadas pela norma NBR 6120 (ABNT, 2019) de cargas acidentais (CARVALHO; FILHO, 2016).

2.2.4.2 Ações permanentes

Ações permanentes são as que ocorrem com valores iguais durante toda a vida da construção, são determinadas como diretas ou indiretas. Diretas quando constituídas pelos pesos próprios dos elementos construtivos fixos das instalações permanentes e pelo peso próprio da estrutura e indiretas quando são constituídas pelas deformações impostas por retração, deslocamentos de apoios, fluência do concreto e imperfeições geométricas e protensão (CARVALHO; FILHO, 2016).

2.2.4.3 Ações variáveis

As ações variáveis são consideradas como diretas e indiretas, as variáveis diretas são constituídas pelas ações do vento, da água e cargas acidentais, já as indiretas são devidas a

vibrações, choques e por variações uniformes e não uniformes de temperatura (CARVALHO; FILHO, 2016).

2.2.4.4 Ações excepcionais

As ações excepcionais são aquelas que têm duração muito curta e uma variabilidade de ocorrência muito pequena durante a vida da construção, mas que devem ser apontadas no projeto de determinados tipos de estrutura (ARAÚJO, 2014).

2.2.5 Cargas atuantes nas lajes

As cargas atuantes nas lajes podem ser permanentes e variáveis:

- Permanentes: Devidas ao peso próprio, contrapiso, revestimento, paredes etc.;
- Variáveis: Decorrentes das condições de uso da laje (Residência, escritório, escola, biblioteca etc.).

2.2.5.1 Cargas permanentes

Segundo a NBR 6120 (ABNT, 2019), os pesos específicos dos materiais de construção que eventualmente possam constituir carregamento em lajes podem ser:

- Argamassa de cal, cimento e areia – 19,0 kN/m³;
- Argamassa de cimento e areia – 21,0 kN/m³;
- Argamassa de gesso – 12,5 kN/m³;
- Reboco – 20,0 kN/m³;
- Concreto simples – 24,0 kN/m³;
- Concreto armado – 25,0 kN/m³.

O carregamento atuante na laje (peso por unidade de área) é dado pela Equação 2.15:

$$g = \gamma_{\text{mat}} \cdot h \quad 2.15$$

Onde:

g = Carga permanente uniformemente distribuída, geralmente em kN/m²;

γ_{mat} = Peso específico do material, geralmente em kN/m³;

h = Espessura do material, geralmente em m.

2.2.5.2 Cargas variáveis

A NBR 6120 (ABNT, 2019) exhibe uma série de valores que podem ser considerados para as cargas acidentais que venham a constituir esforço em lajes. Alguns valores são reproduzidos a seguir:

- Arquibancadas – $4,0 \text{ kN/m}^2$
- **Bibliotecas**
 - Sala de leitura – $2,5 \text{ kN/m}^2$;
 - Sala para depósito de livros – $4,0 \text{ kN/m}^2$;
 - Sala com estantes – $6,0 \text{ kN/m}^2$;
- **Cinemas**
 - Plateia com assentos fixos – $3,0 \text{ kN/m}^2$;
 - Estúdio e plateia com assentos móveis – $4,0 \text{ kN/m}^2$;
 - Banheiro – $2,0 \text{ kN/m}^2$;
- **Corredores**
 - Com acesso ao público – $3,0 \text{ kN/m}^2$;
 - Sem acesso ao público – $2,0 \text{ kN/m}^2$;
- **Edifícios residenciais**
 - Dormitório, sala, copa, cozinha e banheiro – $1,5 \text{ kN/m}^2$;
 - Dispensa, área de serviço e lavanderia – $2,0 \text{ kN/m}^2$;
- **Escadas**
 - Com acesso ao público – $3,0 \text{ kN/m}^2$;
 - Sem acesso ao público – $2,5 \text{ kN/m}^2$;
- **Escolas**
 - Anfiteatro, corredor e sala de aula – $3,0 \text{ kN/m}^2$;
 - Outras salas – $2,0 \text{ kN/m}^2$;
 - Escritórios – $2,0 \text{ kN/m}^2$;
 - Forros sem acesso de pessoa – $0,5 \text{ kN/m}^2$;
 - Ginásio de esportes – $5,0 \text{ kN/m}^2$;
- **Hospitais**
 - Dormitório, enfermarias, sala de recuperação ou cirurgia, banheiro – $2,0 \text{ kN/m}^2$
- **Corredor** – $3,0 \text{ kN/m}^2$

- **Lojas** – 4,0 kN/m²
- **Restaurantes** – 3,0 kN/m²
- **Teatros**
 - Palco – 5,0 kN/m²;
 - Plateia com assentos fixos – 3,0 kN/m²;
 - Estúdio e plateia com assentos móv. – 4,0 kN/m²;

2.2.6 Combinação de ações

Um carregamento é determinado pela combinação das ações que têm probabilidades não desprezíveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura durante um período preestabelecido, Carvalho; Filho (2016).

Na NBR 6118 (ABNT, 2014) têm-se duas tabelas de coeficientes de ponderação de ações, que considera muito pequena a probabilidade de ocorrerem simultaneamente duas ou mais ações variáveis de natureza diferente.

A Tabela 2.10 apresenta os coeficientes γ_{f1} e γ_{f3} e a tabela 2.11 os coeficientes de ponderação γ_{f2} .

Tabela 2.10 – Coeficientes γ_{f1} e γ_{f3} para ponderação de ações.

Combinação de ações	Ações						Recalque de apoio e retração	
	Permanentes (g)		Variáveis (q)		Propensão (p)			
	D ¹⁾	F	G	T	D	F	D	F
Normais	1,4	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0

Onde:
D é desfavorável, F é favorável, G é geral e T é temporária.

Fonte: NBR 6118 ABNT, 2014.

Tabela 2.11 – Coeficientes γ_{f2} para ponderação de ações.

Ações	γ_{f2}			
	Ψ_0	$\Psi_1^{1)}$	Ψ_2	
	Locais em que não há predominância de pessoas de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ²⁾	0,5	0,4	0,3
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo ou de elevada concentração de pessoas ³⁾	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

Fonte: NBR 6118 ABNT, 2014.

2.2.6.1 Combinações últimas

As combinações últimas são classificadas de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), como: normais, especiais ou de construção e excepcionais. A Tabela 2.12, demonstra e explica cada uma delas.

Tabela 2.12 – Combinações últimas.

Combinações Últimas (ELU)	Descrição	Cálculo das solicitações
	Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto armado ¹⁾	$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{Eg} F_{Egk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \Psi_{oj} F_{qjk}) + \gamma_{Eq} \Psi_{oE} F_{qk}$
Normais	Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto protendido	Deve ser considerada, quando necessário, a força de protensão como carregamento externo com os valores P_{kmax} e P_{kmin} para a força desfavorável e favorável, respectivamente, conforme definido na seção 9
	Perda do equilíbrio como corpo rígido	$S(F_{sd}) \geq S(F_{nd})$ $F_{sd} = \gamma_{gs} G_{sk} + R_d$ $F_{nd} = \gamma_{gn} G_{sk} + \gamma_q - \gamma_{qs} Q_{s,min}$ <p>onde: $Q_{nk} = Q_{1k} + \sum \Psi_{oj} Q_{jk}$</p>
Especiais ou de construção ²⁾		$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{Eg} F_{Egk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \Psi_{oj} F_{qjk}) + \gamma_{Eq} \Psi_{oE} F_{Eqk}$
Excepcionais ²⁾		$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{Eg} F_{Egk} + F_{q1exc} + \gamma_q \sum \Psi_{oj} F_{qjk} + \gamma_{Eq} \Psi_{oE} F_{Eqk}$

Onde:

F_d é o valor de cálculo das ações para combinação última;

F_{gk} representa as ações permanentes diretas;

F_{Egk} representa as ações indiretas permanentes como a retração F_{Egk} e variáveis como a temperatura F_{Eqk} ;

$\gamma_g, \gamma_{Eg}, \gamma_q, \gamma_{Eq}$ - ver na tabela 11.1

Ψ_{oj}, Ψ_{oE} - ver na tabela 11.2

G_{sk} é o valor característico da ação permanente instabilizante;

R_d é o esforço resistente considerado como instabilizante, quando houver;

$Q_{nk} = Q_{1k} + \sum_{j=2}^m \Psi_{oj} Q_{jk}$;

Q_{1k} é o valor característico da ação variável instabilizante considerada como principal;

1) No caso geral, devem ser consideradas inclusive combinações onde o efeito favorável das cargas permanentes seja reduzido pela consideração de $\gamma_g = 1,0$. No caso de estruturas usuais de edifícios essas combinações que consideram γ_g reduzido (1,0) não precisam ser consideradas.

Fonte: NBR 6118 ABNT, 2014.

2.2.6.2 Combinações de serviços

Correspondem aos estados em que a utilização da estrutura torna-se prejudicada, por apresentar deformações excessivas, incluindo vibrações indesejáveis, ou por um nível de fissuração que comprometa a durabilidade (ARAÚJO, 2014).

As combinações de serviço são classificadas de acordo com seu tempo de permanência na estrutura em quase permanentes, frequentes e raras. A Tabela 2.13 exemplifica cada uma delas.

Tabela 2.13 – Combinação de serviço.

Combinações de serviço (ELS)	Descrição	Cálculo das solicitações
Combinações quase permanentes de serviço (CQP)	Nas combinações quase permanentes de serviço, todas as ações variáveis são consideradas com seus valores quase permanentes $\Psi_2 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + \sum \Psi_{2j} F_{qj,k}$
Combinações frequentes de serviço (CF)	Nas combinações frequentes de serviço, a ação variável F_{q1} é tomada com seu valor frequente $\Psi_1 F_{q1k}$ e todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores quase permanentes $\Psi_2 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \sum F_{gik} + \Psi_1 F_{q1k} + \sum \Psi_{2j} F_{qjk}$
Combinações raras de serviço (CR)	Nas combinações de serviço, a ação variável principal F_{q1} é tomada com seu valor característico F_{q1k} e todas as demais ações são tomadas com seus valores frequentes $\Psi_1 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \sum F_{gik} + F_{q1k} + \sum \Psi_{1j} F_{qjk}$

Onde:

$F_{d,ser}$ é o valor do cálculo das ações para combinações de serviço;
 F_{q1k} é o valor característico das ações variáveis principais diretas;
 Ψ_1 é o fator de redução de combinação frequente para ELS;
 Ψ_2 é o fator de redução de combinação quase permanente para ELS.

Fonte: NBR 6118 ABNT, 2014.

2.2.7 Espessura de laje

Para calcular os esforços é necessário antes fazer a estimativa da altura final de uma laje e posteriormente efetuar correção se for necessário. Ela é calculada em função da deformação limite ou do momento no estado de limite último (CARVALHO; FILHO, 2017).

2.2.7.1 Laje maciça

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), item 13.2.4.1, nas lajes maciças devem ser respeitados os seguintes limites mínimos para as espessuras:

- 7 cm lajes de cobertura não em balanço;
- 8 cm lajes de piso não em balanço;
- 10 cm lajes em balanço;
- 10 cm lajes que suportem veículos de peso total \leq a 30 KN;
- 12 cm lajes que suportem veículos de peso total $>$ que 30 KN;
- 15 cm lajes com pretensão apoiadas, em vigas, com mínimo de $\frac{1}{42}$ para lajes de piso biapoiadas e $\frac{1}{50}$ para lajes de pisos contínuas;
- 16 cm lajes lisas e 14 cm para lajes cogumelos, fora do capitel.

