

UNIEVANGÉLICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RAFAELA LARISSA RODRIGUES PEREIRA

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

ANÁPOLIS / GO

2017

RAFAELA LARISSA RODRIGUES PEREIRA

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

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

ORIENTADOR: PAULO ALEXANDRE DE OLIVEIRA

ANÁPOLIS / GO: 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

PEREIRA, RAFAELA LARISSA RODRIGUES.

Análise comparativa entre lajes maciças convencionais e lajes nervuradas.
103, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2017).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

1. Estruturas

2. Concreto Armado

3. Lajes

4. Análise estrutural

I. ENC/UNI

II. Análise comparativa entre lajes maciças convencionais e lajes

nervuradas

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PEREIRA, Rafaela Larissa Rodrigues. Análise comparativa entre lajes maciças convencionais e lajes nervuradas. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 103p. 2017.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Rafaela Larissa Rodrigues Pereira

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

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2017

É concedida à UniEvangélica 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.

Rafaela Larissa R. Pereira

Rafaela Larissa R. Pereira

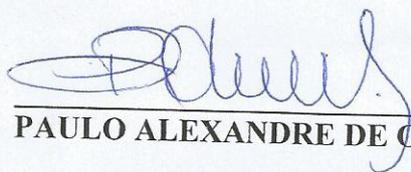
E-mail: rafaellarissa18@gmail.com

RAFAELA LARISSA RODRIGUES PEREIRA

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

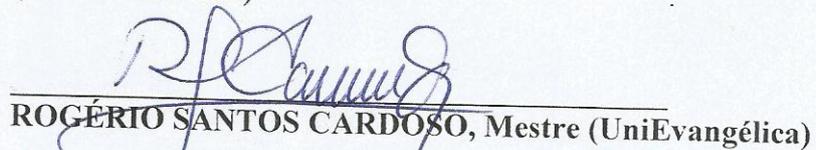
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

APROVADO POR:



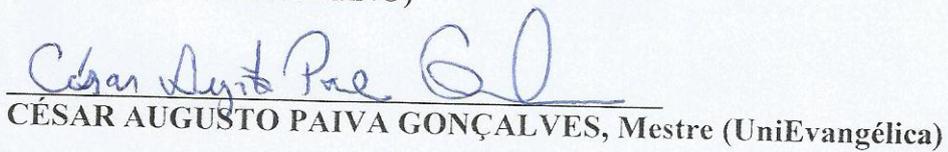
PAULO ALEXANDRE DE OLIVEIRA, Mestre (UniEvangélica)

(ORIENTADOR)



ROGÉRIO SANTOS CARDOSO, Mestre (UniEvangélica)

(EXAMINADOR INTERNO)



CÉSAR AUGUSTO PAIVA GONÇALVES, Mestre (UniEvangélica)

(EXAMINADOR INTERNO)

DATA: ANÁPOLIS/GO, 27 de Novembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e sempre a Deus toda honra e toda glória. Foi Ele quem me capacitou para chegar até aqui e cuidou de cada detalhe para que tudo saísse perfeitamente bem.

Agradeço a minha família por ter me apoiado em cada momento de decisão difícil e por ter acreditado que eu era capaz até mesmo quando eu duvidei.

Aos meus amigos agradeço pela compreensão a me ver sem paciência com tanta tensão sendo vivenciada nesses dias complicados.

Agradeço aos Professores Robson Félix e Paulo Alexandre por terem aceitado a missão de me orientar, me ajudando até mesmo quando eu pensei em desistir.

Agradeço a todos os professores que já lecionaram durante o curso, cada um deles compartilhou aprendizados a serem levados por toda a vida.

Aos meus colegas de classe agradeço por caminharem junto comigo, por cada momento de estudo e trabalhos feitos.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“É Deus quem efetua em vocês tanto o querer quanto o realizar, de acordo com a boa vontade dele.” (Filipenses 2:13)

RESUMO

As lajes são estruturas planas feitas de concreto e aço que apesar de parecerem simples são pesadas e consomem bastantes materiais. Pensando nisso, a partir das lajes maciças foram idealizadas e criadas as lajes nervuradas, que têm como intuito reduzir o peso estrutural da edificação e economizar na execução do projeto, sem que isso prejudique a segurança e eficiência da estrutura. Por relacionar o crescimento da economia do País ao avanço da construção civil, muitos dos engenheiros buscam inovar e economizar na realização de uma obra. De acordo com isso, este trabalho apresenta segundo a NBR 6118, o passo a passo do dimensionamento para as lajes maciças e para as lajes nervuradas, apresentando ainda um modelo para o detalhamento utilizando as duas lajes. Ao final sabe-se que a laje nervurada é a mais adequada para o projeto, por ser mais econômica e por resistir a maiores cargas distribuídas.

PALAVRAS-CHAVE:

Concreto armado; Lajes; Estrutura; Armadura de aço; Cisalhamento.

ABSTRACT

The slabs are flat structures made of concrete and steel that although they seem simple are heavy and consume enough materials. Thinking of this, from the massive slabs were created and created ribbed slabs, whose purpose is to reduce the structural weight of the building and save on the execution of the project, without this damaging the safety and efficiency of the structure. By relating the growth of the country's economy to the advance of civil construction, many engineers seek to innovate and save on the performance of a work. According to this, this work presents, according to NBR 6118, the step-by-step dimensioning for the solid slabs and for the ribbed slabs, also presenting a model for the detailing using the two slabs. At the end it is known that the ribbed slab is the most suitable for the project, because it is more economical and because it withstands higher distributed loads.

KEYWORDS:

Reinforced Concrete; Lajes; Structure; Steel armature; Shearing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Laje maciça apoiada sobre vigas.....	17
Figura 2 - Funções estruturais das lajes. (a) Laje funcionando como placa e (b) Laje funcionando como chapa.....	18
Figura 3 - Vãos da laje retangular armada em uma direção.....	19
Figura 4 - Vãos da laje retangular armada em duas direções.....	19
Figura 5 – Representação dos tipos de apoio.....	20
Figura 6 - Casos de Vinculação das Lajes.....	20
Figura 7 - Distanciador de plástico.....	22
Figura 8 - Distanciador tipo cadeirinha de aço.....	23
Figura 9 - Distanciador de concreto.....	23
Figura 10 - Altura útil, altura da laje e cobrimento.....	25
Figura 11 - Parede paralela ao menor vão da laje.....	29
Figura 12 - Parede perpendicular ao menor vão da laje.....	30
Figura 13 – Laje Nervurada.....	34
Figura 14 – Laje nervurada normal com as células aparentes.....	35
Figura 15 – Fôrmas de plástico.....	36
Figura 16 – Moldes plásticos para execução de lajes nervuradas e esquema de escoramento.....	36
Figura 17 – Laje nervurada normal com as células não aparente.....	37
Figura 18 – Laje nervurada invertida.....	37
Figura 19 – Escoramento metálico e cubetas plásticas.....	38
Figura 20 – Armação.....	39
Figura 21 – Concretagem.....	40
Figura 22 – Vibração nas nervuras.....	40
Figura 23 – Cura do concreto.....	41
Figura 24 – Reescoramento da laje nervurada.....	41
Figura 25 – Vigotas pré-moldadas.....	42
Figura 26 – Laje tipo pré-fabricada.....	43
Figura 27 – Laje treliça.....	43
Figura 28 – Esquema de apoios: (A) laje cogumelo e (B) laje lisa.....	44
Figura 29 – Laje nervurada cogumelo.....	44
Figura 30 – Lajes nervuradas com bordas simplesmente apoiadas.....	45

Figura 31 – Vãos efetivos. a) apoio de vão extremo e b) apoio de vão intermediário	46
Figura 32 – Representativo de algumas dessas recomendações.....	47
Figura 33 – Esforços solicitantes em uma grelha	49
Figura 34 – Pavimento tipo em cm.....	51
Figura 35 – Esquema estrutural das lajes do pavimento	52
Figura 36 – Condições de apoio para lajes 1D	59
Figura 37 – Detalhamento da armadura do pavimento em cm.....	70
Figura 38 – Seção transversal adotada para a laje nervurada	76
Figura 39 – Largura da mesa colaborante	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores ψ_2 utilizados no pré-dimensionamento da altura das lajes	24
Quadro 2 – Valores de ψ_3 utilizados no pré-dimensionamento da altura das lajes	25
Quadro 3 – Coeficientes α para cálculo de flechas em lajes com carregamento distribuído ...	32
Quadro 4 – Classificação das lajes	52
Quadro 5 – Cálculo dos valores do pré-dimensionamento.....	53
Quadro 6 – Cálculo dos valores-limite para as flechas das lajes.....	55
Quadro 7 – Cálculo dos valores das flechas das lajes	57
Quadro 8 – Cálculo dos momentos máximos em kNm/m.....	60
Quadro 9 – Cálculo dos momentos finais em kNm/m.....	61
Quadro 10 – Cálculos para área de aço cm ² /m	64
Quadro 11 – Valores para as barras principais e secundárias.....	65
Quadro 12 – Quantidade de barras N	70
Quadro 13 – Cálculo das reações das lajes nas vigas em kN/m.....	71
Quadro 14 – Volume de concreto necessário para a laje maciça	74
Quadro 15 – Valores da largura colaborante (b_f)	78
Quadro 16 – Cálculo dos momentos máximos em kNm/nervura.....	79
Quadro 17 – Cálculo da posição da linha neutra	79
Quadro 18 – Valores da área de aço em cm ² /nervura.....	80
Quadro 19 – Volume de concreto necessário para a laje nervurada.....	84
Quadro 20 - Coeficientes μ_x , μ_y , μ'_x e μ'_y para o cálculo dos momentos máximos em lajes retangulares uniformemente carregadas (Casos 1, 2 e 3)	96
Quadro 21 – Coeficientes μ_x , μ_y , μ'_x e μ'_y para o cálculo dos momentos máximos em lajes retangulares uniformemente carregadas (Casos 4, 5 e 6)	97
Quadro 22 – Coeficientes μ_x , μ_y , μ'_x e μ'_y para o cálculo dos momentos máximos em lajes retangulares uniformemente carregadas (Casos 7, 8 e 9)	98
Quadro 23 – Coeficientes k_x , k_y , k'_x e k'_y para o cálculo das reações nas vigas de apoio de em lajes retangulares uniformemente carregadas (Casos 1, 2 e 3).....	99
Quadro 24 – Coeficientes k_x , k_y , k'_x e k'_y para o cálculo das reações nas vigas de apoio de em lajes retangulares uniformemente carregadas (Casos 4, 5 e 6).....	100
Quadro 25 – Coeficientes k_x , k_y , k'_x e k'_y para o cálculo das reações nas vigas de apoio de em lajes retangulares uniformemente carregadas (Casos 7, 8 e 9).....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental	21
Tabela 2 – Correlação entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10 \text{ mm}$	22
Tabela 3- Peso específico dos materiais de construção	90
Tabela 4- Valores mínimos das cargas verticais	91
Tabela 5 – Área de aço para relação espaçamento/bitola (cm^2/m)	93
Tabela 6 – Valores de $\rho_{\text{mín}}$ (%)	94
Tabela 7 – Tabela de dimensionamento de seção retangular com diagrama retangular de acordo com a NBR 6118	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ELS	Estado de Deformação Excessiva
ELU	Estado Limite Último
LM	Laje Maciça
LN	Laje Nervurada
NBR	Norma Brasileira
V_{CLM}	Volume de concreto na laje maciça
V_{CLN}	Volume de concreto na laje nervurada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 JUSTIFICATIVA.....	15
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 METODOLOGIA	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2 LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO.....	17
2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS LAJES QUANTO À DIREÇÃO DA ARMADURA PRINCIPAL	18
2.2 CONDIÇÕES DE APOIO	20
2.3 COBRIMENTOS MÍNIMOS	21
2.4 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DA ALTURA ÚTIL E ESPESSURA.....	23
2.5 AÇÕES PERMANENTES	25
2.5.1 Peso Próprio.....	26
2.5.2 Revestimentos	26
2.5.2.1 Contrapiso	26
2.5.2.2 Revestimento do Teto	27
2.5.2.3 Piso.....	27
2.5.3 Paredes	28
2.5.3.1 Laje Armada em Duas Direções (2D).....	28
2.5.3.2 Laje Armada em Uma Direção (1D).....	29
2.6 AÇÕES VARIÁVEIS	30
2.6.1 Carga Acidental.....	31
2.7 ESTADOS LIMITES PARA DIMENSIONAMENTO.....	31
2.7.1 Flechas	32
2.8 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA LAJE MACIÇA.....	33
3 LAJES NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO.....	34
3.1 TIPOLOGIA DAS LAJES NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO.....	35
3.1.1 Lajes nervuradas moldadas no local	35
3.1.1.1 Processo de execução.....	38
3.1.1.1.1 Montagem do escoramento e das fôrmas	38