2.2.7.1.1 Altura útil

A altura útil d , é a distância entre o centro de gravidade da armadura tracionada e a face mais comprimida da seção e depende principalmente do cobrimento da armadura (BASTOS, 2015). Conforme a Equação 2.16:

$$d = \frac{l_x}{\Psi_2 \cdot \Psi_3} \quad 2.16$$

Caso precise, calcular o valor da altura útil mínima usa-se a Equação 2.17:

$$d_{\min} = 2 \cdot \left(\sqrt{\frac{M_d}{B_w \cdot f_{cd}}} \right) \quad 2.17$$

Onde:

l_x = Menor vão (m);

Ψ_2, Ψ_3 = Coeficientes, obtidos através das Tabelas presente no Anexo A.4 e A.5 (Adimensional);

B_w = Largura (normalmente usa-se 1m);

f_{cd} = Resistência Característica do Concreto (kN/m^2).

2.2.7.1.2 Altura total

A altura total pode ser obtida através da Equação 2.18:

$$h = d + C_{\text{nom}} + \phi + \frac{\phi}{2} \quad 2.18$$

Onde:

h = Altura total (cm);

d = Altura útil (cm);

C_{nom} = Cobrimento nominal (cm);

Φ = Diâmetro máximo (mm).

2.2.7.1.3 Esforços solicitantes

Denomina-se esforço solicitante ou solitação qualquer esforço ou conjunto de esforços decorrentes das ações e aplicados a uma ou mais seções de um elemento da estrutura (CARVALHO; FILHO, 2016).

2.2.7.1.4 Cálculo das lajes armadas em uma direção

Nas lajes armadas em uma direção, somente o momento fletor na direção do menor vão necessita ser calculado (ARAÚJO, 2014).

Os momentos fletores têm as expressões seguintes conforme cada caso:

Caso 1: Laje apoiada em dois lados

Momento positivo é dado pela Equação 2.19:

$$M = \frac{pl_x^2}{8} \quad 2.19$$

Onde:

M = Momento máximo; (N.m²)

p = Carga uniformemente distribuída; (N)

l_x = Vão de cálculo (menor vão). (m²)

Caso 2: Laje apoiada em um lado e engastada no outro

O momento positivo é dado pela Equação 2.20:

$$M = \frac{pl_x^2}{14,22} \quad 2.20$$

O momento negativo é dado pela Equação 2.21:

$$M_e = -\frac{pl_x^2}{8} \quad 2.21$$

Caso 3: Laje engastada em dois lados

O momento positivo é dado pela Equação 2.22:

$$M = \frac{pl_x^2}{24} \quad 2.22$$

O momento negativo é dado pela Equação 2.23:

$$M_e = -\frac{pl_x^2}{12} \quad 2.23$$

Caso 4: Laje em balanço

O momento negativo é dado pela Equação 2.24:

$$M_e = -\frac{pl_x^2}{2} \quad 2.24$$

As reações de apoio nos lados maiores podem ser calculadas de forma análoga, considerando a faixa de largura unitária na direção do menor vão (ARAÚJO, 2014).

Tabela 2.14 – Reações de apoio nos lados maiores das lajes.

Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
$R_y = \frac{pl_x}{2}$	$R_y = \frac{3pl_x}{8}$	$R_{ye} = \frac{pl_x}{2}$	$R_{ye} = pl_x$
	$R_{ye} = \frac{5pl_x}{8}$		

Fonte: ARAÚJO, 2014.

2.2.7.1.5 Cálculo das lajes armadas em duas direções

Os momentos fletores máximos, sendo os positivos designados pela letra m, e os negativos pela letra x, conforme as Equações 2.25 a 2.28:

- Momentos máximos positivos por unidade de comprimento nas direções x e y

$$m_x = \mu_x \frac{pl_x^2}{100} \quad 2.25$$

$$m_y = \mu_y \frac{pl_x^2}{100} \quad 2.26$$

- Momentos máximos negativos por unidade de comprimento nas direções x e y

$$x_x = \mu'_x \frac{pl_x^2}{100} \quad 2.27$$

$$x_y = \mu'_y \frac{pl_x^2}{100} \quad 2.28$$

Onde:

l_x = menor lado da laje; (m)

$\mu_x, \mu_y, \mu'_x, \mu'_y$ = coeficientes presentes no Anexo A.3. (Adimensional)

Segundo Durigan e Portela (2017), a duas formas de determinação das reações das lajes sobre as vigas, podem ser a partir da análise plástica, de acordo com o item 14.7.4 da NBR 6118 (ABNT, 2014) e a segunda pela aproximação das charneiras. Neste segundo caso, são traçados triângulos e trapézios nas lajes de acordo com as seguintes considerações:

- 45° entre dois apoios do mesmo tipo;
- 60° a partir do apoio considerado engastado, se o outro for considerado apoiado;
- 90° a partir do apoio, quando a borda vizinha for livre.

Os cálculos das reações de apoio de uma laje estão sujeitos a uma carga uniformemente distribuída p , no qual o fator k é tabelado, em diversos casos de apoio das lajes. Com os valores de k , as reações nas vigas, para certo carregamento p e sempre com l_x sendo o menor vão para as bordas apoiada e engastada (CARVALHO; FILHO, 2016).

- Reações nas direções x e y nas vigas em bordas simplesmente apoiadas conforme Equações 2.29 e 2.30:

$$q_x = k_x \cdot p \frac{l_x}{10} \quad 2.29$$

$$q_y = k_y \cdot p \frac{l_x}{10} \quad 2.30$$

- Reações nas direções x e y nas vigas em bordas engastadas conforme Equações 2.31 e 2.32:

$$q'_x = k'_x \cdot p \frac{l_x}{10} \quad 2.31$$

$$q'_y = k'_y \cdot p \frac{l_x}{10} \quad 2.32$$

2.2.7.1.6 Flecha

Segundo Araújo (2014), flecha pode ser definida como deslocamento transversal máximo de uma barra reta ou placa. A flecha atuante é expressa pela Equação 2.33:

Flecha atuante:

$$f_{\text{atuante}} = \frac{p l_x^4 \alpha}{h^3 \cdot E_{cs} \cdot 100} \quad 2.33$$

Flecha Diferida:

A NBR 6118 (ABNT, 2014) no seu item 17.3.2.1.2 diz que a flecha adicional diferida é decorrente das cargas de longa duração em função da fluência e pode ser calculada multiplicando a flecha imediata pelo fator calculado pela Equação 2.34:

$$\alpha_f = \frac{\Delta \xi}{1 + 50 \cdot \rho'} \quad 2.34$$

Onde:

ξ = é um coeficiente em função do tempo e pode ser obtido através da Tabela presente no Anexo A.7;

Como não há armadura comprimida, portanto $\rho' = 0$ para esse caso.

Fecha Total:

A NBR 6118 (ABNT, 2014) menciona que a flecha total deve ser obtida de acordo com a Equação 2.35:

$$W_{\text{tot}} = (1 + \alpha_f) \cdot f_{\text{atuante}} \quad 2.35$$

Onde:

α_f = Flecha diferida;

f_{atuante} = Flecha atuante.

Flecha Limite:

Araújo (2014) especifica que para atender as exigências quanto ao estado limite de deformações excessivas, deve-se ter:

Para lajes não em balanço:

$$\delta_{\text{lim}} \leq l/250 \quad 2.36$$

Para lajes em balanço:

$$f_{\text{atuante}} \leq l/125 \quad 2.37$$

No caso de lajes em balanço, l é o comprimento teórico e nos outros casos, l é o menor vão da laje.

As flechas obtidas não devem ultrapassar os deslocamentos limites.

$$f_{\text{atuante}} \leq \delta_{\text{lim}} \quad 2.38$$

2.2.7.1.7 Armadura

O cálculo da armadura necessária para resistir a um momento fletor é um dos pontos mais importantes no detalhamento das peças de concreto armado (CARVALHO; FILHO, 2016).

2.2.7.1.8 Armadura Longitudinal

As armaduras longitudinais, no caso das lajes bidirecionais são calculadas para os momentos positivos nos dois sentidos (ARAÚJO, 2014).

O cálculo do KMD é obtido através da Equação 2.39:

$$KMD = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad 2.39$$

Onde:

M_d = Momento majorado de cálculo; (kN/m)

b_w = Largura de 1 metro utilizados para cálculos de laje maciça;

d = Altura útil da seção (m);

f_{cd} = Resistência Característica do Concreto (kN/m²).

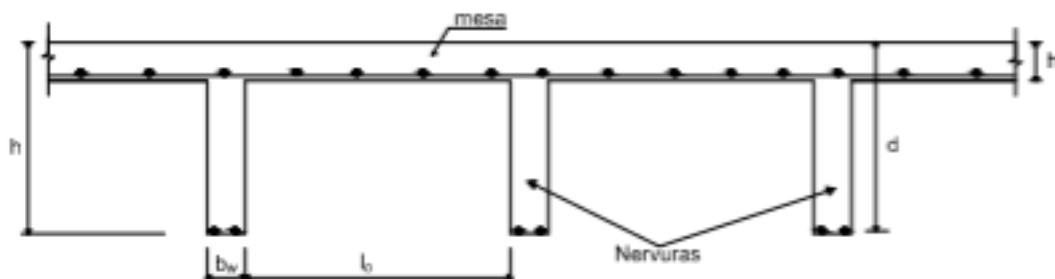
Tomando em consideração o valor do KMD e tendo como base a Tabela de Carvalho; Filho (2016), presente no Anexo A.6, obtem-se o valor de KZ conforme Equação 2.40:

Cálculo da armadura:

$$A_s = \frac{M_d}{KZ \cdot d \cdot f_{yd}} \quad 2.40$$

2.2.7.2 Lajes nervuradas

De acordo com NBR 6118 (ABNT, 2014), as lajes nervuradas podem ser calculadas como lajes maciças através de processos elásticos conforme Figura 2.7, desde que sejam respeitadas as prescrições listadas a baixo:



Fonte: ARAÚJO, 2014.

Apresentam-se a seguir as dimensões limites, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), item 13.2.4.2.

- A distância S entre os eixos das nervuras não deve ultrapassar 110 cm, conforme apresentado na Equação 2.41:

$$S = l_0 + b_w \leq 110 \text{ cm} \quad 2.41$$

- As larguras das nervuras não devem ser inferiores a 5 cm e a espessura da mesa não deve ser menor que 4 cm nem $1/15$ da distância das nervuras conforme Equações 2.42 e 2.43:

$$b_w \geq 5 \text{ cm} \quad 2.42$$

$$h_f \geq \begin{cases} 4 \text{ cm} \\ l_0/15 \end{cases} \quad 2.43$$

- Quando existirem tubulações embutidas de diâmetro menor ou igual a 10 mm o valor mínimo de 4 cm para espessura da mesa passa para 5 cm.
- Tubulações com diâmetro maior que 10 mm havendo cruzamento, esse valor mínimo passa a ser calculado conforme a Equação 2.44:

$$\emptyset + 4 \text{ cm} \quad 2.44$$

- Não é permitido o uso de armadura de compressão em nervuras de largura inferior a 8 cm.

Para critérios de projeto das lajes nervuradas, devem ser obedecidas as seguintes condições:

- Sempre que a distância S entre eixos de nervuras for maior que 65 cm a resistência da mesa à flexão deverá ser verificada. Sendo assim a armadura da mesa deverá ser calculada como para uma laje maciça de espessura h_f simplesmente apoiada nas nervuras. Se a distância entre eixos de nervuras for menor ou igual a 65 cm pode-se adotar uma armadura mínima para a mesa sem a necessidade do dimensionamento.
- Se distância entre eixos de nervuras for maior que 65 cm elas deverão ser verificadas ao cisalhamento como vigas, nesses casos as nervuras deverão obrigatoriamente ter estribos. Se a distância for menor ou igual a 65 cm as nervuras podem ser verificadas ao cisalhamento com os critérios de lajes.
- Os estribos das nervuras, quando necessário, devem ter um espaçamento máximo de 20 cm.

2.2.7.2.1 Vão de Cálculo

Os cálculos usados anteriormente para determinar os vãos de cálculos da laje maciça correspondem aos mesmos da laje nervurada e podem ser vistos no item 2.2.3.

2.2.7.2.2 Distância livre entre nervuras

Obecendo os parâmetros citados anteriormente, o valor da distância livre entre nervuras pode ser adotado segundo prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2014).

2.2.7.2.3 Altura útil

De acordo com Araújo (2014), a altura útil pode ser obtida através da Equação 2.45:

$$d = \frac{l_x}{30} \quad 2.45$$

Onde:

l_x = Menor vão (m).

2.2.7.2.4 Altura adotada

A altura adotada será conforme os critérios mencionados acima.

2.2.7.2.5 Carregamentos

Conforme o item 2.2.4 os carregamentos são classificados como permanentes, variáveis e excepcionais. Permanecendo os mesmos cálculos para laje nervurada.

2.2.7.2.6 Verificação da Flecha

De acordo com Araújo, (2014) a espessura equivalente da laje é calculada com o emprego das Equações 2.46 e 2.47:

$$\xi = \frac{l_{ox}l_{oy}}{S_x S_y} \quad 2.46$$

ξ = Profundidade da linha neutra (Adimensional);

l_{ox} = Distância livre entre as nervuras na direção de x (cm);

l_{oy} = Distância livre entre as nervuras na direção de y (cm);

S_x e S_y = Espaçamentos (cm).

$$h_e = [(1 - \xi)h^3 + \xi h_f^3]^{1/3} \quad 2.47$$

h_e = Espessura equivalente (cm);

h = Altura total adotada (cm);

h_f = Espessura da mesa (cm).

O módulo de deformação longitudinal do concreto pode ser obtido através da Equação 2.48:

$$E_{cs} = 0,85 \cdot 21500 \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3} \quad 2.48$$

Considerando o coeficiente de Poisson $\nu = 0,2$, obtém-se a rigidez a flexão da laje conforme a Equação 2.49:

$$D = \frac{E_{cs} \cdot h_e^3}{12(1 - \nu^2)} \quad 2.49$$

A flecha é calculada para a combinação quase permanente do carregamento que se dá através da Equação 2.50:

$$P_o = g + \Psi_2 \cdot q \quad 2.50$$

g = Carga permanente (kN/m^2);

q = Carga variável (kN/m^2);

Ψ_2 = Coeficiente, para escritórios, usa-se 0,4.

Para o cálculo da flecha do centro da laje (w_c), utiliza-se a relação expressa pela Equação 2.51:

$$\frac{l_x}{l_y} \quad 2.51$$

O resultado dessa relação é usado para realizar uma análise na Tabela de Araújo (2014), conforme Anexo A.2 e obter o valor final de w_c .

- Flecha Inicial, é obtida através da Equação 2.52:

$$W_o = 0,001 w_c \cdot \frac{P_o \cdot l_x^4}{D} \quad 2.52$$

- Flecha Final

Considerando um coeficiente de fluencia $\varphi = 2,5$ a flecha final é dada pela Equação 2.53:

$$W_\infty = (1 + \varphi) W_o \quad 2.53$$

- Flecha admissível é calculada conforme Equação 2.54:

$$W_{adm} = \frac{l_x}{250} \quad 2.54$$

Se resultar em $W_\infty < W_{adm}$, significa que as dimensões adotadas são satisfatórias.

2.2.7.2.7 Cálculo da armadura longitudinal

Tendo como base a Tabela de Araújo (2014) presente no Anexo A.2, com a relação de l_x/l_y , obtêm-se os coeficientes M_x e M_y .

Os momentos fletores no centro da laje são obtidos de acordo com as Equações 2.55 e 2.56:

$$M_x = 0,001 \cdot m_x \cdot p l_x^2 \quad 2.55$$

$$M_y = 0,001 \cdot m_y \cdot p l_x^2 \quad 2.56$$

Os momentos fletores correspondentes a cada nervura são expressos através das Equações 2.57 e 2.58:

$$M_x = b \cdot M_x \quad 2.57$$

$$M_y = h \cdot M_y \quad 2.58$$

Dimensionando a seção T visando os momentos fletores equivalentes a cada nervura mencionada acima, obtêm-se as armaduras A_{sx} e A_{sy} pelas Equações 2.59 e 2.60:

Cálculo do KMD:

$$KMD = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \quad 2.59$$

Onde:

b_w = Largura da mesa (cm);

d = Altura útil mínima da seção (Usa-se a Equação 2.17) (cm).

Tomando em consideração o valor do KMD, e tendo como base a Tabela de Carvalho; Filho (2016), conforme Anexo A.6 obtêm-se o valor de KZ.

Cálculo da armadura:

$$A_s = \frac{M_d}{KZ. d. f_{yd}} \quad 2.60$$

Onde:

M_d = Momento majorado de cálculo;

d = Altura útil mínima da seção (Usa-se a Equação 2.17) (cm);

f_{yd} = Resistência característica de cálculo do aço (MPa).

3 METODOLOGIA

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

3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Neste trabalho foi apresentada uma análise comparativa entre dois sistemas estruturais. Primeiramente, foram definidos os sistemas estruturais a serem analisados, com base nos dois focos principais dos profissionais que são: economia e a possibilidade de vencer grandes vãos. Com esses dois focos em mente, foram realizadas leituras, e desenvolvida uma pesquisa bibliográfica, através de livros, artigos e normas, em que se obteve o embasamento para realização do estudo e escolha das lajes, de forma a expor seus diferentes tipos e verificar as suas principais características e a partir daí criar uma edificação modelo.

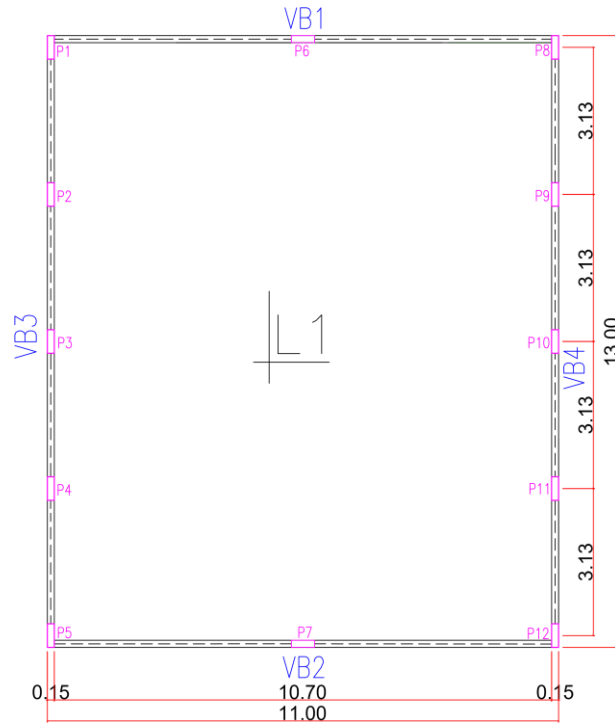
A edificação analisada trata-se de um prédio comercial que possui um pavimento térreo e um mezanino, cujo projeto arquitetônico foi desenvolvido pelos autores para ser utilizado como base para as concepções estruturais de cada um dos sistemas em análise. O objeto de estudo para ambos os casos contém uma área de 143 m² com pé direito do pavimento térreo de 2,70 m e no superior de 2,77 m. O projeto foi desenvolvido no *software* AutoCad (2018), conforme a Figura 3.1.

O modelo é uma laje apoiada sobre vigas nas extremidades. Nesse modelo existem no total 12 pilares de 15x50 cm todos apoiando as vigas de periferia. A planta baixa modelo será utilizada para ambas as lajes, conforme a Figura 3.1.

Outro ponto importante é a realização dos cálculos para obtenção da quantidade de concreto que será usado na concretagem da laje. No caso da laje maciça esse cálculo é realizado multiplicando o valor da área da laje pelo valor da sua espessura. Na laje nervurada é realizado através da soma da capa, com o volume das nervuras, que é o valor da altura do EPS menos o valor da sapata que foi adotado de 3 cm, vezes o valor de b_w multiplicado por 2. Esse resultado é usado para 1m² da laje. Ou seja, para obter o valor final do volume de concreto é só multiplicar esse valor pela área total da laje.

Em relação aos materiais de construção e revestimento, as ações permanentes a serem consideradas com seus respectivos pesos específicos aparentes são descritas na Tabela 3.1.

Figura 3.1 – Projeto base.



Fonte: AUTOR, 2020.

Tabela 3.1 – Peso específico aparente dos materiais de construção.

Elementos construtivos	Composição/Material	Peso específico aparente γ_{ap} kN/m ²
	Argamassa, cimento e areia.	21 kN/m ²
Material de construção	Concreto armado	25kN/m ²
	Revestimentos de pisos de edifícios residenciais e comerciais	20 kN/m ²
Revestimentos	Forro de gesso	0,5 kN/m ²
	Contrapiso	19 kN/m ²

Fonte: AUTOR, 2020.

As estruturas devem ser projetadas para suportar as cargas variáveis indicadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Cargas variáveis.

Local		Carga uniformemente distribuída kN/ m ²
Escritório ^a	Sanitários	2kN/m ²
Salas de uso geral ^a		

Fonte: AUTOR, 2020.

3.2 LANÇAMENTO DE DADOS

Iniciado o dimensionamento e com os dados e o projeto, o primeiro passo é o cálculo estrutural. Deve-se levar em consideração a grande importância desta etapa pois é nela que está a parte essencial para uma boa edificação.

Para a análise e detalhamento dos sistemas estruturais, foram utilizados o passo a passo apresentado no item 2.2 seguindo as prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Considerou-se a resistência característica à compressão do concreto (F_{ck}) igual a 25MPa e aço CA-50 para ambas as lajes. Foi adotada a classe de agressividade ambiental II, logo, o cobrimento das lajes é igual a 2,5cm, seguindo o item 7.4 da NBR 6118 (ABNT, 2014).

No sistema estrutural de laje nervurada consideram-se nervuras bidirecionais. É necessário adotar um tipo de material que irá preencher os espaços vazios.

Para ambas as lajes não houve subdivisões em laje menor por existir um vão livre sem pilares ao meio, somente nas extremidades não contendo escadas.

Em relação ao tipo de armação a laje será armada em duas direções, sendo caracterizada como laje para piso.