3.1.1.1.2	Colocação das armaduras	39
3.1.1.1.3	Lançamento do concreto	39
3.1.1.1.4	Cura do concreto	40
3.1.1.1.5	Desenforma	41
3.1.2	Lajes nervuradas Pré-Moldadas	42
3.1.3	Lajes cogumelo	44
3.2	VINCULAÇÃO DAS LAJES NERVURADAS	45
3.3	VÃO EFETIVO	46
3.4	PRÉ DIMENSIONAMENTO	47
3.5	AÇÕES ATUANTES	48
3.6	COMPORTAMENTO ESTÁTICO	49
3.7	VANTAGENS E DESVANTES DAS LAJES NERVURADAS.....	50
4	APRESENTAÇÃO DO PAVIMENTO TIPO PARA LAJES MACIÇAS	51
4.1	DIMENSIONAMENTO PARA LAJES MACIÇAS.....	51
4.1.1	Esquema estrutural	52
4.1.2	Classificação das lajes	52
4.1.3	Pré-dimensionamento da altura útil e espessura.....	53
4.1.4	Determinação das cargas atuantes.....	53
4.1.5	Verificação das flechas.....	55
4.1.6	Cálculo dos momentos fletores.....	58
4.1.7	Cálculo das armaduras longitudinais.....	62
4.1.8	Detalhamento da armadura segundo NBR 6118/14.....	64
4.1.9	Reações das lajes nas vigas, segundo Carvalho (2012).....	71
4.1.10	Verificação quanto ao cisalhamento	72
4.1.11	Volume de concreto (m³).....	73
5	DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO TIPO PARA LAJES NERVURADAS..	75
5.1	PARA LAJES NERVURADAS	75
5.1.1	Esquema estrutural e direção das nervuras das lajes	75
5.1.2	Pré-dimensionamento	75
5.1.3	Vãos efetivos.....	76
5.1.4	Determinação das cargas atuantes.....	76
5.1.5	Cálculo da armadura longitudinal (ELU).....	77
5.1.6	Verificação do estado de deformação excessiva (ELS-DEF).....	80
5.1.7	Cálculo da armadura de cisalhamento	82

5.1.8	Volume de concreto (m³)	83
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
	REFERÊNCIAS	87
	ANEXO A - Tabelas	90
	ANEXO B - Quadros	96

1 INTRODUÇÃO

A primeira laje em concreto armado foi patenteada em 1854 pelo inglês William Boutland Wilkinson (1819-1902), fabricante de gesso e argamassa. Sua patente foi classificada como “melhorias na construção à prova de fogo em moradias, armazéns e outros edifícios” e é a descrição mais antiga em termos de utilização efetiva do concreto armado em estruturas de edificações.

As lajes são estruturas planas (placas), geralmente horizontais feitas de concreto e aço, e apresentam uma espessura menor que as demais. São apoiadas em vigas que ao receber o carregamento das lajes, os transferem para os pilares até chegar às fundações. As lajes podem ser maciças ou moldadas in loco, pré-moldadas e mistas. As concretadas no local, conhecidas como lajes maciças de concreto armado podem ser classificadas como: convencionais, cogumelo, nervuradas, duplas e entre outras. Porém as mais básicas são as maciças convencionais e nervuradas.

Um dos grandes setores da economia é a construção civil e devido a isso muitos procuram economizar na realização de uma obra, optando por estruturas mais econômicas de acordo com o projeto feito. Além disso, a busca da redução do peso dos materiais e também de custos na execução do projeto, uma boa opção é se optar por uma laje mais leve, mas sem que isso prejudique a eficiência da segurança estrutural.

De acordo com o Portal Planalto, o presidente da Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias (Abrainc), Rubens Menin (2017) declarou que não existe crescimento econômico no Brasil sem o crescimento da indústria da construção civil. O setor da construção representa 8% do PIB e é o que mais emprega. Devido a isso terá um impacto muito grande na economia, no desenvolvimento social e evidentemente no emprego.

Atualmente o meio construtivo vem passando por constantes mudanças, o fator qualidade é exigente e por isso ditou tantas normas no meio da construção. As lajes de uma edificação geralmente são a parte da estrutura que mais consomem materiais em relação às demais. O custo da obra é importante, e o consumidor é valorizado e ouvido em suas escolhas, por isso é recomendável ficar atento a novas tendências e atualizações, assim como o uso de lajes nervuradas que reduz o consumo de concreto.

Estas lajes vieram de uma evolução natural da laje maciça, resultante da eliminação de uma parte do concreto abaixo da linha neutra, permitindo uma maior economia. As lajes nervuradas foram idealizadas para ter um alívio no peso próprio da estrutura, inicialmente

eram feitas com fôrmas de madeiras, depois com fibra de vidro, mas para a sua execução, deve-se consultar qual fôrma atenderá a demanda do projeto. Entretanto, a laje nervurada não é uma invenção moderna, já que foi retratada no quadro da Santa Ceia pelo pintor Leonardo da Vinci em 1498.

1.1 JUSTIFICATIVA

Mesmo com a crise significativa que o País está enfrentando, o setor da construção civil está reaquentando mais uma vez, por isso a busca por profissionais mais capacitados também estão em alta. E alguns dos critérios para que essa escolha seja bem sucedida são a eficiência e o custo do projeto das estruturas, tendo em vista uma redução nos gastos.

Devido ao avanço tecnológico nota-se que existem estruturas mais viáveis, e tendo em mente a maior economia possível, uma das soluções é optar por essas estruturas, como a laje, que pode ter uma influência nas despesas da obra. A escolha da laje em uma construção ainda pode gerar dúvidas ao se perguntar qual utilizar, para isso devem ser levados em conta alguns critérios na pesquisa.

Outro aspecto importante é o impacto ambiental na escolha do tipo de laje. A opção ecologicamente mais correta levando em consideração a reutilização de materiais preserva o meio ambiente e desonera os custos para o construtor

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 **Objetivo geral**

A pesquisa tem como objetivo contribuir na decisão entre a laje nervurada e a laje maciça convencional em uma obra, por meio da análise comparativa entre as mesmas. Especificando quais as vantagens e as desvantagens de cada laje segundo o seu peso estrutural e orçamento, utilizando normas técnicas e análises, levando em conta as exigências do usuário.

1.2.2 Objetivos específicos

Através das normas técnicas é possível fazer uma análise comparativa, cujos principais objetivos são:

- Dimensionar e detalhar um pavimento tipo com laje maciça;
- Dimensionar e detalhar um pavimento tipo com laje nervurada;
- Comparar o pavimento tipo considerando o consumo de materiais;
- Apresentar as vantagens e desvantagens de cada laje apresentada.

1.3 METODOLOGIA

Para a realização desta pesquisa foram utilizadas normas técnicas, livros sobre o concreto armado, artigos, teses e dissertações sobre o assunto em pauta: lajes nervuradas e maciças. Além de pesquisas em sites na internet e livros para a construção do referencial teórico, normas para o dimensionamento de lajes.

Após o referencial teórico, é feito um dimensionamento de projeto das lajes, utilizando as normas técnicas, procurando saber qual laje melhor atenderá à demanda do projeto estrutural.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 deste trabalho apresenta a introdução juntamente com os objetivos para tal pesquisa.

O Capítulo 2 traz o referencial teórico bibliográfico sobre as lajes maciças e parte do seu dimensionamento até o estado limite.

O Capítulo 3 traz o referencial sobre as lajes nervuradas e parte do seu dimensionamento a partir dos esforços solicitantes.

O Capítulo 4 apresenta o exemplo do pavimento tipo e o dimensionamento para lajes maciças.

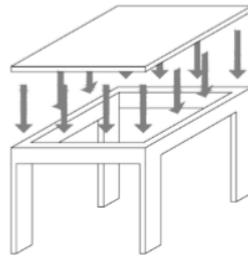
O Capítulo 5 utiliza o mesmo pavimento tipo e traz o dimensionamento para as lajes nervuradas.

O Capítulo 6 apresenta as considerações finais para este trabalho.

2 LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO

Segundo Lopes (2012) as lajes maciças de concreto armado são executadas totalmente na obra, compostas por concreto, contendo armaduras longitudinais e eventualmente transversais, são apoiadas em vigas ou paredes ao longo das bordas.

Figura 1 – Laje maciça apoiada sobre vigas



Fonte: Lopes, 2012.

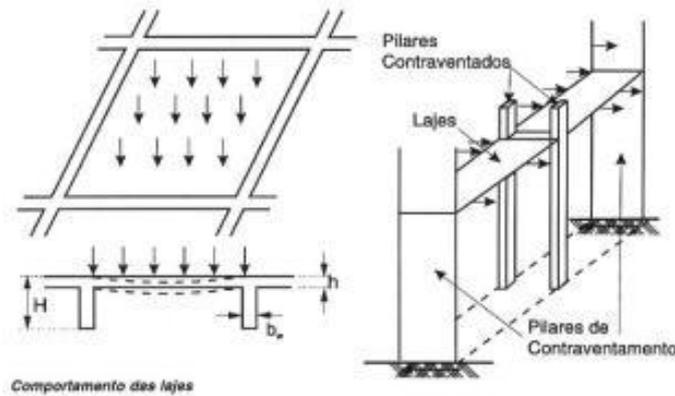
São placas de espessura uniforme e de acordo com o item 13.2.4.1 da NBR 6118/14 (ABNT, 2014), para as lajes maciças devem ser adotados os seguintes limites mínimos para a espessura:

- 7 cm para lajes de cobertura não em balanço;
- 8 cm para lajes de piso não em balanço;
- 10 cm para lajes em balanço;
- 10 cm para lajes que suportem veículos com peso menor ou igual a 30 kN;
- 12 cm para lajes que suportem veículos com peso maior que 30 kN;
- 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, sendo $\frac{l}{42}$ para lajes de piso biapoiadas e $\frac{l}{50}$ para lajes de piso contínuas;
- 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo fora do capitel.

A principal função das lajes é receber os carregamentos atuantes no andar como móveis, pessoas e equipamentos atuando como chapas e transferindo esses carregamentos para os apoios (pilares); e podem atuar como placas ao suportarem cargas verticais ao longo do piso. As lajes podem ser subjugadas como elementos estruturais bidimensionais que têm a dupla função de resistir aos esforços normais que atuam perpendicularmente ao seu plano

principal e aos esforços tangenciais que atuam paralelamente a este plano, conforme a Figura 1 ilustra.