3.3 ROTINA DE CÁLCULO, LAJE MACIÇA

Primeiramente é realizado um pré-dimensionamento para obter o valor inicial da altura útil mínima, através da razão entre o menor vão (L_x) e a multiplicação entre os coeficientes (ψ_2 e ψ_3) adquiridos através das tabelas presente no Anexo A.4 e A.5.

Com o valor da altura útil mínima (d_{\min}), calcula-se a altura total da laje (h), conforme mostrado no Apêndice A.1.1.2 e A.1.1.3, utilizando a soma da altura mínima, cobrimento

nominal (C_{nom}), bitola (ϕ) e metade da bitola ($\frac{\phi}{2}$), onde encontrou-se o valor inicial de 34,43 adotando-se então 35 cm. No entanto, foi verificado que a altura estava superdimensionada, sendo assim, foram realizados novos cálculos obtendo os valores finais conforme a Tabela 3.3 a seguir:

Tabela 3.3 – Valores finais calculados para laje maciça.

Dados da laje	Laje maciça
Bitola (ϕ)	6,30 mm
Altura útil mínima (d_{min})	13,76 cm
Altura total (h)	27 cm
Largura (b_w)	100 cm
Cobrimento (c)	2,50 cm
Menor vão entre face (L_x)	11 m
Maior vão entre face (L_y)	13 m
Coefficiente (ψ_2)	1,42
Coefficiente (ψ_3)	25
Λ	1,18
Coefficiente (α)	6,36
Coefficiente (μ_x)	5,90
Coefficiente (μ_y)	4,48

Fonte: AUTOR, 2020.

Com os cálculos iniciais realizados, segue a determinação das ações permanentes e variáveis que são obtidas através do seu peso próprio multiplicado pela espessura do respectivo material, conforme a NBR 6120 (ABNT, 2019), que estão descritos no Apêndice A.1.1.15.

O valor final das cargas atuantes na laje é obtido através da soma entre as cargas permanentes e variáveis, conforme mostrado na Tabela 3.4:

Tabela 3.4 – Cálculo das ações atuantes – Laje maciça.

Ações atuantes	Laje maciça
Permanentes	
Concreto armado	$F_{g} = 4,50 \text{ kN/m}^2$
Revestimento	$F_{g} = 0,42 \text{ kN/m}^2$
Piso cerâmico	$F_{g} = 0,40 \text{ kN/m}^2$
Contra piso	$F_{g} = 0,28 \text{ kN/m}^2$
Forro	$F_{g} = 0,01 \text{ kN/m}^2$
Variáveis	
Escritório e sala de uso geral	$F_{g} = 2,0 \text{ kN/m}^2$
Total	$\Sigma = 7,615 \text{ kN/m}^2$

Fonte: AUTOR, 2020.

3.4 ROTINA DE CÁLCULO, LAJE NERVURADA

Inicialmente foi escolhido o tipo de material inerte que será usado nas nervuras, neste caso bloco de isopor de 70x70x45 cm. Em seguida, foi calculada a altura útil através da divisão do menor vão (L_x) por 30, onde se obteve o valor de 36,66 e adotou-se 37, conforme o Apêndice B.2.2.3. Para obter o valor das cargas atuantes na laje foi calculado o valor do EPS que posteriormente será descontado do peso próprio do concreto. Segue abaixo o passo a passo conforme Equações: 3.1 a 3.6:

$$A_{\text{total}} = S_x \cdot S_y \quad 3.1$$

$$A_{\text{EPS}} = l_{\text{ox}} \cdot l_{\text{oy}} \quad 3.2$$

$$V_{\text{total}} = S_x \cdot S_y \cdot h_f \quad 3.3$$

$$V_{\text{EPS}} = l_{\text{ox}} \cdot l_{\text{oy}} \cdot 0,45 \quad 3.4$$

$$V_{\text{final}} = V_{\text{total}} - V_{\text{EPS}} \quad 3.5$$

$$P_p = \frac{V_{\text{final}} \cdot \gamma}{A_{\text{total}}} \quad 3.6$$

Onde:

A_{total} = Área total

A_{EPS} = Área do EPS

V_{total} = Volume total

V_{EPS} = Volume do EPS

Pp = Peso próprio do concreto

A Tabela 3.5, descreve os valores iniciais calculados para a laje nervurada.

Tabela 3.5 – Valores iniciais correspondentes à laje nervurada.

Dados da laje	Laje nervurada
Distância entre eixos ($S_x = S_y$)	80 cm
Largura das nervuras (b_w)	10 cm
Distância livre entre nervuras ($l_{ox} = l_{oy}$)	70 cm
Altura útil mínima (d_{\min})	32 cm
Menor vão entre face (L_x)	11 m
Maior vão entre face (L_y)	13 m
Bloco EPS	70x70x45 cm
Altura útil (d)	37 cm
Altura da seção (h)	50 cm
Coefficiente (ψ_2)	0,4
Coefficiente de Poisson (ν)	0,2
Coefficiente de fluência (ϕ)	2,5

Fonte: AUTOR, 2020.

Algumas cargas foram mantidas constantes, conforme mostrado no Apêndice B.2.2.5, havendo diferença somente no peso próprio do concreto armado que teve que ser descontado do valor referente ao peso do EPS, conforme descrito na Tabela 3.6:

Tabela 3.6 – Cálculo das ações atuantes – Laje nervurada.

Ações atuantes	Laje nervurada
Permanentes	
Concreto armado	$F_g = 3,89 \text{ kN/m}^2$
Revestimento	$F_g = 0,42 \text{ kN/m}^2$
Piso cerâmico	$F_g = 0,4 \text{ kN/m}^2$
Contra piso	$F_g = 0,285 \text{ kN/m}^2$
Forro	$F_g = 0,01 \text{ kN/m}^2$
Variáveis	
Escritório e sala de uso geral	$F_q = 2,0 \text{ kN/m}^2$
Total	$\Sigma = 7,005 \text{ kN/m}^2$

Fonte: AUTOR, 2020.

Acima foram mostrados os principais dados utilizados para o desenvolvimento do cálculo de ambas as lajes. O passo a passo do dimensionamento está presente no Apêndice A e B.

Para a comparação entre os dois métodos foram feitas tabelas para realização de análise constatando suas diferenças quanto ao peso próprio, flechas, momentos e área de aço para os dois elementos analisados, mostrando assim, o tipo de estrutura mais viável em relação a este estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo foram feitas comparações das lajes em destaque, demonstrando através de dados a que melhor se enquadra nas condições para perfeita execução da obra.

4.1 COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS

Para uma melhor análise dos resultados, serão apresentadas tabelas dos quantitativos finais de cada etapa.

4.1.1 Comparação das cargas atuantes nas lajes

Relação entre peso próprio das estruturas conforme a Tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Comparativo das ações atuantes nas lajes

Cargas	Laje Maciça	Laje Nervurada
Permanentes	$F_g = 5,615 \text{ kN/m}^2$	$F_g = 5,005 \text{ kN/m}^2$
Variáveis	$F_q = 2,0 \text{ kN/m}^2$	$F_q = 2,0 \text{ kN/m}^2$
Total	$\Sigma = 7,615 \text{ kN/m}^2$	$\Sigma = 7,005 \text{ kN/m}^2$

Fonte: AUTOR, 2020.

Um dos resultados que menos apresentou diferenças entre um método e outro, foram o peso próprio das lajes, comprovado na Tabela 4.1. Essa diferença cresce quanto maior a altura da laje. Entretanto, nesse caso, nas cargas da laje nervurada precisou-se subtrair o valor do material inerte utilizado, logo no seu carregamento haveria uma redução, levando assim ao valor final semelhante ao da laje maciça. Desta forma, a laje nervurada saiu em vantagem nesse critério em relação à maciça apresentando 8% mais leve em relação às cargas.

4.1.2 Comparação das flechas

Relação das flechas nas estruturas de acordo com a Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Valores finais das flechas

Flechas	Laje Maciça	Laje Nervurada
Flecha total (w_{tot})	4,09 cm	2,35 cm
Flecha limite (δ_{lim})	4,40 cm	4,40 cm

Fonte: AUTOR, 2020.

Conforme apresentado na Tabela 4.2, as flechas tanto da laje maciça quanto da nervurada, respeitaram os limites estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Esses limites são valores práticos, determinados de modo a evitar que os deslocamentos atingidos causem danos à estrutura. No entanto fazendo uma comparação em relação às lajes, é comprovado que a flecha da laje nervurada é aproximadamente 43% menor devido ao seu peso próprio,

espessura e espessura da capa levando em consideração o uso de EPS neste caso. A laje maciça por outro lado tem seu peso próprio mais elevado sendo concretada sem a existência de vazios fazendo assim com que o valor das flechas aumente.

4.1.3 Comparação dos momentos

Relação dos momentos nas estruturas de acordo com a Tabela 4.3:

Tabela 4.3 – Valores finais dos momentos

Momentos	Laje Maciça	Laje Nervurada
M_x	60,43 kN.m	40,45 kN.m
M_y	45,88 kN.m	31,53 kN.m

Fonte: AUTOR, 2020.

Na Tabela 4.3 são evidenciadas as diferenças dos momentos nos dois sentidos (x e y) de cada modelo de cálculo. Comparando os resultados nota-se que o método de laje maciça forneceu momentos fletores maiores que o da laje nervurada, cerca de 33% a mais.

4.1.4 Comparação quanto à área de aço e quantitativo de concreto

As lajes armadas em duas direções, como é o caso estudado neste trabalho, apresentam área de aço positiva em relação aos dois sentidos (x e y), gerando assim uma espécie de malha.

A altura da laje maciça é 27 cm. A área de aço e o quantitativo de concreto estão indicados na tabela 4.4:

Tabela 4.4 – Área de aço e quantitativo de concreto relativo à estrutura com laje maciça.

Quantitativo de concreto (m ³)	Direção da armadura	Área de aço (cm ² /m)
38,61	A_{sx}	14,22
	A_{sy}	10,80

Fonte: AUTOR, 2020.

A altura da laje nervurada é 50 cm. A área de aço e o quantitativo de concreto estão indicados na tabela 4.5:

Tabela 4.5 – Área de aço e quantitativo de concreto relativo à estrutura com laje nervurada.

Quantitativo de concreto (m ³)	Direção da armadura	Área de aço (cm ² /m)
19,16	A_{sx}	3,97
	A_{sy}	3,09

Fonte: AUTOR, 2020.

Analisando os dois sistemas estruturais de acordo com as Tabelas 4.4 e 4.5, verifica-se que a estrutura com lajes maciças apresenta alto consumo de aço e concreto com aproximadamente 72% a mais que a laje nervurada em relação à área de aço e 51% a mais em relação à quantidade de concreto.

Isso se dá devido principalmente ao peso próprio da laje maciça, que por ser executada sem nervuras, ou seja, sem vazios, o seu peso próprio é mais elevado, e somando com as demais cargas permanentes e variáveis resulta num carregamento maior, fazendo assim que sua área de aço seja maior em relação à laje nervurada, que por sua vez, possui nervuras, e que nessas nervuras não é necessário o uso de aço nem de concreto. Tanto em lajes que usam EPS, caso analisado neste trabalho, como nos casos em que se usam cubetas esses materiais inertes podem ser retirados após a cura da laje.

Araújo (2014) confirma que para reduzir o peso próprio da estrutura é necessário adotar a solução em lajes nervuradas. Nessas lajes, a zona de tração é constituída por nervuras entre as quais podem ser colocados materiais inertes, neste caso o bloco de isopor.