Figura 2 - Funções estruturais das lajes. (a) Laje funcionando como placa e (b) Laje funcionando como chapa



Fonte: Franca e Fusco, 1997.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS LAJES QUANTO À DIREÇÃO DA ARMADURA PRINCIPAL

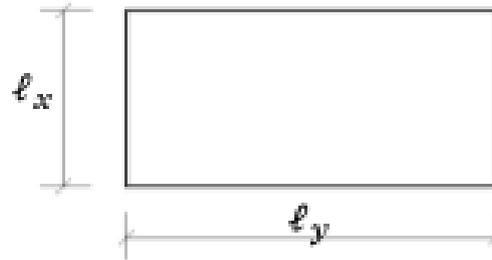
Em um projeto de lajes o primeiro passo é a determinação dos vãos livres (l_0), vãos teóricos (l) e a relação entre os vãos teóricos.

A classificação das lajes quanto à direção da armadura principal se dá pela relação dos vãos teóricos, e é muito importante, podendo haver dois casos: laje armada em uma direção e laje armada em duas direções.

As lajes armadas em uma direção são bem retangulares, com a relação entre o maior vão e o menor vão sendo superior a dois, representado pela Equação 1.

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} > 2 \quad \text{Eq. 1}$$

Figura 3 - Vãos da laje retangular armada em uma direção



Fonte: Lopes, 2012.

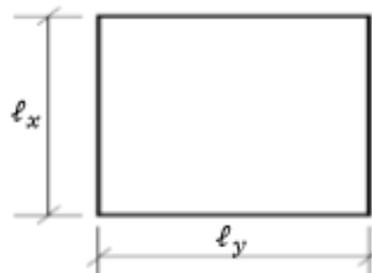
E para as lajes armadas em duas direções a relação entre o lado maior e o lado menor deve ser inferior ou igual a dois, como na Equação 2.

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} \leq 2 \quad \text{Eq. 2}$$

Onde: l_x = lado menor;

l_y = lado maior.

Figura 4 - Vãos da laje retangular armada em duas direções



Fonte: Lopes, 2012.

Nas lajes armadas em uma direção, os esforços solicitantes de maior grandeza ocorrem de acordo com a direção do menor vão, chamada de direção principal. Já na direção secundária, os esforços solicitantes são bem menores e, por isso, são frequentemente desprezados nos cálculos (BASTOS, 2005).

Já nas lajes armadas em duas direções os esforços solicitantes são importantes para as duas direções principais, calculando então as duas armaduras para suportar os momentos fletores nessas direções.

2.2 CONDIÇÕES DE APOIO

Para o cálculo dos esforços solicitantes e das alterações nas lajes é necessário estabelecer os vínculos das lajes com seus respectivos apoios, como apresentado na Figura 5, sejam eles pilares, vigas ou em balanço.

Figura 5 – Representação dos tipos de apoio

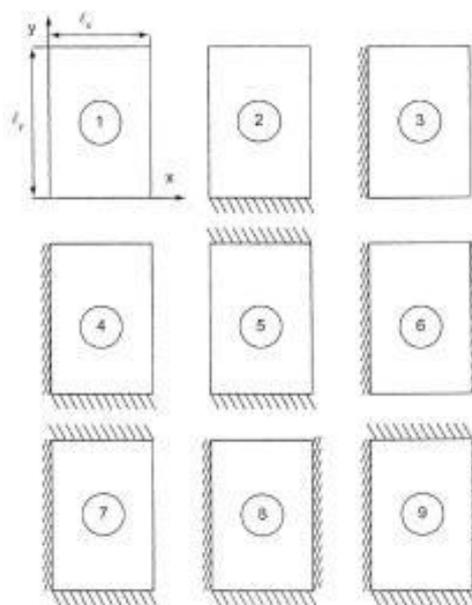
Borda livre	Borda simplesmente apoiada	Borda engastada
-----	—————	//////

Fonte: Pinheiro, 2010.

A borda livre representa a falta de apoio, apresentando deslocamentos verticais, enquanto as outras duas não possuem esse deslocamento. A borda simplesmente apoiada se dá pelo fato da laje não ter continuidade com uma laje vizinha. E a borda engastada é onde existe continuidade entre uma laje e outra, cujo movimento de rotação também é impedido.

Na figura 6 são apresentados alguns casos de vinculação entre lajes apoiadas e engastadas, sabendo-se que deve se levar em consideração os momentos atuantes nas bordas das lajes quando estas forem engastadas.

Figura 6 - Casos de Vinculação das Lajes



Fonte: Chust, 2012, p. 302.

2.3 COBRIMENTOS MÍNIMOS

As barras de aços precisam estar bem protegidas pelo concreto contra as agressões do meio ambiente, devido a isso o cobrimento mínimo é importante para garantir a segurança das armaduras. Quanto maior for a espessura da camada de concreto sobre o aço, maior será a sua proteção contra a corrosão.

Para isso a NBR 6118/14 (ABNT, 2014) estabelece requisitos de qualidade para estruturas de concreto, cujo cobrimento mínimo das armaduras está relacionado com a agressividade do ambiente onde a laje foi construída.

Tabela 1 – Classes de agressividade ambiental

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

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (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 protegidas 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: Tabela 6.1, NBR 6118/14(ABNT,2014).

A Tabela 1 apresenta as diferentes classes de agressividade, e em função dessas classes se dá o valor de cobrimento mínimo destacando o para as lajes, conforme na Tabela 2.

Tabela 2 – Correlação entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

Tipo e Componente de Estrutura	Classe de agressividade ambiental (Tabela 3)			
	I	II	III	IV**
	Cobrimento nominal (mm)			
Laje* de Concreto Armado	20	25	35	45

* Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete de madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos, e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas pelo item 7.4.7.5 (NBR 6118:2014) respeitando um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

** Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: Tabela 7.2, NBR 6118/14(ABNT,2014) – Adaptada.

O Δc apresentado nesta tabela é uma tolerância de execução que deve ser maior ou igual a 10 mm, acrescido no valor do cobrimento mínimo resultando no cobrimento nominal das armaduras.

Um recurso bastante utilizado na hora de fazer o cobrimento são os espaçadores (também conhecidos como distanciadores) que são fixados às armaduras para ajudar no posicionamento das mesmas no centro das fôrmas, podem ser de concreto ou plástico de alta densidade. O espaçador deve ser resistente às cargas para evitar deformações nele próprio, também não deve deixar caminhos para a entrada de ar e de água entre a superfície e a armadura. Segundo o engenheiro Egydio Hervé Neto, os espaçadores de plástico são os mais procurados no mercado devido a sua precisão geométrica, mas é importante que sejam posicionados de forma correta para evitar problemas. Para maior segurança é bom utilizar os espaçadores industrializados de concreto, pois apresentam resistência maior que o de plástico. A Figura 7, 8 e Figura 9 ilustram alguns tipos de distanciadores.

Figura 7 - Distanciador de plástico

Fonte: Equipe de Obra – Pini WEB.

Figura 8 - Distanciador tipo cadeirinha de aço



Fonte: Equipe de Obra – Pini WEB.

Figura 9 - Distanciador de concreto



Fonte: Equipe de Obra – Pini WEB¹

2.4 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DA ALTURA ÚTIL E ESPESSURA

A NBR 6118 (ABNT, 2014) não define critérios de pré-dimensionamento para lajes retangulares com bordas engastadas ou apoiadas, entretanto primeiramente calcula-se a estimativa da altura útil d (em cm) por meio da Equação 3:

$$d_{est} = (2,5 - 0,1n) \frac{l^*}{100} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde: n é o numero de bordas engastadas;

$$l^* \leq \left\{ \begin{array}{l} \text{menor vão}(lx) \\ 0,7 * \text{maior vão}(ly) \end{array} \right\}.$$

Com l^* , lx e ly em centímetros.

¹ Disponível em: <http://equipedebra.pini.com.br/construcao-reforma/45/artigo250451-2.aspx>; Acesso em maio de 2017.

Ainda para lajes retangulares maciças apoiadas ou em balanço é levado em consideração as possíveis condições de deformações-limite, sendo assim é utilizado o critério da NBR 6118 (ABNT,1978), para a Equação 4:

$$d_{est} = \frac{lx}{\psi_2\psi_3} \quad \text{Eq. 4}$$

Com d em metros, cujo coeficiente ψ_2 (Quadro 1), depende das dimensões da laje e condições de apoio; visto na Figura 6. E o coeficiente ψ_3 depende do tipo de aço (Quadro 2).

Quadro 1 – Valores ψ_2 utilizados no pré-dimensionamento da altura das lajes

λ^a	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9
1,00	1,5	1,7	1,7	1,8	1,90	1,9	2	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
1,2	1,42	1,58	1,64	1,72	1,76	1,86	1,88	1,94	2,10
1,25	1,4	1,55	1,63	1,7	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
1,5	1,3	1,4	1,55	1,6	1,55	1,8	1,7	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	1,2	1,25	1,48	1,5	1,38	1,75	1,55	1,78	1,83
1,8	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	1,1	1,1	1,40	1,4	1,20	1,7	1,4	1,70	1,70

^a É a relação entre o maior lado e o menor lado $\lambda = \frac{ly}{lx}$

Fonte: Elaborado pela autora com base em Chust, 2012, p. 309.

Quadro 2 – 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

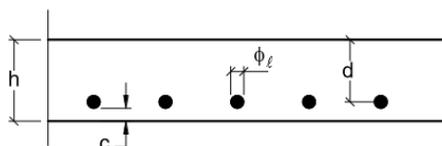
Fonte: Chust, 2012, p. 310.

Após o cálculo da altura útil fica simples calcular a altura h (espessura) da laje por meio da Equação 5:

$$h = d_{est} + c + 1,5\phi \quad \text{Eq. 5}$$

Onde: ϕ é o diâmetro da barra longitudinal da laje, podendo ser estimado inicialmente com 10 mm;

c é o cobrimento nominal determinado conforme a Tabela 2, porém em cm.

Figura 10 - Altura útil, altura da laje e cobrimento

Fonte: Prof. Dr. Paulo Sérgio dos Santos Bastos, 2015.

Como o valor calculado pela Equação 4 serve apenas de pré-dimensionamento, ou seja, é uma indicação, sempre será necessário verificar o estado-limite de deformação, conforme o item 19.3 da NBR 6118 (ABNT, 2014). Entretanto primeiramente devem-se calcular todas as cargas e ações que a estrutura pode vir a sofrer.

2.5 AÇÕES PERMANENTES

O item 4.2.1.1 da NBR 8681 (ABNT, 2003) considera as ações permanentes como os pesos próprios dos elementos da construção, cujos valores podem ser praticamente iguais por toda a vida útil da laje ou possam aumentar com o passar do tempo tendendo para um valor limite constante. Essas ações devem estar de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 6120 (ABNT, 1980).

2.5.1 Peso Próprio

O peso próprio da laje é o peso específico do concreto armado (γ_{conc}) que segundo a NBR 6120/80 (ABNT, 1980) seu valor é sempre 25 kN/m³; e é distribuído uniformemente em lajes maciças de espessura constante. O peso próprio se dá segundo a Equação 6:

$$g_{pp} = h * \gamma_{conc} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde: g_{pp} = peso próprio da laje em kN/m²;

h = altura da laje em metros.

2.5.2 Revestimentos

A laje pode ser revestida com diferentes materiais, isso só vai depender do projeto arquitetônico. A carga de cada tipo de revestimento é considerada individualmente na soma da carga total.