Verificou-se um aumento do consumo de concreto da laje maciça sobre o modelo de laje nervurada apesar da laje maciça apresentar uma espessura somente de 18 cm, as dimensões das vigas internas aumentariam, compensando o fato de ser um vão livre sem pilares ao centro aumentando assim o consumo de concreto. A laje nervurada possui uma espessura de 50 cm que pode ser justificada pela presença de vigas menores e do material inerte, neste caso o EPS. Obtendo assim uma economia de aproximadamente 26 %.

Outro ponto importante na comparação entre as lajes são os demais elementos estruturais, as vigas e os pilares, que não foram estudados neste trabalho, mas que interferem diretamente em seus dimensionamentos, pois os carregamentos oriundos das lajes são descarregados nas vigas, e conseqüentemente nos pilares, ou seja, com o aumento do peso próprio das lajes esses elementos terão sua seção mais elevada.

Com base nos resultados apresentados acima é possível mostrar algumas vantagens e desvantagens dos sistemas estudados. Como vantagem do sistema de lajes nervuradas, pode-se citar que ela elimina a maior parte do concreto abaixo da linha neutra (zona de tração), e com o alívio do peso próprio é possível vencer vãos maiores do que a laje maciça. Já como desvantagem da laje nervurada, pode-se citar a ausência de mão de obra qualificada. Como vantagem da laje maciça, podemos citar facilidade de execução, sendo mais utilizadas em obras de pequeno e médio porte, como desvantagem tem o grande consumo de aço e concreto e grande quantidade de formas e escoramento.

5 CONCLUSÕES

O estudo bibliográfico apresentou dois sistemas estruturais bastante conhecidos e utilizados no canteiro de obras, mostrando seus respectivos métodos de cálculo para dimensionamento, vantagens e desvantagens.

O assunto foi exposto de forma a comparar os dois métodos construtivos abrangendo-os de forma geral, mostrando sua viabilidade econômica e seus aspectos construtivos.

No decorrer do trabalho pode-se observar a importância de um estudo criterioso para a determinação da alternativa mais adequada a uma edificação e o quanto a escolha da laje implica nos custos finais da obra.

O dimensionamento foi feito através de planilhas, de modo que se tornou possível efetuar o comparativo entre as lajes. Os resultados obtidos comprovaram a eficiência e a economia em termos de material que a laje nervurada apresenta quando comparado com a laje maciça, para o caso estudado.

O resultado obtido pode ser comprovado em Araújo (2014), que afirma que em geral as lajes nervuradas exigem uma espessura total h cerca de 50% superior à que seria necessária para as lajes maciças. Entretanto, o peso próprio da laje nervurada (e o consumo de concreto) é inferior ao da laje maciça, resultando em uma solução mais econômica para vãos acima de 8 metros aproximadamente.

Assim, pode-se afirmar que os objetivos geral e específico foram alcançados, uma vez que foi possível verificar que para o mezanino estudado, o emprego da laje nervurada é mais viável em questão de economia, levando-se em consideração os materiais utilizados, fato demonstrado nas tabelas 4.1 e 4.2 que retratam a enorme diferença entre as áreas de aço e a quantidade de concreto que a laje nervurada apresenta em relação à maciça.

Porém, outros fatores desfavorecem o emprego dessa laje, como por exemplo, a falta de mão de obra qualificada, principalmente em cidades menos desenvolvidas, que faz com que o uso dela se torna inviável devido ao custo. Em questões como estas o profissional deve alinhar com seu cliente o seu real objetivo, seja ele econômico ou a possibilidade de vencer grandes vãos.

Como sugestões para estudos futuros, deve-se explorar também o detalhamento final de ambas as lajes, e com isso realizar uma comparação orçamentária, mostrando assim uma análise de custos. Outro ponto relevante seria realizar uma análise comparativa, entre lajes maciças convencionais, lajes nervuradas e lajes pré-fabricadas de material cerâmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado**. 4. ed. Rio Grande:Dunas, 2014.1v.
- ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado**. 4. ed. Rio Grande:Dunas, 2014.2v.
- ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado**. 4. ed. Rio Grande:Dunas, 2014.4v.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR – 8953: **Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR – 6118: **Projeto de estruturas de concreto – procedimento**. Rio de janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR – 7480: **Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação**. Rio de janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR – 6120: **Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de janeiro, 2019.
- BASTOS, Henrique Braga. **Análise teórica e experimental de lajes nervuradas bidirecionais**. 2016. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2016.
- BASTOS, Prof. Dr. Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do concreto armado**. 2019. 89 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista – Unesp, Bauru, 2019.
- BEZERRA, Ewerton Alves, **Dimensionamento automático de vigas e lajes de concreto armado**. 2016. 99f. . Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte/ UFRN, Rio Grande do Norte, Natal, 2016.
- 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.
- CAMPOS FILHO, Américo. **Projeto de lajes Maciças de Concreto Armado**. 2014. 45 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Civil.
- CARVALHO. R. C e FIGUEIREDO FILHO. J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo NBR 6118:2003**. 3ª Edição, São Carlos SP, Edufscar, 2016.
- CARVALHO. R. C e FIGUEIREDO FILHO. J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo NBR 6118:2003**. 3ª Edição, São Carlos SP, Edufscar, 2017.

CARVALHO, Mailson Castelão de. **Análise Comparativa estrutural e econômica entre as lajes maciça, nervurada treliçada e nervurada com cuba plástica em edifício de 10 pavimentos**. 2012. Pág 79. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) – Departamento de Tecnologia da Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana.

COELHO, Jano d'Araujo. **Análise de lajes nervuradas por analogia de grelha**. Santa Catarina, RS. 2013.

CHUST, R. C. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. São Carlos. V.3, Pag. 64-65. 2013.

CORDOVIL, Luiz Augusto Berger Lopes. Estudo da ABNT 15575 – “ **Edificações habitacionais – Desempenho**” e possíveis impactos no setor da construção civil na cidade do Rio de Janeiro. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2013.

CLIMACO, João Carlos Teatini de. **Estrutura de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação**. Brasília: Editora Universidade de Brasília: Finatec, 2005.

DURIGAN, Giuseppe; PORTELLA, Renan Wunderlich. **Desenvolvimento de aplicativo para dimensionamento de elementos em concreto armado**. 2017. 218 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná /UFTPR, Paraná, 2017.

FARIA. M. P., **Estruturas para edifícios de concreto armado: análise comparativa de soluções com lajes convencionais, lisas e nervuradas**. 2010. 97 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Gomes, J. H. D., Neto, A. F. B., Salomão, P. E. A., & Santiago, A. N. O.(2018) **Análise Comparativa do sistema construtivo de alvenaria convencional e sistema construtivo de alvenaria estrutural em uma casa térrea em Teófilo Otoni**. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro–Unipac ISSN, 2178, 6925.

NOLASCO, Gláucia. publicado <https://maisengenharia.wordpress.com/2014/10/06/tipos-de-laje/>. São Paulo, 2014.

LOPEZ, André F. De O.; BONO, Gustavo. **Análise numérica comparativa entre lajes maciças e nervuradas com diferentes tipos de materiais de enchimento**. In. Mecânica Computacional Volume XXXII, págs 3 pag 19-22, 2013.

MOTA Larissa Fernandes. **Projeto estrutural da superestrutura de um Prédio residencial com cinco pavimentos em concreto**. 2017. 122 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense /UFF, Rio de Janeiro, 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2ª Edição, São Paulo, Pini, 2015. 452p.

PORTO, T. B.; FERNANDES, D. S. G. **Curso básico de concreto armado: conforme NBR 6118/2014**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

SCHWETZ, P. F. **Análise teórico-experimental de uma laje nervurada em um modelo reduzido sujeita a um carregamento linear**. Porto Alegre – RS, UFRS, 2005.

SILVA, Lucas. **Estudo comparativo entre lajes nervuradas e maciças em função dos vãos entre apoios**. 2010. 99 pg. Dissertação (trabalho de conclusão de curso) – Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

SOUZA, V. C. M; CUNHA, A, J, P. **Lajes em concreto armado e protendido**. Rio de Janeiro. Ed. UERJ, 1998.

VASCONCELLOS, J.C. **Concreto Armado, Arquitetura Moderna**, Escola Carioca – Levantamento e Notas. 2004. 313f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Porto Alegre, 2004.

APÊNDICE A – ROTEIRO DE CÁLCULOS DA LAJE MACIÇA

A.1 PRÉ-DIMENSIONAMENTO

A.1.1 Laje Maciça

A.1.1.1 Dados

- Bitola (ϕ) = 6,30mm
- Largura (b_w) = 100 cm
- Cobrimento (c) = 2,50 cm
- Módulo de elasticidade do concreto (E_{cs})= 24080 MPa
- Menor vão entre face (L_x) = 11 m
- λ – Razão entre (L_x) e (L_y) = 1,18
- Maior vão entre face (L_y) = 13 m
- Coeficiente (ψ_2) = 1,42 Obs: Valor obtido na tabela, presente no Anexo A.4.
- Coeficiente (ψ_3) = 25 Obs: Valor obtido na tabela, presente no Anexo A.5.
- Coeficiente (α) = 6,36 Obs: Valor obtido na tabela, presente no Anexo A.1.
- Coeficiente (μ_x) = 5,90 Obs: Valor obtido na tabela, presente no Anexo A.3.
- Coeficiente (μ_y) = 4,48 Obs: Valor obtido na tabela presente no Anexo A.3.

A.1.1.2 Equação 2.16 - Altura útil.

$$d = \frac{l_x}{\psi_2 \cdot \psi_3}$$

$$d = \frac{1100}{1,42 \cdot 25}$$

$$d = 30,98 \text{ cm}$$

A.1.1.3 Equação 2.18 – Altura total.

$$h = d + C_{\text{nominal}} + \phi + \frac{\phi}{2}$$

$$h = 30,98 + 2,5 + 0,63 + \frac{0,63}{2}$$

$$h = 34,43 \text{ cm (Adota-se 35 cm)}$$

A.1.1.4 Equação 2.15 – Carregamento Atuantes

$$g = \gamma_{\text{mat}} \cdot h$$

Permanentes

- Peso próprio do concreto

$$g = 25 \cdot 0,35$$

$$g = \mathbf{8,75}$$

- Revestimento

$$g = 21 \cdot 0,02$$

$$g = \mathbf{0,42}$$

- Piso

$$g = 20 \cdot 0,02$$

$$g = \mathbf{0,40}$$

- Contra piso

$$g = 19 \cdot 0,015$$

$$g = \mathbf{0,285}$$

- Forro

$$g = 0,5 \cdot 0,02$$

$$g = \mathbf{0,01}$$

$$f_g = 8,75 + 0,42 + 0,40 + 0,285 + 0,001$$

$$f_g = \mathbf{9,865 \text{ kN}}$$

Variáveis

$$f_Q = \mathbf{2 \text{ kN}}$$

$$P_{\text{total}} = f_g + f_q$$

$$P_{\text{total}} = 9,865 + 2$$

$$P_{\text{total}} = \mathbf{11,865 \text{ kN}}$$

$$P_0 = 0,3 \cdot 2 + 9,865$$

$$P_0 = \mathbf{10,465 \text{ kN}}$$

A.1.1.5 Equação 2.33 – Cálculo das flechas

$$f_{\text{atuante}} = \frac{p l_x^4 \alpha}{h^3 \cdot E_{\text{CS}} \cdot 100}$$

$$f_{\text{atuante}} = \frac{10,465 \cdot 11^4 \cdot 6,52}{0,35^3 \cdot 26072 \cdot 100 \times 10^3}$$

$$f_{\text{atuante}} = \mathbf{0,00943 \text{ m ou } 0,943 \text{ cm}}$$

Obs: Os valores referente à $\Delta\xi$, encontra-se na Tabela A.7, presente no Anexo A, o valor de ρ , está explicado no item 2.2.7.1.6