2.5.2.1 Contrapiso

De acordo com Lopes (2012), contrapiso é a camada de argamassa colocada sobre a superfície de concreto das lajes com o intuito de nivelar e diminuir a rugosidade da laje, preparando-a para receber o piso final. Também chamada de camada de regularização, a espessura do contrapiso não deve ser inferior a 3 cm e o peso específico (γ_{contr}) da argamassa é de 21kN/m³ para cimento e areia, segundo a NBR 6120/80 (ABNT, 1980), encontrada na Tabela 3 no Anexo A.

A ação permanente do contrapiso se dá em função da sua espessura, calculada na Equação 7:

$$g_{contr} = \gamma_{contr} * e \quad \text{Eq. 7}$$

Onde: g_{contr} é a carga permanente do contrapiso em kN/m²;

e = espessura do contrapiso em metros.

2.5.2.2 Revestimento do Teto

Na superfície inferior das lajes ou teto do pavimento inferior geralmente se aplica uma camada de argamassa menos rica em cimento sobre o chapisco. Para essa argamassa de cal, cimento e areia a NBR 6120/80 (ABNT, 1980) estabelece que o peso específico (γ_{rev}) seja de 19 kN/m³.

Usualmente este revestimento tem uma espessura pequena, porém não deve ser menor que 1,5 cm ou 2 cm. Esta ação permanente se dá por meio da Equação 8:

$$g_{rev.teto} = \gamma_{rev} * e \quad \text{Eq. 8}$$

Onde: $g_{rev.teto}$ é a carga permanente do revestimento do teto em kN/m²;

e = espessura do revestimento em metros.

2.5.2.3 Piso

O piso é o revestimento final na superfície superior da laje, fundamentado sobre o contrapiso. É necessário definir o tipo ou o material do qual o piso é composto para julgar a sua quantificação, normalmente é feito com a ajuda do projeto arquitetônico que designa o tipo de piso para cada ambiente da construção. Os mais comuns são os de madeira, cerâmica, carpetes, granito e mármore. A Tabela 3 no Anexo A fornece os pesos específicos (γ_{piso}) de vários materiais, estes que auxiliam no cálculo da carga do piso de acordo com a espessura do piso escolhido na Equação 9.

$$g_{piso} = \gamma_{piso} * e \quad \text{Eq. 9}$$

Onde: g_{piso} é a carga permanente do revestimento final em kN/m²;

e = espessura do piso em metros.

2.5.3 Paredes

A carga das paredes sobre as lajes é determinada em função de a laje ser armada em uma ou em duas direções. É preciso conhecer o tipo de alvenaria da parede, ou o seu peso específico, a altura e a sua espessura, assim como sua distribuição e extensão sobre a laje.

O peso específico da parede pode ser dado em função do peso total da parede, incluindo sua alvenaria, argamassa de assentamento e de revestimento, ou pelo peso específico de cada um dos materiais que a compõe.

2.5.3.1 Laje Armada em Duas Direções (2D)

Para as lajes armadas em duas direções considera-se simplificada a carga da parede uniformemente distribuída na área da laje, de acordo com as dimensões da parede em função do seu peso unitário dividido pela área da laje, representada na Equação 10:

$$g_{par} = \frac{(a + b)H * p'}{l1 * l2} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde: g_{par} é a carga uniforme da parede em kN/m²;

a e b são as dimensões (largura e comprimento) da parede;

H é a altura da parede em metros;

p' é o peso unitário da parede acabada em kN/m².

Para obter-se o valor de p' é necessário calcular os pesos específicos individuais da parede por metro quadrado de área como na Equação 11:

$$p' = (\gamma_{alv} * e_{alv}) + (\gamma_{arg} * e_{arg}) \quad \text{Eq. 11}$$

Onde: γ_{alv} é o peso específico da alvenaria em kN/m³;

e_{alv} é a espessura da alvenaria que resulta na espessura da parede em metros;

γ_{arg} é o peso específico da argamassa do revestimento em kN/m³;

e_{arg} é a espessura do revestimento considerando os dois lados da parede em metros.

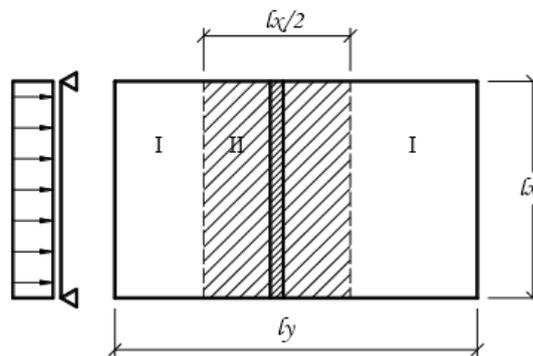
Os pesos específicos de cada elemento que compõe a parede estão na Tabela 3 no Anexo A. E para a espessura média dos revestimentos recomenda-se 2 cm nos dois lados da parede.

2.5.3.2 Laje Armada em Uma Direção (1D)

Para as lajes armadas em uma direção existem dois casos a serem analisados, que dependem da distribuição da parede sobre a laje.

Para parede paralela ao menor lado da laje como na Figura 11, considera-se simplificada a carga da parede distribuída uniformemente numa área da laje adjacente à parede, com largura de metade de l_x .

Figura 11 - Parede paralela ao menor vão da laje



Fonte: Bastos, 2015.

A laje fica com carregamentos diferentes nas regiões I e II. Na região I não se aplica a carga da parede, apenas na região II. Por isso dois cálculos para esforços solicitantes precisam ser feitos, onde para a região II se aplica a Equação 12:

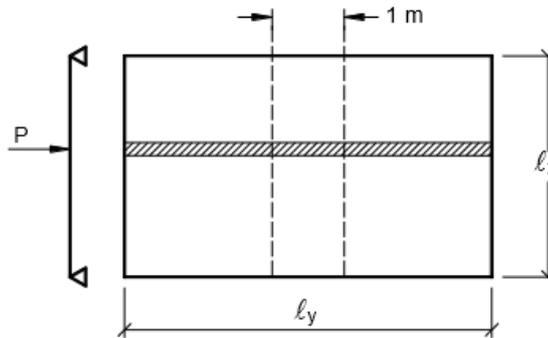
$$g_{par} = \frac{l * H * p'}{l_x * \frac{l_x}{2}} \quad \text{Eq. 12}$$

Onde: l é o comprimento da parede sobre laje;

l_x é o menor lado da laje.

No caso de parede perpendicular ao menor lado, a sua carga deve ser considerada como uma força concentrada sobre a viga, como na ilustrado Figura 12.

Figura 12 - Parede perpendicular ao menor vão da laje



Fonte: Bastos, 2015.

O valor da força concentrada P da parede sobre a laje, se dá pela Equação 13:

$$P_{par} = H * p' * 1 \quad \text{Eq. 13}$$

Onde: P_{par} é a força concentrada representativa da parede em kN;

H é a altura da parede em metro;

p' é o peso unitário da parede em kN/m³

2.6 AÇÕES VARIÁVEIS

O item 4.2.1.2 da NBR 8681/03 (ABNT, 2003) considera como ações variáveis as cargas acidentais da construção, como os efeitos, forças centrífugas, de frenagem e de impacto, os efeitos do vento e das variações de temperatura, atrito nos aparelhos de apoio e as pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas. Dependente da sua probabilidade de ocorrência durante a vida da construção, as ações variáveis são classificadas em normais ou especiais:

- Ações variáveis normais: ações com probabilidade de ocorrência suficientemente grande para que sejam obrigatoriamente consideradas no projeto das estruturas de um dado tipo de construção;
- Ações variáveis especiais: são ações sísmicas ou cargas acidentais de natureza ou de intensidade especiais, as situações especiais devem ser definidas como tal a se considerar.

2.6.1 Carga Acidental

A NBR 6120/80 (ABNT, 1980) no item 2.2 trata as ações variáveis como carga acidental, na prática chamada de sobrecarga, que é toda e qualquer carga vertical que pode atuar sobre a estrutura de edificações em função do peso de pessoas, móveis, veículos, materiais diversos e etc. Também chamadas de cargas verticais. Os valores mínimos dessas cargas estão na Tabela 4 no Anexo A.

Para obter-se o valor total das cargas atuantes sobre as lajes, sejam elas permanentes e/ou variáveis, é necessário fazer a soma de todas como na Equação 14.

$$P_{tot} = g_{pp} + g_{rev} + g_{par} + g_{sob} \quad \text{Eq. 14}$$

Onde: P_{tot} é a carga total atuante na laje em kN/m²;

g_{pp} é a carga do peso próprio da laje em kN/m²;

g_{rev} é a carga total dos revestimentos da laje em kN/m²;

g_{par} é a carga da parede em kN/m² quando houver;

g_{sob} é a sobrecarga individual de cada laje em kN/m².

2.7 ESTADOS LIMITES PARA DIMENSIONAMENTO

Seguindo o item 4.1 da NBR 8681/03 (ABNT, 2003) sabe-se que os estados limites podem ser estados limites últimos ou estados limites de serviço. Esses limites no projeto estrutural vão depender dos tipos de materiais de construção utilizados de acordo com os especificados pelas normas do projeto.

De acordo com a NBR 6118/14 (ABNT, 2014), estado limite último é empregado no dimensionamento, ao se relacionar com qualquer tipo de ruína estrutural que possa causar a paralisação do uso da estrutura seja como ruptura das seções, perda de estabilidade, entre outras.

Já o estado limite de serviço não está relacionado a uma ruína imediata, é utilizado para verificar danos, deformações, fissuras ou vibrações que prejudicam a construção, podendo comprometer a sua durabilidade.

2.7.1 Flechas

O deslocamento transversal máximo de uma barra reta ou placa é chamado de flecha, e o seu cálculo para lajes depende do seu carregamento uniforme e das condições de apoio de acordo com a Figura 6. Por meio da Equação 15:

$$f = \frac{p * l_x^4}{E * h^3} * \frac{\alpha}{100} \quad \text{Eq. 15}$$

Onde: p é o carregamento distribuído uniformemente sobre a placa;

α é o coeficiente encontrado no Quadro 3;

l_x é o menor vão da laje;

E é o modulo de elasticidade do concreto;

h é a espessura da laje.

Para calcular as flechas é preciso encontrar o coeficiente α , que se dá pelo parâmetro λ , em relação ao caso de vinculação das lajes.

Quadro 3 – Coeficientes α para cálculo de flechas em lajes com carregamento distribuído

(continua)

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	2,42	2,21	2,21	1,81	1,81	1,46
1,05	5,17	3,61	3,42	2,67	2,55	2,31	2,04	1,92	1,60
1,10	5,64	4,04	3,63	2,91	2,92	2,41	2,27	2,04	1,74
1,15	6,09	4,47	3,82	3,12	3,29	2,48	2,49	2,14	1,87
1,20	6,52	4,91	4,02	3,34	3,67	2,56	2,72	2,24	1,98
1,25	6,95	5,34	4,18	3,55	4,07	2,63	2,95	2,33	2,10
1,30	7,36	5,77	4,35	3,73	4,48	2,69	3,16	2,42	2,20
1,35	7,76	6,21	4,50	3,92	4,92	2,72	3,36	2,48	2,30
1,40	8,14	6,62	4,65	4,08	5,31	2,75	3,56	2,56	2,37
1,45	8,51	7,02	4,78	4,23	5,73	2,80	3,73	2,62	2,45
1,50	8,87	7,41	4,92	4,38	6,14	2,84	3,91	2,68	2,51
1,55	9,22	7,81	5,00	4,53	6,54	2,86	4,07	2,53	2,57
1,60	9,54	8,17	5,09	4,65	6,93	2,87	4,22	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

(conclusão)

λ	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9
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: Bares, 1972.

Os cálculos das flechas e dos momentos, o detalhamento final e o consumo de concreto de uma laje maciça estarão no Capítulo 4, assim como a parte teórica aplicada para o pavimento tipo.

2.8 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA LAJE MACIÇA

a) Vantagens:

1. Os erros são imediatamente identificados;
2. É menos suscetível a fissuras e trincas, pois depois de seco, o concreto torna-se um monobloco que dilata e contrai de maneira uniforme;
3. Bom desempenho em relação à capacidade de redistribuição dos esforços;
4. A mão de obra é bastante treinada, pois foi a estrutura de concreto mais aplicada durante anos;
5. Boa resistência à infiltração;
6. Exige muitas vigas, formando pórticos que garantem uma boa rigidez à estrutura.

b) Desvantagens:

1. Maior gasto de madeira para a base e escoramento;
2. Utiliza uma maior quantidade de concreto para o preenchimento das fôrmas;
3. É a mais pesada e, geralmente mais cara;
4. Cálculo estrutural mais complexo;
5. Pavimento muito recortado por não se aplicar em grandes vãos;
6. Grande consumo de fôrmas.

3 LAJES NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO

Com o intuito de eliminar o concreto onde ele não é solicitado, e reduzindo conseqüentemente o custo de execução da obra, foi criada uma alternativa para a construção das lajes. Tal como a utilização de nervuras de concreto armado na face inferior das lajes, com uma camada de concreto na superfície superior, podendo ainda haver ou não material entre as nervuras. A laje nervurada é feita diretamente na obra, podendo ter uma superfície plana, utilizando nervuras com largura menor que sua altura. A Figura 13 mostra uma laje nervurada sem preenchimento, sabendo-se que seu peso estrutural é mais leve e foi necessário o uso de fôrmas na sua execução.

Figura 13 – Laje Nervurada



Fonte: Dicionário da Construção Civil - ECivil ²

Com a retirada do concreto abaixo da linha neutra conseqüentemente haverá uma redução no peso próprio da estrutura e melhor aproveitamento do concreto e do aço. Os materiais de enchimento apenas substituem o concreto, não tendo nenhuma influência sobre a resistência já que a tração é aplicada no aço das nervuras.

Essas reduções aumentam a economia de materiais, de fôrmas e de mão-de-obra, aumentando assim a efetividade do processo construtivo. Ademais, o uso de lajes nervuradas diminui perdas de material e aumenta a produtividade tornando a sua execução mais racionalizada.

² Disponível em: <http://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-laje-nervurada.html>;. Acesso em agosto de 2017.

3.1 TIPOLOGIA DAS LAJES NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO

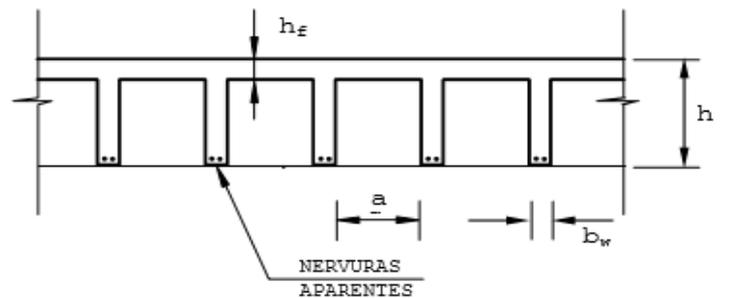
De acordo com a NBR 6118/14 (ABNT, 2014) as lajes nervuradas são definidas como lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras e entre elas pode ser colocado material inerte.

Além destes dois tipos de Lajes Nervuradas (LN), também existe as lajes com capitéis e com vigas-faixa, chamadas de laje cogumelo. Todas as três são feitas “in loco”, por necessitarem de escoramento e armaduras.

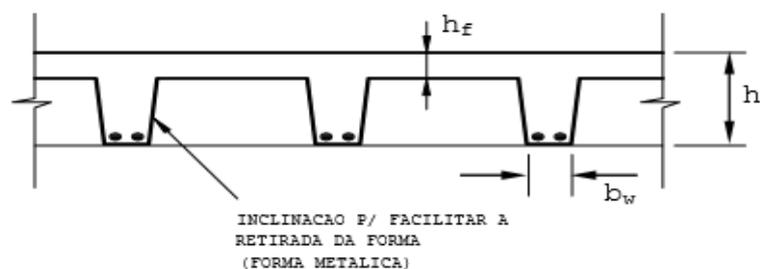
3.1.1 Lajes nervuradas moldadas no local

Essas lajes são construídas “in loco”, ou seja, totalmente na obra e em sua posição definitiva, e podem ser classificadas de acordo com a forma e com os tipos de materiais utilizados.

Figura 14 – Laje nervurada normal com as células aparentes



a – Fôrmas com faces não inclinadas



b – Fôrmas com faces inclinadas.

Fonte: Bocchi Junior, 2007.

A figura 14a ilustra um pedaço de uma laje nervurada moldada no local, executada no desenho por um corte transversal, no qual, para conseguir essa forma é necessário o uso de fôrmas sobre a armação de madeira escoradas e espaçadas segundo o projeto estrutural de acordo com a NBR 6118/14 (ABNT, 2014). (Ver Figura 16). Estas fôrmas variam entre ser de metal, madeira, fibras de vidro ou plásticas recuperáveis e reutilizáveis (Figura 15), no entanto para facilitar a retirada das fôrmas entre as nervuras é preciso aplicar produto desmoldante antes de instalar as barras das armaduras. Como observado na figura 14b, é possível aderir fôrmas com planos verticais inclinados para facilitar a desforma e o seu reaproveitamento.

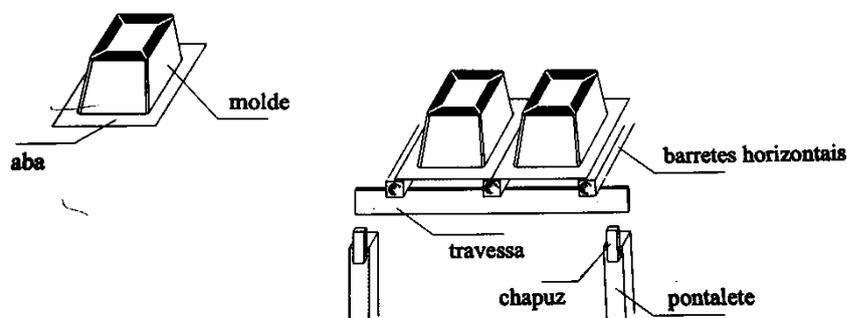
Figura 15 – Fôrmas de plástico



Fonte: Gabriel Bonafé - AECWeb³

A fôrma inferior também chamada de tablado é constituída por madeira compensada com uma película plástica para impedir a infiltração da água de amassamento do concreto. É apoiada sobre vigas metálicas ou de madeira que são sustentadas em cimbramento por escoras de madeira ou metálicas.

Figura 16 – Moldes plásticos para execução de lajes nervuradas e esquema de escoramento.

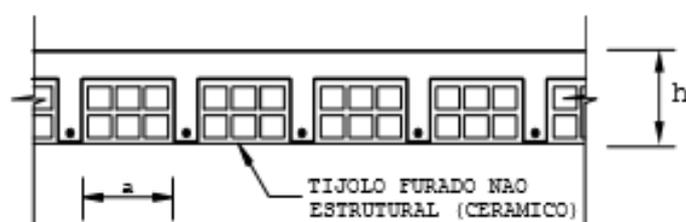


Fonte: Roberto Chust, 2013, p 17.

³ Disponível em: https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/lajes-nervuradas-garantem-economia-a-construcao_11026_0_1; Acesso em maio de 2017.

Quanto à parte construtiva entre as nervuras que sustentam a mesa, pode ou não haver a utilização de algum material inerte, ou seja, este não possui resistência no cálculo estrutural. É constituído por poliestireno expandido, concreto celular, concreto comum ou de blocos cerâmicos (Figura 17), que são incorporados às lajes por meio do tablado inferior, cujas faces inferiores das lajes, das nervuras e dos blocos coincidem. Sua vantagem é evitar o uso de fôrmas nas laterais das nervuras e na face inferior da mesa, obtendo-se assim superfícies planas. Deste modo, o acabamento arquitetônico em argamassa de cimento, cal e areia ou em gesso, pode ser aplicado sem prejuízo em sua junção, notando que os blocos não se deslocam durante a concretagem.

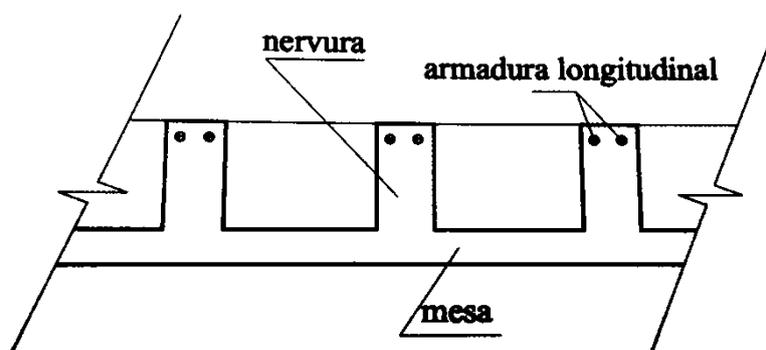
Figura 17 – Laje nervurada normal com as células não aparente



Fonte: Bocchi Junior, 2007.

As lajes nervuradas padrões são aquelas em que as nervuras são inferiores, possuindo uma mesa superior de concreto, como já visto acima. Já nas lajes nervuradas invertidas, as nervuras são superiores enquanto a mesa de concreto é inferior (Figura 18). Para a sua execução é necessário o uso de fôrmas, tanto para moldar a mesa quanto para as nervuras, pois o espaço entre elas é vazio e com células aparentes. Por ser de difícil execução, este tipo de laje está praticamente em desuso, e é recomendada apenas para casos de lajes em balanço.

Figura 18 – Laje nervurada invertida



Fonte: Roberto Chust, 2013, p 19.

3.1.1.1 Processo de execução

A construção das lajes nervuradas moldadas in loco requer certo cuidado e devem ser atendidos os seguintes procedimentos.

3.1.1.1.1 Montagem do escoramento e das fôrmas

O processo de execução das LN começa pelo escoramento, que pode ser metálico ou de madeira, devidamente apoiado numa base firme, como o contra piso ou laje do andar inferior. As escoras devem ser posicionadas de acordo com o projeto e precisam estar niveladas.

Em seguida as fôrmas ou cubetas, que variam entre diferentes materiais, ou até mesmo blocos de concreto, são distribuídas sobre as placas de apoio, geralmente tablados de madeira ou aço, que estão em cimbramento. (Ver Figura 19)

As fôrmas podem ser alinhadas com a ajuda de réguas, guias, cordão ou arame, e uma fôrma não deve estar apoiada a outra para que elas não se movam e causem vazamento do concreto ou desalinhamento das nervuras. Para as reutilizáveis não é recomendado fixá-las com pregos, pois isso pode estragá-las, também é recomendado que fosse aplicado desmoldante para facilitar na hora da desenforma e manter as peças intactas.

Figura 19 – Escoramento metálico e cubetas plásticas



Fonte: Metax⁴

⁴ Disponível em: <http://www.metax.com.br/escoramentos-id-2;>. Acesso em outubro de 2017.

3.1.1.1.2 Colocação das armaduras

Em seguida são alocadas armaduras, vergalhões e estribos, se forem necessários, e também são colocados os distanciadores a fim de obter o cobrimento necessário para proteger contra a corrosão. (Ver Figura 20)

Figura 20 – Armação



Fonte: Rossi, 2014.