A.1.1.6 Equação 2.34 – Flecha Diferida

$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1+50 \cdot \rho}$$

$$\alpha_f = \frac{\xi(t) - \xi(t_0)}{1+50 \cdot 0}$$

$$\alpha_f = \frac{2-0,54}{1}$$

$$\alpha_f = 1,46$$

A.1.1.7 Equação 2.35 – Flecha Total

$$w_{\text{tot}} = (1 + \alpha_f) \cdot f_{\text{atuante}}$$

$$w_{\text{tot}} = (1 + 1,46) \cdot 0,943$$

$$w_{\text{tot}} = \mathbf{2,32 \text{ cm}}$$

Obs: w_{tot} é menor que a flecha limite ok

A.1.1.8 Equação 2.36 – Cálculo da Flecha limite

$$\delta_{\text{lim}} \leq 1/250$$

$$\delta_{\text{lim}} \leq 1100/250$$

$$\delta_{\text{lim}} \leq \mathbf{4,4 \text{ cm}}$$

A.1.1.9 Equações 2.25 e 2.26 – Cálculo dos momentos

- m_x

$$m_x = \mu_x \frac{pl_x^2}{100}$$

$$m_x = 5,90 \cdot \frac{10,465 \cdot 11^2}{100}$$

$$m_x = 74,71 \text{ kN/m}$$

- m_y

$$m_y = \mu_y \frac{pl_x^2}{100}$$

$$m_y = 4,48 \cdot \frac{10,465 \cdot 11^2}{100}$$

$$m_y = 56,73 \text{ kN/m}$$

A.1.1.10 Equação 2.17 – Cálculo da nova Altura útil

Obs: Usa-se o maior valor do momento, neste caso m_x

$$d_{\min} = 2 \cdot \left(\sqrt{\frac{M_d}{B_w \cdot f_{cd}}} \right)$$

$$d_{\min} = 2 \cdot \left(\sqrt{\frac{74,71 \cdot 1,4}{1 \cdot \frac{30000}{1,4}}} \right)$$

$$d_{\min} = 0,153 \text{ m ou } 15,30 \text{ cm}$$

A.1.1.11 Equação 2.18 – Cálculo da nova Altura da laje

$$h = d + C_{\text{nominal}} + \phi + \frac{\phi}{2}$$

$$h = 15,30 + 2,5 + 0,63 + \frac{0,63}{2}$$

$$h = 18,75 \text{ cm Adotar } 19 \text{ cm ou } 0,19 \text{ m}$$

A.1.1.12 Equação 2.15 – Recalculando os carregamentos Atuantes para $h = 19 \text{ cm}$

$$g = \gamma_{\text{mat}} \cdot h$$

Permanentes

- Peso próprio do concreto

- $g = 25. 0,19$
 $g = 4,75$
- Revestimento
 - $g = 21. 0,02$
 $g = 0,42$
- Piso
 - $g = 20. 0,02$
 $g = 0,40$
- Contra piso
 - $g = 19. 0,015$
 $g = 0,285$
- Forro
 - $g = 0,5. 0,02$
 $g = 0,01$

$$f_g = 4,75 + 0,42 + 0,40 + 0,285 + 0,001$$

$$f_g = 5,865 \text{ kN}$$

Variáveis

$$f_Q = 2 \text{ kN}$$

$$P_{\text{total}} = f_g + f_q$$

$$P_{\text{total}} = 5,865 + 2$$

$$P_{\text{total}} = 7,865 \text{ kN}$$

$$P_0 = 0,3 \cdot 2 + 5,865$$

$$P_0 = 6,465 \text{ kN}$$

A.1.1.13 Equação 2.33 – Recalculando as flechas atuantes para $h = 19 \text{ cm}$

$$f_{\text{atuante}} = \frac{p l_x^4 \alpha}{h^3 \cdot E_{cs} \cdot 100}$$

$$f_{\text{atuante}} = \frac{6,465 \cdot 11^4 \cdot 6,36}{0,19^3 \cdot 24080 \cdot 100 \cdot 10^3}$$

$$f_{\text{atuante}} = 0,0364 \text{ m ou } 3,64 \text{ cm}$$

A.1.1.14 Equação 2.35 – Flecha Total

$$w_{\text{tot}} = (1 + \alpha_f) * f_{\text{atuante}}$$

$$w_{\text{tot}} = (1 + 1,46) * 3,64$$

$$w_{\text{tot}} = 9,96 \text{ cm}$$

Obs: w_{tot} é maior que a flecha limite, precisa aumentar a altura da laje.

A.1.1.15 Equação 2.15 – Recalculando os carregamentos Atuantes para $h= 23 \text{ cm}$

$$g = \gamma_{\text{mat}} \cdot h$$

Permanentes

- Peso próprio do concreto

$$g = 25 \cdot 0,23$$

$$g = 5,75$$

- Revestimento

$$g = 21 \cdot 0,02$$

$$g = 0,42$$

- Piso

$$g = 20 \cdot 0,02$$

$$g = 0,40$$

- Contra piso

$$g = 19 \cdot 0,015$$

$$g = 0,285$$

- Forro

$$g = 0,5 \cdot 0,02$$

$$g = 0,01$$

$$f_g = 4,75 + 0,42 + 0,40 + 0,285 + 0,001$$

$$f_g = 6,865 \text{ kN}$$

Variáveis

$$f_Q = 2 \text{ kN}$$

$$P_{\text{total}} = f_g + f_q$$

$$P_{\text{total}} = 6,865 + 2$$

$$P_{\text{total}} = 8,865 \text{ kN}$$

$$P_0 = 0,3 \cdot 2 + 6,865$$

$$P_0 = 7,465 \text{ kN}$$

A.1.1.16 Equação 2.33 – Recalculando as flechas atuantes para h= 23 cm

$$f_{\text{atuante}} = \frac{p l^4 \alpha}{h^3 \cdot E_{\text{CS}} \cdot 100}$$

$$f_{\text{atuante}} = \frac{7,465 \cdot 11^4 \cdot 6,36}{0,23^3 \cdot 24080 \cdot 100 \times 10^3}$$

$$f_{\text{atuante}} = 0,0237 \text{ m ou } 2,37 \text{ cm}$$

A.1.1.17 Equação 2.35 – Flecha Diferida

$$w_{\text{tot}} = (1 + \alpha_f) \cdot f_{\text{atuante}}$$

$$w_{\text{tot}} = (1 + 1,46) \cdot 2,37$$

$$w_{\text{tot}} = 5,83 \text{ cm}$$

Obs: w_{tot} é maior que a flecha limite, precisa aumentar a altura da laje.

A.1.1.18 Equação 2.15 – Recalculando os carregamentos Atuantes para h= 25 cm

$$g = \gamma_{\text{mat}} \cdot h$$

Permanentes

- Peso próprio do concreto

$$g = 25 \cdot 0,25$$

$$g = 6,25$$

- Revestimento

$$g = 21 \cdot 0,02$$

$$g = 0,42$$

- Piso

$$g = 20 \cdot 0,02$$

$$g = 0,40$$

- Contra piso

$$g = 19 \cdot 0,015$$

$$g = 0,285$$

- Forro

$$g = 0,5 \cdot 0,02$$

$$g = 0,01$$

$$f_g = 4,75 + 0,42 + 0,40 + 0,285 + 0,001$$

$$f_g = 7,365 \text{ kN}$$

Variáveis

$$f_Q = 2 \text{ kN}$$

$$P_{\text{total}} = f_g + f_Q$$

$$P_{\text{total}} = 7,365 + 2$$

$$P_{\text{total}} = 9,365 \text{ kN}$$

$$P_0 = 0,3 \cdot 2 + 6,865$$

$$P_0 = 7,965 \text{ kN}$$

A.1.1.19 Equação 2.33 – Recalculando as flechas atuantes para $h = 25 \text{ cm}$

$$f_{\text{atuante}} = \frac{p l_x^4 \alpha}{h^3 \cdot E_{cs} \cdot 100}$$

$$f_{\text{atuante}} = \frac{7,965 \cdot 11^4 \cdot 6,36}{0,25^3 \cdot 24080 \cdot 100 \cdot 10^3}$$

$$f_{\text{atuante}} = 0,0197 \text{ m ou } 1,97 \text{ cm}$$

A.1.1.20 Equação 2.35 – Flecha Diferida

$$w_{\text{tot}} = (1 + \alpha_f) \cdot f_{\text{atuante}}$$

$$w_{\text{tot}} = (1 + 1,46) \cdot 1,97$$

$$w_{\text{tot}} = 4,89 \text{ cm}$$

Obs: w_{tot} é maior que a flecha limite, precisa aumentar a altura da laje.

A.1.1.21 Equação 2.15 – Recalculando os carregamentos Atuantes para $h = 27 \text{ cm}$

$$g = \gamma_{\text{mat}} \cdot h$$

Permanentes

- Peso próprio do concreto

$$g = 25 \cdot 0,27$$

$$g = 6,75$$

- Revestimento

$$g = 21 \cdot 0,02$$

$$g = 0,42$$

- Piso

$$g = 20 \cdot 0,02$$

$$g = 0,40$$

- Contra piso

$$g = 19 \cdot 0,015$$

$$g = 0,285$$

- Forro

$$g = 0,5 \cdot 0,02$$

$$g = 0,01$$

$$f_g = 4,75 + 0,42 + 0,40 + 0,285 + 0,001$$

$$f_g = 7,865 \text{ kN}$$

Variáveis

$$f_Q = 2 \text{ kN}$$

$$P_{\text{total}} = f_g + f_q$$

$$P_{\text{total}} = 7,865 + 2$$

$$P_{\text{total}} = 9,865 \text{ kN}$$

$$P_0 = 0,3 \cdot 2 + 7,865$$

$$P_0 = 8,465 \text{ kN}$$

A.1.1.22 Equação 2.33 – Recalculando as flechas atuantes para h= 27 cm

$$f_{\text{atuante}} = \frac{p l_x^4 \alpha}{h^3 \cdot E_{cs} \cdot 100}$$

$$f_{\text{atuante}} = \frac{8,465 \cdot 11^4 \cdot 6,36}{0,27^3 \cdot 24080 \cdot 100 \times 10^3}$$

$$f_{\text{atuante}} = 0,0166 \text{ m ou } 1,66 \text{ cm}$$

A.1.1.23 Equação 2.35 – Flecha Diferida

$$w_{\text{tot}} = (1 + \alpha_f) * f_{\text{atuante}}$$

$$w_{\text{tot}} = (1 + 1,46) * 1,66$$

$$w_{\text{tot}} = 4,09 \text{ cm}$$

Obs: w_{tot} é menor que a flecha limite, então OK!