3.1.1.1.3 Lançamento do concreto

Segundo BOCCHI JR & GIONGO (2010), o concreto de uma laje nervurada precisa ser lançado de uma só vez para evitar as juntas de concretagem. Quando não puderem ser evitadas, convém tomar cuidado ao reiniciar o lançamento do concreto, como remover a nata do concreto endurecido e realizar a limpeza do local, para que haja ligação entre os concretos. As juntas devem estar em regiões onde tiver o menor esforço de cisalhamento, como no encontro da laje com o pilar ou parede.

A concretagem da LN deve ser feita por trechos e por camadas, preenchendo primeiro as nervuras, para assim poder visualizar os espaços onde deverá ser feita a vibração, como na Figura 21. O concreto não deve estar muito fluido para não gerar fissuras na parte superior da laje, e ele não deve se concentrar em nenhuma região, a fim de que não danifique as fôrmas e nem cause embarrigamento das nervuras.

Figura 21 – Concretagem

Fonte: Venturini, 2011.

O concreto nessas lajes precisa ser vibrado sempre, com o intuito de obter maior homogeneidade, reduzindo o número de vazios, para que se obtenha a resistência mínima prevista no projeto. A vibração deve ser evitada entre duas fôrmas, pois isso pode causar o deslocamento das peças ou até mesmo derrubá-las. O certo é vibrar no encontro entre quatro fôrmas, que é suficiente para o adensamento do concreto. (Ver Figura 22)

Figura 22 – Vibração nas nervuras

Fonte: BOCCHI Jr & GIONGO, 2010.

Ao terminar de lançar o concreto, a laje é nivelada com o uso de régua de pedreiro, um sarrafo e mestras que posteriormente são removidas.

3.1.1.1.4 Cura do concreto

Um concreto resistente e de qualidade se dá pelo resultado de uma boa cura, do contrário, sua resistência pode ser prejudicada em até 30% e pode haver o surgimento de fissuras, tornando o vulnerável aos agentes agressivos.

Devido ao concreto fresco ficar muitas vezes exposto ao sol e ao vento, ele perde a água da sua mistura por evaporação antes mesmo de ter endurecido, diminuindo a sua resistência. Para isso não acontecer, o concreto precisa ser mantido úmido até que o processo de cura seja finalizado, com tempo mínimo de sete dias, porém se durar de três a quatro semanas melhora ainda mais a sua resistência, como ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Cura do concreto



Fonte: Faz Fácil, 2012.

3.1.1.1.5 *Desenforma*

A eliminação dos escoramentos, tablados e fôrmas deve ser realizada quando o concreto estiver endurecido o bastante para resistir às ações atuantes sobre a laje sem que haja deformações.

Quando for desenformar as cubetas é aconselhável usar cunha de madeira e martelo de borracha para não danificar as peças, e é bom não as remover pelas pontas para evitar que se quebrem. O uso do desmoldante irá ajudar na hora da desenforma, para que o concreto não grude nas fôrmas.

Figura 24 – Reescoramento da laje nervurada



Fonte: Venturini, 2011.

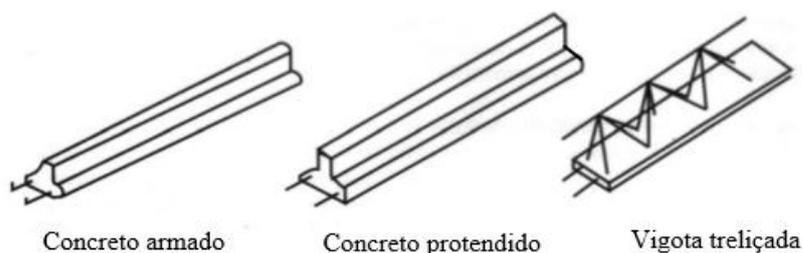
O reescoramento (Figura 24) deve ser mantido até que a cura esteja totalmente completa, aproximadamente quatro semanas. Se houverem rebarbas e rebaixos na laje, ambos podem ser melhorados, com lixadeiras e preenchidos com argamassas, respectivamente. Ao final desses reparos a laje estará concluída.

3.1.2 Lajes nervuradas Pré-Moldadas

De acordo com Nogueira e Castro (2010) as LN pré-moldadas são aquelas cujas nervuras são constituídas por vigotas pré-moldadas e o uso da mesa de fôrma tradicional esteja isento. Estas vigotas são capazes de suportar o seu peso próprio e as ações de construção, sendo necessários apenas escoramentos intermediários. Além destas, as lajes também são compostas de alguns materiais de enchimento que são colocados sobre os pré-moldados, além de concreto moldado no local.

Existem três tipos de vigotas pré-moldadas, de concreto armado, concreto protendido e a vigota treliçada, como na Figura 25.

Figura 25 – Vigotas pré-moldadas

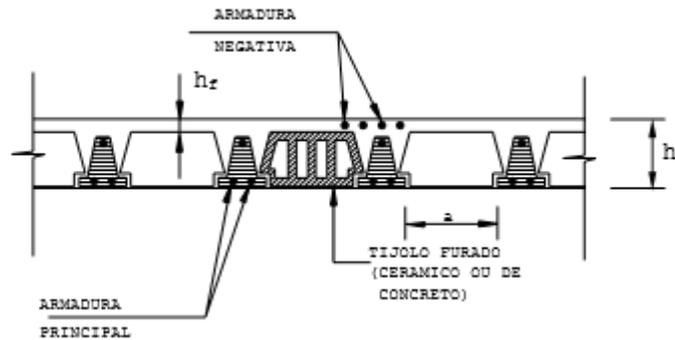


Fonte: Franca & Fusco, 1997.

Essas lajes evoluíram das LN moldadas no local, sua construção é mais fácil e o processo de pré-fabricação pode ser realizado na obra ou em fábricas próprias, onde posteriormente as nervuras são levadas para o canteiro e posicionadas sobre as fôrmas das vigas e das escoras.

Uma das principais vantagens em adotar essa laje é que não é necessário o uso de fôrma acoplada à face inferior, pois os blocos entre as nervuras não permitem que o concreto recém-lançado flua pelas regiões de contato entre as nervuras pré-fabricadas e blocos. A concretagem das nervuras e da mesa ocorre quando todas as armaduras adicionais e os dutos para passagens de instalações elétricas e hidráulicas estiverem nos seus devidos lugares.

Figura 26 – Laje tipo pré-fabricada

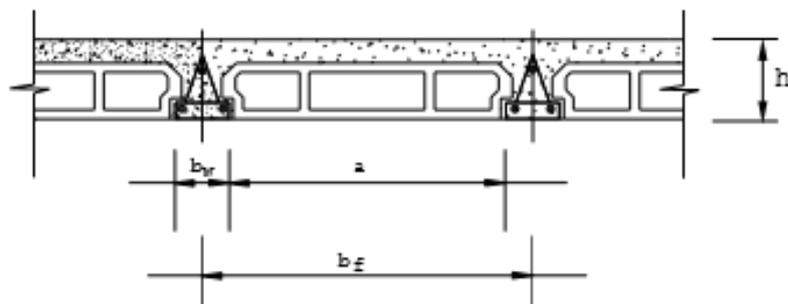


Fonte: Bocchi Junior, 2007.

De acordo com a figura 26 a laje pré-fabricada é composta de concreto, com as barras da armadura longitudinal posicionada na fôrma antes do lançamento do concreto, e sua rigidez é obtida por meio de sua forma.

Com a evolução das lajes pré-fabricadas, foram criadas lajes constituídas por uma chapa lisa longitudinal de concreto, com as barras da armadura agrupadas a ela, e para melhorar a resistência e rigidez ao transporte e as ações de construção, foram adotadas treliças metálicas constituídas por barras ou fios de aço de construção, como ilustra a figura 27.

Figura 27 – Laje treliça



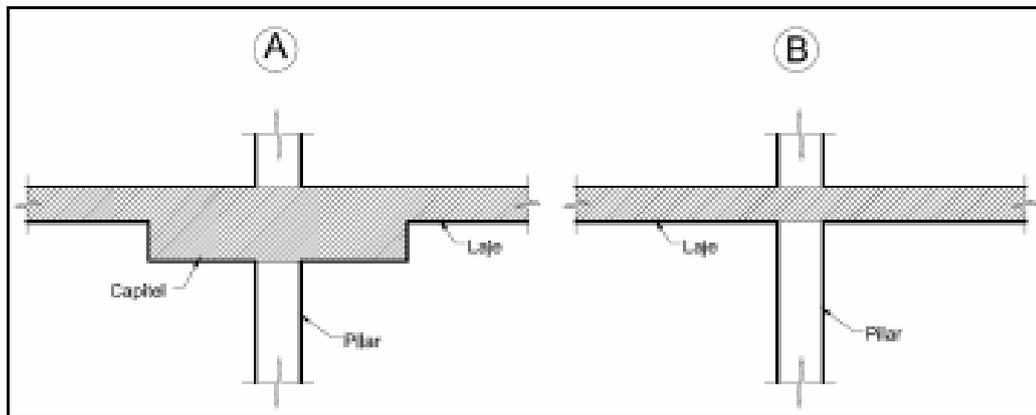
Fonte: Bocchi Junior, (2007).

Nestes dois tipos de laje as nervuras são pré-fabricadas fora do local de construção, na obra a laje é montada e a parte restante da nervura é concretada juntamente com a mesa da laje nervurada.

3.1.3 Lajes cogumelo

A laje cogumelo é uma laje contínua apoiada sobre os pilares ou suportes de concreto sem necessidade das vigas. De acordo com a NBR 6118/14 (ABNT, 2014), a laje cogumelo está apoiada diretamente sobre pilares com capitéis, ao contrário das lajes lisas que são apoiadas diretamente nos pilares, esquema ilustrado na Figura 28.

Figura 28 – Esquema de apoios: (A) laje cogumelo e (B) laje lisa

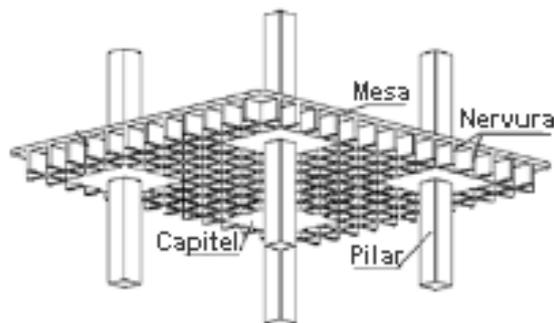


Fonte: Spohr, 2008.

Esse tipo de laje é utilizado para vãos de até 12 m, devido à ausência de vigas, por isso se esse limite for ultrapassado o seu uso fica impossibilitado.

Assim como toda estrutura as lajes também estão submetidas a vários esforços, principalmente a cortante nos apoios, que tendem a perfurar o pano da laje. Para evitar esse tipo de problema, a laje deve ser um pouco mais espessa ou o pilar deve ser engrossado, tendo então a forma do tronco de um cone ou pirâmide, formando o capitel. Quando isso acontece é possível diminuir a espessura da placa fora da região do pilar, sendo chamada de laje cogumelo protendida (Figura 29).