A.1.1.24 Equações 2.25 e 2.26 – Recalculando os novos momentos para $h = 27$

- m_x

$$m_x = \mu_x \frac{pl_x^2}{100}$$

$$m_x = 5,90 \cdot \frac{8,465 \cdot 11^2}{100}$$

$$m_x = 60,43 \text{ kN.m}$$

- m_y

$$m_y = \mu_y \frac{pl_y^2}{100}$$

$$m_y = 4,48 \cdot \frac{8,465 \cdot 11^2}{100}$$

$$m_y = 45,88 \text{ kN.m}$$

A.1.1.25 Equação 2.17 – Cálculo da nova Altura útil

Obs: Usa-se o maior valor do momento, neste caso m_x

$$d_{\text{mín}} = 2 \cdot \left(\sqrt{\frac{M_d}{B_w \cdot f_{cd}}} \right)$$

$$d_{\min} = 2 \cdot \left(\sqrt{\frac{60,43 \cdot 1,4}{1 \cdot \frac{25000}{1,4}}} \right)$$

$$d_{\min} = 0,1376 \text{ m ou } 13,76 \text{ cm}$$

A.1.1.26 Equação 2.18 – Cálculo da nova Altura da laje

$$h = d + C_{\text{nominal}} + \phi + \frac{\phi}{2}$$

$$h = 13,76 + 2,5 + 0,63 + \frac{0,63}{2}$$

$$h = 17,21 \text{ cm (Adotar } 27 \text{ cm ou } 0,27 \text{ m devido o valor da flecha)}$$

A.1.1.27 Equação 2.39 – Cálculo do KMD

- **KMD PARA M_x**

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

$$KMD = \frac{60,43 \cdot 1,4}{1 \cdot 13,76^2 \cdot \frac{50}{1,15}}$$

$$KMD = 0,0102 \text{ Adota-se } 0,01$$

Entrando na Tabela presente no Anexo A.6, a partir do valor de KMD, encontra-se o **KZ = 0,994**.

- **KMD PARA M_y**

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

$$KMD = \frac{45,88 \cdot 1,4}{1 \cdot 13,76^2 \cdot \frac{50}{1,15}}$$

$$KMD = 0,0077 \text{ Adota } 0,01$$

Entretanto na Tabela presente no Anexo A.6, a partir do valor de KMD, encontra-se o **KZ = 0,994**.

A.1.1.28 Equação 2.40 – Cálculo do As

- As Mx

$$A_s = \frac{M_d}{KZ \cdot d \cdot f_{yd}}$$

$$A_s = \frac{60,43 \cdot 1,4}{0,994 \cdot 13,76 \cdot \frac{50}{1,15}}$$

$$A_s = 14,22 \text{ cm/m}$$

- As My

$$A_s = \frac{M_d}{KZ \cdot d \cdot f_{yd}}$$

$$A_s = \frac{45,88 \cdot 1,4}{0,994 \cdot 13,76 \cdot \frac{50}{1,15}}$$

$$A_s = 10,80 \text{ cm/m}$$

APÊNDICE B – ROTEIRO DE CÁLCULOS DA LAJE NERVURADA

B.2 PRÉ-DIMENCIONAMENTO

B.2.2 Laje Nervurada

B.2.2.1 Dados:

- Distância livre entre nervuras: $l_{ox} = l_{oy} = 70 \text{ cm}$
- Coeficiente (ν) = 0,2 Obs: Valor considerado de acordo com Araújo, 2014.
- Coeficiente (ψ_2) = 0,4 Obs: Para escritórios, usa-se 0,4.
- Coeficiente (ϕ) = 2,5 Obs: Valor considerado de acordo com Araújo, 2014.

- **Distância entre os eixos das nervuras - Equação 2.41:**

$$S = l_o + b_w \leq 110 \text{ cm}$$

$$S = 70 + 10 \leq 110 \text{ cm}$$

$$S_x = S_y = 80 \text{ cm} \leq 110 \text{ cm}$$

- **Larguras das nervuras – Equação 2.42**

$$b_w \geq 5 \text{ cm}$$

$$b_w = 10 \text{ cm}$$

- **Espessura da mesa – Equação 2.43**

$$h_f \geq \begin{cases} 4 \text{ cm} \\ l_o/15 \end{cases}$$

$$h_f \geq \begin{cases} 4 \text{ cm} \\ 70/15 \end{cases}$$

$$h_f \geq \begin{cases} 4 \text{ cm} \\ 4,667 \text{ cm} \end{cases}$$

$$h_f = 4,667 \text{ cm} - \text{Adotar } h_f = 5 \text{ cm}$$

B.2.2.2 Vão de Cálculo

$$L_x = 11 \text{ m}$$

$$L_y = 13 \text{ m}$$

B.2.2.3 Altura útil – Equação 2.45

$$d = \frac{l_x}{30}$$

$$d = \frac{1100}{30} = 36,66 \text{ cm}$$

$$\text{Adota-se } d = 37 \text{ cm}$$

B.2.2.4 Altura adotada

$$h = 50 \text{ cm}$$

B.2.2.5 Carregamentos

- Cálculo do EPS:

Equação 3.1

$$A_{\text{total}} = S_x \cdot S_y$$

$$A_{\text{total}} = 0,8 \cdot 0,8$$

$$A_{\text{total}} = \mathbf{0,64 \text{ m}^2}$$

Equação 3.2

$$A_{\text{EPS}} = l_{\text{ox}} \cdot l_{\text{oy}}$$

$$A_{\text{EPS}} = 0,7 \cdot 0,7$$

$$A_{\text{EPS}} = \mathbf{0,49 \text{ m}^2}$$

Equação 3.3

$$V_{\text{total}} = S_x \cdot S_y \cdot h_f$$

$$V_{\text{total}} = 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,5$$

$$V_{\text{total}} = \mathbf{0,32 \text{ m}^3}$$

Equação 3.4

$$V_{\text{EPS}} = 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,45$$

$$V_{\text{EPS}} = \mathbf{0,2205 \text{ m}^3}$$

Equação 3.5

$$V_{\text{final}} = V_{\text{total}} - V_{\text{EPS}}$$

$$V_{\text{final}} = 0,32 - 0,2205$$

$$V_{\text{final}} = \mathbf{0,0995 \text{ m}^3}$$

Permanentes:

- Peso próprio do concreto armado:

$$F_g = \frac{V_{\text{final}} \cdot \gamma}{A_{\text{total}}}$$

$$F_g = \frac{0,0995 \cdot 25}{0,64}$$

$$F_g = \mathbf{3,89 \text{ kN/m}^2}$$

- Revestimento:

$$F_g = 21 \cdot 0,02$$

$$F_g = \mathbf{0,42 \text{ kN/m}^2}$$

- Piso:

$$F_g = 20 \cdot 0,02$$

$$F_g = 0,40 \text{ kN/m}^2$$

- Contrapiso:

$$F_g = 19.0,015$$

$$F_g = 0,285 \text{ kN/m}^2$$

- Forro:

$$F_g = 0,5.0,02$$

$$F_g = 0,01 \text{ kN/m}^2$$

Variáveis:

- Escritório e sala de uso geral:

$$F_q = 2,0 \text{ kN/m}^2$$

$$\Sigma F_g + F_q = 3,89 + 0,42 + 0,40 + 0,285 + 0,01 + 2,0 = 7,005 \text{ kN/m}^2$$

B.2.2.6 Verificação da Flecha

- Espessura equivalente - Equação 2.46:

$$\xi = \frac{l_{ox} l_{oy}}{S_x S_y}$$

$$\xi = \frac{70.70}{80.80}$$

$$\xi = 0,766$$

Equação 2.47:

$$h_e = [(1 - \xi)h^3 + \xi h_f^3]^{1/3}$$

$$h_e = [(1 - 0,766)50^3 + 0,766 .5^3]^{1/3}$$

$$h_e = 30,84 \text{ cm}$$

- Módulo de deformação longitudinal - Equação 2.48:

$$E_{cs} = 0.85 \cdot 21500 \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3}$$

$$E_{cs} = 0.85 \cdot 21500 \left(\frac{25 + 8}{10} \right)^{1/3}$$

$$E_{cs} = 27208 \text{ MPa} - 2720 \text{ kN/cm}^2$$

- **Rigidez a flexão da laje – Equação 2.49:**

$$D = \frac{E_{cs} \cdot h_e^3}{12(1 - \nu^2)}$$

$$D = \frac{2720 \cdot 30,84^3}{12(1 - 0,2^2)}$$

$$D = 6925633,944 \text{ kN/m} - 69256 \text{ kN/m}$$

- **Combinação quase permanente – Equação 2.50:**

$$P_o = g + \Psi_2 \cdot q$$

$$P_o = 5,005 + 0,4 \cdot 2$$

$$P_o = 5,805 \text{ kN/m}^2$$

- **Flecha do centro da laje (w_c) – Equação 2.51:**

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

$$w_c = \frac{11}{13}$$

$$w_c = 0,85$$

Entrando na Tabela presente no Anexo A.2 , partindo deste valor inicial encontra-se o valor final de $w_c = 5,48$.

- **Flecha Inicial – Equação 2.52:**

$$W_o = 0,001 w_c \cdot \frac{P_o \cdot l_x^4}{D}$$

$$W_o = 0,001 \cdot 5,48 \cdot \frac{5,805 \cdot 11^4}{69256}$$

$$W_o = 0,0067 \text{ m} - 0,67 \text{ cm}$$

- **Flecha Final – Equação 2.53:**

$$W_\infty = (1 + \phi) W_o$$

$$W_\infty = (1 + 2,5) \cdot 0,67$$

$$W_\infty = 2,345 \text{ cm}$$

- **Fecha admissível – Equação 2.54:**

$$W_{adm} = \frac{l_x}{250}$$

$$W_{adm} = \frac{1100}{250}$$

$$W_{adm} = 4,4 \text{ cm}$$

B.2.2.7 Cálculo da armadura longitudinal

- **Os momentos fletores no centro da laje – Equação 2.55 e 2.56:**

Entrando na Tabela presente no anexo A.2, com o valor de $w_c=0,85$, obtém-se os momentos fletores por unidade de comprimento: $M_x=57,6 \text{ kN/m}$ e $M_y=44,9 \text{ kN/m}$.

$$M_x = 0,001 \cdot m_x \cdot pl_x^2$$

$$M_x = 0,001 \cdot 57,6 \cdot 5,805 \cdot 11^2$$

$$M_x = 40,45 \text{ kN/m}$$

$$M_y = 0,001 \cdot m_y \cdot pl_x^2$$

$$M_y = 0,001 \cdot 44,9 \cdot 5,805 \cdot 11^2$$

$$M_y = 31,53 \text{ kN/m}$$

- **Momentos fletores correspondentes a cada nervura – Equação 2.57 e 2.58:**

$$M_x = b \cdot M_x$$

$$M_x = 0,8 \cdot 40,45$$

$$M_x = 32,36 \text{ kN/m}$$

$$M_y = h \cdot M_y$$

$$M_y = 0,8 \cdot 31,53$$

$$M_y = 25,22 \text{ kN/m}$$

Dimensionado seção T para M_x :

Equação 2.17 – Cálculo da Altura útil

Obs: Usa-se o maior valor do momento, neste caso m_x

$$d_{\min} = 2 \cdot \left(\sqrt{\frac{M_d}{B_w \cdot f_{cd}}} \right)$$

$$d_{\min} = 2 \cdot \left(\sqrt{\frac{32,36 \cdot 1,4}{0,1 \cdot \frac{25000}{1,4}}} \right)$$

$$d_{\min} = 0,3185 \text{ m adota-se } 32 \text{ cm}$$

- **Cálculo do KMD – Equação 2.59:**

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

$$\text{KMD} = \frac{1,4 \cdot 32,36}{0,1 \cdot 0,32^2 \cdot \frac{25000}{1,4}}$$

$$\text{KMD} = 0,247 - \text{Adotar } \text{KMD} = 0,250$$

Entrando na Tabela presente em Anexo A.6, a partir do valor de KMD, encontra-se o **KZ = 0,821**.