Figura 29 – Laje nervurada cogumelo



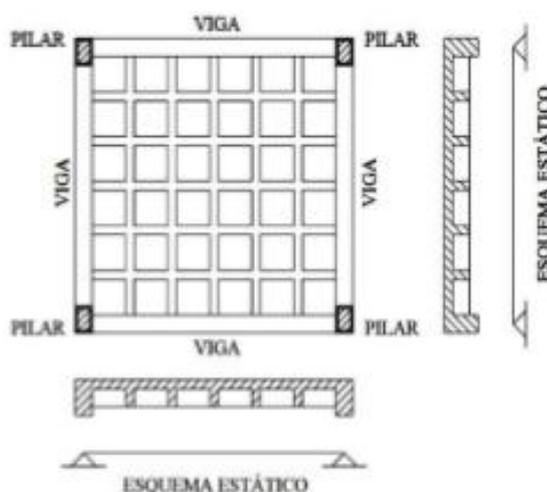
Fonte: Santiago, 2013.

Para este tipo de laje é necessário verificar o efeito da punção, que é também chamado de estado limite último por cisalhamento, devido às tensões concentradas e ações fletoras. A importância deste cálculo se dá pela laje não ter vigas em concreto armado e não possuir armaduras, por isso a precisão de verificar as tensões máximas admitidas e relações de tensão resistente sobre a solicitante nas seções críticas. E para quando houver necessidade de armaduras de punção, devem-se comparar as relações de tensão e também calcular as áreas de armadura.

3.2 VINCULAÇÃO DAS LAJES NERVURADAS

As lajes nervuradas assim como as maciças podem ter suas bordas simplesmente apoiadas (Figura 30), engastadas ou em balanço. BOCCHI JR. (1995) recomendou evitar o uso de lajes engastadas ou em balanço para lajes nervuradas, por conta dos momentos negativos que geram esforços de tração na parte superior e de compressão na parte inferior, local onde a área de concreto é menor, por isso insuficiente para resistir a esses esforços solicitantes. Como o concreto é um material de alta resistência à compressão e baixa à tração, a solução seria criar uma mesa inferior ou tornar as regiões de contorno maciças, tendo como resultado o aumento do peso próprio e um maior consumo de concreto.

Figura 30 – Lajes nervuradas com bordas simplesmente apoiadas



Fonte: Silva, 2005.

A Figura 30 mostra uma circunstância já estudada para lajes maciças, na qual se analisa a laje nervurada apoiada nas vigas de borda. Se for considerada como engastadas nas

vigas, o momento uniformemente distribuído em seu tramo deverão ser considerados para haver equilíbrio com os pilares, surgindo então torção em suas extremidades, que gera momento nos pilares. Como as vigas de concreto armado têm as suas dimensões restringidas pela arquitetura, e como as tensões tangenciais da força cortante e torção se somam, a segurança da viga fica comprometida, sendo então melhor considerar a laje apoiada sobre as vigas de borda.

3.3 VÃO EFETIVO

De acordo com a NBR 6118/14 (ABNT, 2014), se forem seguidas as recomendações dos limites para dimensões, deslocamentos e aberturas de fissuras das lajes nervuradas, podem ser considerados para elas, os mesmos fundamentos para lajes maciças. Quando os apoios puderem ser considerados satisfatoriamente rígidos quanto à translação vertical, o vão efetivo deve ser calculado pela Equação 16:

$$l_{ef} = l_0 + a_1 + a_2 \quad \text{Eq. 16}$$

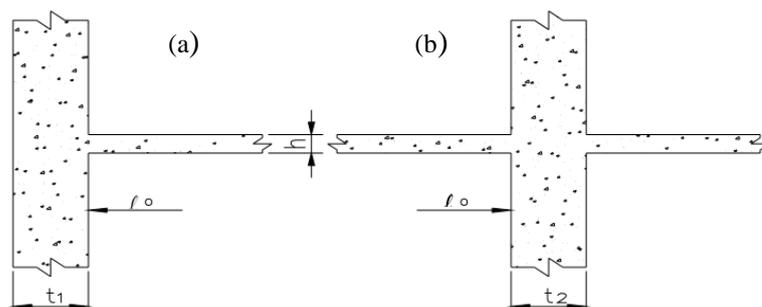
Onde: l_0 é o vão teórico, sendo a distância entre os centros de apoio;

Para calcular a_1 e a_2 utiliza-se a Equação 17:

$$a_1 \leq \left\{ \begin{array}{l} \frac{t_1}{2} \\ 0,3 * h \end{array} \right\} \text{ e } a_2 \leq \left\{ \begin{array}{l} \frac{t_2}{2} \\ 0,3 * h \end{array} \right\} \quad \text{Eq. 17}$$

As dimensões de l_0 , t_1 , t_2 e h estão indicadas na Figura 31.

Figura 31 – Vãos efetivos. a) apoio de vão extremo e b) apoio de vão intermediário



Fonte: Giongo, 2007.

3.4 PRÉ DIMENSIONAMENTO

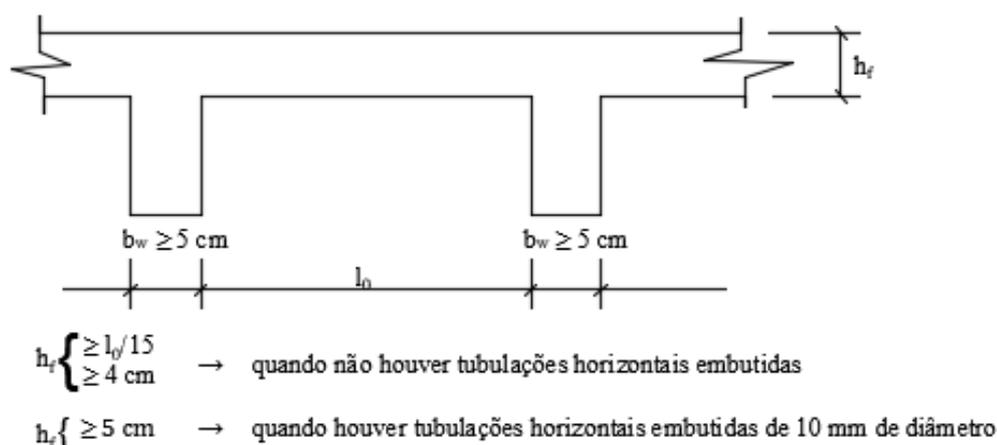
As dimensões das lajes nervuradas são determinadas pelo engenheiro de estruturas atendendo ao que se recomenda na norma 6118/14, devendo sempre respeitar as dimensões mínimas exigidas. (Ver Figura 32)

Segundo a NBR 6118/14 (ABNT, 2014), a espessura da mesa (h_f) deve ser maior ou igual a $1/15$ da distância entre as faces das nervuras (l_0) e não menor que 4 cm, quando não existirem tubulações horizontais embutidas. Já para quando existirem tubulações embutidas de diâmetro menor ou igual a 10 mm, o valor mínimo da espessura da mesa deve ser 5 cm.

Para tubulações com o diâmetro Φ maior que 10 mm, a mesa deve ter a espessura mínima de $4 \text{ cm} + \Phi$, ou para o caso de haver cruzamento dessas tubulações $4 \text{ cm} + 2 \Phi$.

A espessura das nervuras (b_w) não pode ser menor que 5 cm, e para nervuras com espessura menor que 8 cm, não pode conter armadura de compressão.

Figura 32 – Representativo de algumas dessas recomendações



Fonte: Adaptado de Carvalho, 2013, p.22.

Quanto ao espaçamento (l_0), a NBR 6118/14 (ABNT, 2014) estabelece que:

- para lajes com espaçamento entre eixos menor ou igual a 65 cm, a verificação da flexão da mesa pode ser dispensada, e para a verificação do cisalhamento das nervuras, pode-se considerar os critérios de laje;
- para lajes com espaçamento entre 65 cm e 110 cm, exige-se a verificação da flexão da mesa, e as nervuras devem ser verificadas quanto ao cisalhamento como vigas; a verificação como lajes acontece se o espaçamento for até 90 cm e a largura média das nervuras for maior que 12 cm;

- c) para lajes com espaçamento maior que 110 cm, a mesa deve ser projetada como laje maciça apoiada na grelha de vigas, respeitando-se os seus limites mínimos de espessura.

Quando essas prescrições não forem verificadas, deve-se analisar a laje nervurada considerando a capa como laje maciça apoiada em uma grelha de vigas.

As lajes nervuradas unidirecionais de acordo com a NBR 6118/14 (ABNT, 2014), devem ser calculadas segundo a direção das nervuras, desprezando a rigidez transversal e a rigidez à torção. Quanto às lajes nervuradas bidirecionais de acordo com a NBR 14859/02 (ABNT, 2002), podem ser calculadas para efeito dos esforços solicitante como lajes maciças.

Quanto aos estribos em laje nervurada, quando forem necessários, não pode ter espaçamento maior que 20 cm.

3.5 AÇÕES ATUANTES

Assim como nas lajes maciças, as ações que atuam nas lajes nervuradas podem ser ações permanentes ou ações variáveis, seguindo o mesmo padrão citado nos itens 2.5 e 2.6 do Capítulo 2 de acordo com as NBR 6118/14 (ABNT, 2014) e NBR 6120/80 (ABNT, 1980).

Para o peso próprio da laje nervurada é considerado as dimensões da seção transversal da laje e o peso específico do concreto armado que é sempre 25 kN/m^3 , e caso na laje haja algum tipo de enchimento, o seu peso específico deve ser acrescido.

É muito comum a utilização de blocos cerâmicos para o enchimento das lajes nervuradas, com o intuito de amenizar o uso de fôrmas e até mesmo para beneficiar o custo da obra. O peso específico de cada um dos possíveis enchimentos para as lajes se encontram estabelecidos na Tabela 3 no Anexo A da NBR 6120/80 (ABNT, 1980).

Para as demais ações permanentes principais como contrapiso, revestimento do teto, piso, paredes e para as ações variáveis, se aplicam os mesmos critérios seguindo o item 2.5.

Quanto às ações permanentes indiretas devem ser verificadas a retração e fluência do concreto que podem gerar modificações na estrutura se for uma LN protendida. E ainda para este tipo de laje, a protensão é considerada em toda a estrutura e elementos protendidos, abrangendo aqueles que sofrem sua ação indireta. O valor desta ação deve ser calculado considerando a força inicial e as estimativas de perdas imediatas e de longo prazo.

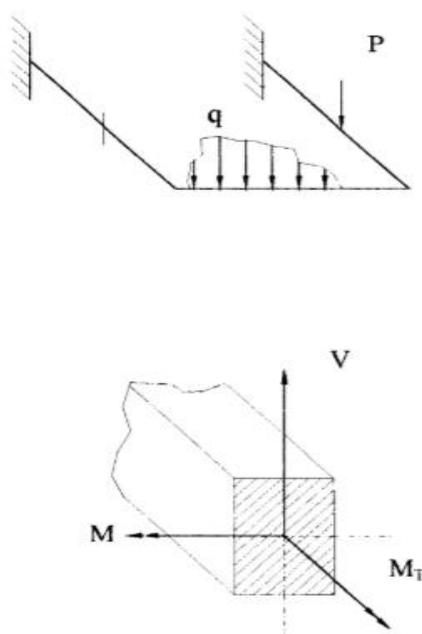
3.6 COMPORTAMENTO ESTÁTICO

As lajes nervuradas são formadas por um conjunto de nervuras, amparadas entre si pela mesa, apresentando um comportamento estático intermediário entre a chapa e a grelha. Assim como nas vigas de seção T, as tensões de compressão nas LN são resistidas pela mesa de concreto e uma fração pela nervura, dependendo da posição da linha neutra. Já a força resultante das tensões de tração é resistida pelas barras da armadura posicionada na parte tracionada da nervura.

A NBR 6118/14 (ABNT, 2014) permite a determinação dos esforços solicitantes considerando a laje nervurada como uma placa no estado elástico, desde que sejam atendidas as recomendações aplicadas no item 3.4 de pré-dimensionamento. A determinação desses esforços e do deslocamento de uma laje nervurada se dá pela teoria das grelhas, utilizando um recurso da informática no cálculo estrutural.