- **Cálculo da armadura – Equação 2.60:**

$$A_s = \frac{M_d}{KZ \cdot d \cdot f_{yd}}$$

$$A_s = \frac{1,4 \cdot 32,36}{0,876 \cdot 0,32 \cdot \frac{50}{1,15}}$$

$$A_s = 3,97 \text{ m/cm}$$

Dimensionando a seção T para M_y :

- **Cálculo do KMD:**

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

$$\text{KMD} = \frac{1,4 \cdot 25,22}{0,1 \cdot 0,32^2 \cdot \frac{25000}{1,4}}$$

$$\text{KMD} = 0,193 - \text{Adotar } \text{KMD} = 0,195$$

Entrando na Tabela presente no Anexo A.6, a partir do valor de KMD, encontra-se o **KZ = 0,868**.

- **Cálculo da armadura:**

$$A_s = \frac{M_d}{KZ. d. f_{yd}}$$
$$A_s = \frac{1,4 \cdot 25,22}{0,906 \cdot 0,32 \cdot \frac{50}{1,15}}$$
$$A_s = 3,09 \text{ m/cm}$$

ANEXO A – TABELAS USADAS NOS CÁLCULOS DO DIMENSIONAMENTO

Tabela A.1 - Coeficientes α para cálculos de flechas elásticas em lajes retangulares submetidas a carregamento uniformemente distribuído

λ	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	3,42	2,21	2,21	1,81	1,81	1,46
10,5	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	4,22	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	11,68	10,68	5,66	5,39	9,72	2,91	5,19	2,91	2,91
∞	15,35	15,35	6,38	6,38	15,35	3,07	6,38	3,07	3,07

Fonte: CARVALHO; FILHO, 2016.

Tabela A.2 – Laje retangular simplesmente apoiada no contorno com carga uniformemente distribuída.

l_x/l_y	w_c	m_x	m_y	m_{xy}	r_x	r_y	β_x	β_y
0,50	10,13	100,0	36,7	52,8	269	366	1,00	0,73
0,55	9,38	93,4	38,8	51,8	268	353	1,00	0,72
0,60	8,65	86,9	40,7	50,6	267	340	1,00	0,70
0,65	7,94	80,5	42,3	49,4	266	326	0,97	0,69
0,70	7,26	74,3	43,5	47,9	265	315	0,91	0,68
0,75	6,62	68,9	44,2	46,3	263	303	0,85	0,68
0,80	6,03	62,7	44,6	44,6	261	291	0,81	0,67
0,85	5,48	57,6	44,9	42,8	259	281	0,78	0,68
0,90	4,98	52,8	45,0	41,0	256	270	0,75	0,69
0,95	4,51	48,3	44,7	39,1	253	260	0,72	0,70
1,00	4,06	44,2	44,2	37,1	250	250	0,71	0,71

l_x/l_y	w_c	m_x	m_y	m_{xy}	r_x	r_y	β_x	β_y
1,00	4,06	44,2	44,2	37,1	250	250	0,71	0,71
0,95	4,51	44,7	48,3	39,1	260	253	0,70	0,72
0,90	4,98	45,0	52,8	41,0	270	256	0,69	0,75
0,85	5,48	44,9	57,6	42,8	281	259	0,68	0,78
0,80	6,03	44,6	62,7	44,6	291	261	0,67	0,81
0,75	6,62	44,2	68,3	46,3	303	263	0,68	0,85
0,70	7,26	43,5	74,3	47,9	315	265	0,68	0,91
0,65	7,94	42,3	80,5	49,4	326	266	0,69	0,97
0,60	8,65	40,7	86,9	50,6	340	267	0,70	1,00
0,55	9,38	38,8	93,4	51,8	353	268	0,72	1,00
0,50	10,13	36,7	100,0	52,8	366	269	0,73	1,00

Fonte: ARAÚJO, 2014.

Tabela A.3 – Coeficientes μ_x , μ_y , μ_x' e μ_y' para cálculo dos momentos máximos em lajes retangulares uniformemente carregadas. (casos 1, 2 e 3).

Λ	Caso 1		Caso 2			Caso 3		
	μ_x	μ_y	μ_x	μ_y	μ_y'	μ_x	μ_x'	μ_y
1,00	4,41	4,41	3,07	3,66	8,40	3,94	8,52	2,91
1,05	4,80	4,45	3,42	3,78	8,19	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
1,85	9,45	3,83	8,22	3,97	12,03	6,38	12,14	1,64
1,90	9,63	3,75	8,74	3,94	12,14	6,43	12,24	1,59
1,95	9,77	3,71	8,97	3,88	12,17	6,47	12,29	1,54
2,00	10,00	3,64	9,18	3,80	12,20	6,51	12,34	1,48
∞	12,57	3,77	9,18	3,80	12,20	7,61	12,76	1,48

Fonte: CARVALHO; FILHO, 2017.

Tabela A.4 - Valores de ψ_2 utilizados no pré-dimensionamento da altura das lajes.

λ	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9
1,00	1,50	1,70	1,70	1,80	1,90	1,90	2,00	2,00	2,20
1,05	1,48	1,67	1,69	1,78	1,87	1,89	1,97	1,99	2,18
1,10	1,46	1,64	1,67	1,76	1,83	1,88	1,94	1,97	2,15
1,15	1,44	1,61	1,66	1,74	1,80	1,87	1,91	1,96	2,13
1,20	1,42	1,58	1,64	1,72	1,76	1,86	1,88	1,94	2,10
1,25	1,40	1,55	1,63	1,70	1,73	1,85	1,85	1,93	2,08
1,30	1,38	1,52	1,61	1,68	1,69	1,84	1,82	1,91	2,05
1,35	1,36	1,49	1,60	1,66	1,66	1,83	1,79	1,90	2,03
1,40	1,34	1,46	1,58	1,64	1,62	1,82	1,76	1,88	2,00
1,45	1,32	1,43	1,57	1,62	1,59	1,81	1,73	1,87	1,98
1,50	1,30	1,40	1,55	1,60	1,55	1,80	1,70	1,85	1,95
1,55	1,28	1,37	1,54	1,58	1,52	1,79	1,67	1,84	1,93
1,60	1,26	1,34	1,52	1,56	1,48	1,78	1,64	1,82	1,90
1,65	1,24	1,31	1,51	1,54	1,45	1,77	1,61	1,81	1,88
1,70	1,22	1,28	1,49	1,52	1,41	1,76	1,58	1,79	1,85
1,75	1,20	1,25	1,48	1,50	1,38	1,75	1,55	1,78	1,83
1,80	1,18	1,22	1,46	1,48	1,34	1,74	1,52	1,76	1,80
1,85	1,16	1,19	1,45	1,46	1,31	1,73	1,49	1,75	1,78
1,90	1,14	1,16	1,43	1,44	1,27	1,72	1,46	1,73	1,75
1,95	1,12	1,13	1,42	1,42	1,24	1,71	1,43	1,72	1,73
2,00	1,10	1,10	1,40	1,40	1,20	1,70	1,40	1,70	1,70

Fonte: CARVALHO; FILHO, 2016.

Tabela A.5 – Valores de ψ_3 utilizados no pré – dimensionamento da altura das lajes.

Aço	Vigas e lajes nervuradas	Lajes maciças
CA – 25	25	35
CA – 32	22	33
CA – 40	20	30
CA – 50	17	25
CA - 60	15	20

Fonte: CARVALHO; FILHO, 2016.

Tabela A.6 – Valores para cálculo de armadura longitudinal de seções retangulares para concretos até classe C50.

KMD	KX	KZ	ϵ_c	ϵ_s
0,0100	0,0148	0,9941	0,1502	10,000
0,0200	0,0298	0,9881	0,3068	10,000
0,0300	0,0449	0,9820	0,4704	10,000
0,0400	0,0603	0,9759	0,6414	10,000
0,0500	0,0758	0,9697	0,8205	10,000
0,0550	0,0836	0,9665	0,9133	10,000
0,0600	0,0916	0,9634	1,0083	10,000
0,0650	0,0995	0,9602	1,1056	10,000
0,0700	0,1076	0,9570	1,2054	10,000
0,0750	0,1156	0,9537	1,3077	10,000
0,0800	0,1238	0,9505	1,4126	10,000
0,0850	0,1320	0,9472	1,5203	10,000
0,0900	0,1403	0,9439	1,6308	10,000
0,0950	0,1485	0,9406	1,7444	10,000
0,1000	0,1569	0,9372	1,8611	10,000
0,1050	0,1654	0,9339	1,9810	10,000
0,1100	0,1739	0,9305	2,1044	10,000
0,1150	0,1824	0,9270	2,2314	10,000
0,1200	0,1911	0,9236	2,3621	10,000
0,1250	0,1998	0,9201	2,4967	10,000
0,1300	0,2086	0,9166	2,6355	10,000
0,1350	0,2175	0,9130	2,7786	10,000
0,1400	0,2264	0,9094	2,9263	10,000
0,1450	0,2354	0,9058	3,0787	10,000
0,1500	0,2245	0,9022	3,2363	10,000
0,1550	0,2536	0,8985	3,3391	10,000
0,1600	0,2630	0,8948	3,5000	9,8104
0,1650	0,2723	0,8911	3,5000	9,3531
0,1700	0,2818	0,8873	3,5000	8,9222
0,1750	0,2913	0,8835	3,5000	8,5154
0,1800	0,3009	0,8796	3,5000	8,3106
0,1850	0,3106	0,8757	3,5000	7,7662

0,1900	0,3205	0,8718	3,5000	7,4204
0,1950	0,3305	0,8678	3,5000	7,0919
0,2000	0,3405	0,8638	3,5000	6,7793
0,2050	0,3506	0,8597	3,5000	6,4814
0,2100	0,3609	0,8556	3,5000	6,1971
0,2150	0,3714	0,8515	3,5000	5,9255
0,2200	0,3819	0,8473	3,5000	5,6658
0,2250	0,3925	0,8430	3,5000	5,4170
0,2300	0,4033	0,8387	3,5000	5,1785
0,2350	0,4143	0,8343	3,5000	4,9496
0,2400	0,4253	0,8299	3,5000	4,7297
0,2450	0,4365	0,8254	3,5000	4,5181
0,2500	0,4479	0,8208	3,5000	4,3144
0,2509	0,4500	0,8200	3,5000	4,2778

Fonte: CARVALHO; FILHO, 2016.

Tabela A.7 – Valores do coeficiente ξ em função do tempo

Tempo (t) meses	0	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40	≥ 70
Coeficiente $\xi(t)$	0	0,54	0,68	0,84	0,95	1,04	1,12	1,36	1,64	1,89	2

Fonte: NBR 6118 ABNT, 2014.