Devido ao alto grau de hiperstaticidade e deslocabilidade das grelhas o cálculo dos esforços se tornava difícil, com o advento da informática este método se tornou rápido e fácil de ser manejado, e fez com que as dificuldades desaparecessem. A grelha pode ser definida como uma estrutura plana que recebe ação normal a sua superfície. São apresentados apenas três esforços solicitantes, e conseqüentemente, três deformações, os quais os esforços são: força cortante agindo normalmente ao seu plano, momento fletor atuante e momento de flexão ao eixo da barra e de torção axial à barra, representados na Figura 33.

Figura 33 – Esforços solicitantes em uma grelha



Fonte: Bocchi JR & Giongo, 1995.

Após determinar os esforços solicitantes e deslocamentos de uma laje nervurada pelo método das grelhas, toda a estrutura é considerada resistente, enquanto que no cálculo de vigas isoladas, apenas uma direção será resistente. Tendo como resultado vigas com maiores esforços solicitantes, e conseqüentemente com maiores dimensões e assim a estrutura terá um maior peso próprio. Para que o cálculo seja econômico é preciso considerar que a rigidez das peças seja semelhante para que a transferência de ações ocorra no plano estrutural, pois se as nervuras de uma direção forem mais rígidas que as outras, elas absorverão em maior quantidade os esforços solicitantes.

Segundo Chust (2013), o comportamento estrutural das lajes nervuradas pode ser comparado com o das lajes maciças, que tem um desempenho bastante eficiente.

Para o cálculo do momento e das flechas das lajes nervuradas, serão atribuídos valores e expressões diretamente no Capítulo 5 de dimensionamento do pavimento tipo, juntamente com o consumo de concreto.

3.7 VANTAGENS E DESVANTES DAS LAJES NERVURADAS

a) Vantagens:

1. Diminui o peso próprio da laje;
2. Podem ser aplicadas em grandes vãos, liberando espaços;
3. Menor consumo de materiais;
4. Menor mão de obra;
5. Execução mais rápida;
6. Podem suportar uma carga maior.

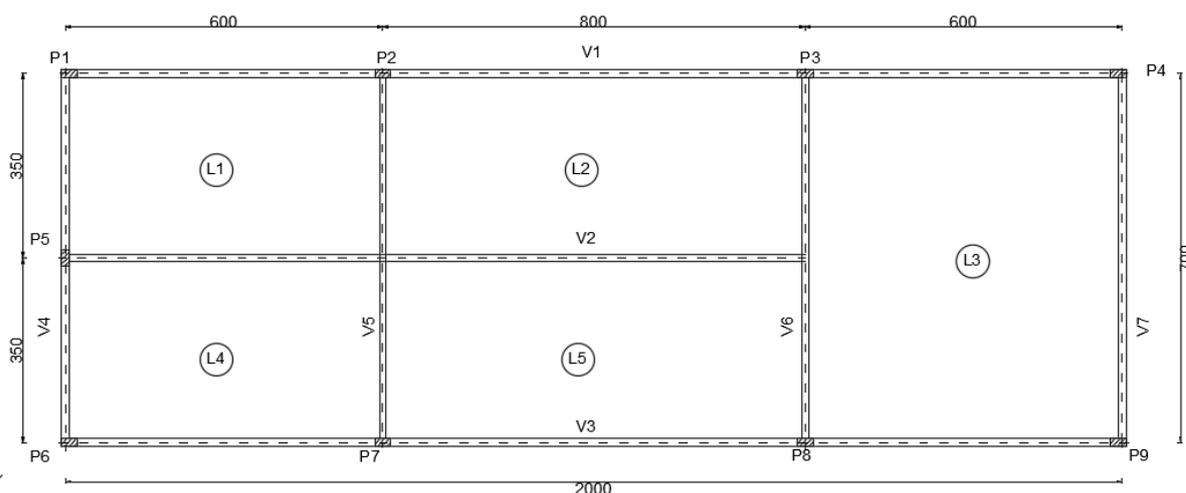
b) Desvantagens:

1. Demanda por altura maior de cada andar;
2. Exige cuidado durante a concretagem para evitar os vazios nas nervuras;
3. Dificuldade na fixação dos elementos de enchimento;
4. Maior passo a passo do processo de execução;
5. Pode apresentar trincas em razão da falta da capa de concreto;
6. Dificuldade de compatibilização com outros subsistemas.

4 APRESENTAÇÃO DO PAVIMENTO TIPO PARA LAJES MACIÇAS

Para a comparação de um pavimento tipo e a escolha entre utilizar a laje maciça ou a laje nervurada foi escolhido como exemplo o pavimento ilustrado na Figura 34:

Figura 34 – Pavimento tipo em cm



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Considerar:

- Contrapiso de argamassa cimento e areia ($e = 3,0$ cm);
- Piso de porcelanato ($e = 5$ mm);
- Argamassa do revestimento inferior da laje de gesso ($e = 2,0$ cm);
- Classe II ($cob = 25$ mm);
- Vigas: $b_w = 12$ cm e $h = 30$ cm;
- F_{ck} do concreto = 30 MPa;
- Aço CA-50.

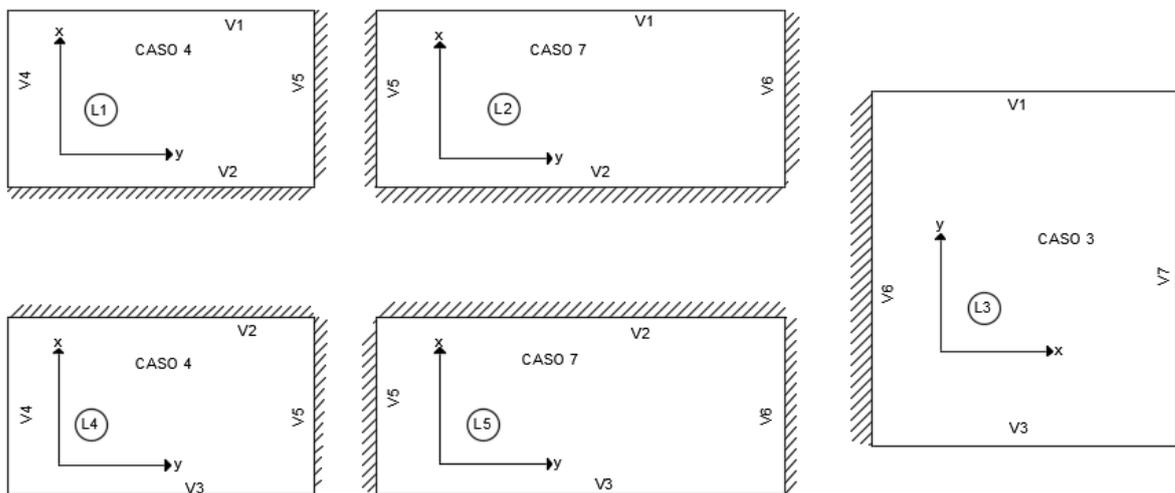
4.1 DIMENSIONAMENTO PARA LAJES MACIÇAS

Para o dimensionamento e detalhamento deste pavimento para o uso da laje maciça deve-se seguir o seguinte passo a passo.

4.1.1 Esquema estrutural

As lajes L1, L2, L3, L4 e L5 são isoladamente consideradas, com o esquema estrutural de acordo com a Figura 35. As lajes L1 e L4 são iguais em dimensão, além disso, possuem duas bordas adjacentes engastadas e as outras duas simplesmente apoiadas, fazendo delas um caso 4 quanto a sua vinculação, de acordo com o item 2.2 do Capítulo 2. As lajes L2 e L5 também são idênticas e possuem 3 bordas engastadas com a maior borda apoiada, um caso 7. Já a laje L3 é engastada em um dos lados maiores enquanto os outros lados são apoiados, caso 3.

Figura 35 – Esquema estrutural das lajes do pavimento



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

4.1.2 Classificação das lajes

De acordo com as Equações 1 e 2 do item 2.1 temos a classificação das lajes armadas em uma ou em duas direções.

Quadro 4 – Classificação das lajes

Laje	l_y/l_x	λ	classif
L1=L4	1,71	2	2D
L2=L5	2,29	2,3	1D
L3	0,86	2	2D

Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.3 Pré-dimensionamento da altura útil e espessura

O pré-dimensionamento é feito conforme o item 2.4 segundo a NBR 6118/14 (ABNT, 2014). Com base nas equações já mencionadas anteriormente, temos os valores da altura útil e da espessura apresentados no Quadro 5:

Quadro 5 – Cálculo dos valores do pré-dimensionamento

Laje	Caso	l_x (cm)	l_y (cm)	n	$0,7 \cdot l_y$	l^*	d_{est} (cm)	c (cm)	h (cm)	d_{adot} (cm)	h_{adot} (cm)
L1=L4	4	350	600	2	420	350	8	2,5	12	10	14
L2=L5	7	350	800	3	560	350	8	2,5	12	10	14
L3	3	600	700	1	490	490	12	2,5	16	10	14

Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com o Quadro 5 a maior altura (espessura da laje) necessária seria de 16 cm, mas é possível adotar uma altura menor e verificar se ela atende às limitações de flecha. Como as cinco lajes precisam ter a mesma altura, adotou-se: $d = 10$ cm e $h = 14$ cm.

4.1.4 Determinação das cargas atuantes

a) Cargas permanentes

Para o cálculo das cargas permanentes seguimos o item 2.5 do Capítulo 2.

1. Peso próprio:

Primeiramente calcula-se o peso próprio para a altura adotada em metros:

$$g_{pp} = 0,14 * 25 = 3,5 \text{ kN/m}^2$$

2. Revestimentos:

- Revestimento superior:

- Contrapiso de argamassa de cimento e areia ($e = 3,0$ cm)

$$g_{contr} = 21 * 0,03 = 0,63 \text{ kN/m}^2$$

➤ Piso de porcelanato ($e = 10 \text{ mm}$)

Para piso de porcelanato a NBR 6120/80 (ABNT, 1980) não possui peso específico tabelado, portanto deve-se utilizar o peso informado no catálogo do fabricante, entretanto na ausência deste, considera-se para o cálculo o peso do mármore $\gamma_{piso} = 28 \text{ kN/m}^3$.

$$g_{piso} = 28 * 0,01 = 0,28 \text{ kN/m}^2$$

- Revestimento inferior:

É o revestimento do teto abaixo da laje composto de argamassa de gesso ($e = 2 \text{ cm}$)

$$g_{rev.teto} = 12,5 * 0,02 = 0,25 \text{ kN/m}^2$$

- Carga total dos revestimentos:

$$g_{rev} = 0,63 + 0,28 + 0,25 = 1,16 \text{ kN/m}^2$$

b) Carga acidental

Para o cálculo da carga acidental usa-se o critério do item 2.6.1.

- Carga vertical para um banco:

De acordo com a Tabela 4 no Anexo A, a carga para salas de escritório e banheiros é de: $g_{sob} = 2 \text{ kN/m}^2$.

Considerando essa carga acidental para todas as lajes

c) Carga total

Considerando que não há paredes sobre as lajes no projeto deste pavimento o $g_{par} = 0 \text{ kN/m}^2$.

Tendo assim a carga total para todas as lajes, conforme a Equação 14:

$$P_{tot} = 3,5 + 1,16 + 0 + 2 = 6,66 \text{ kN/m}^2$$

4.1.5 Verificação das flechas

Segundo Chust (2012), as flechas podem ser calculadas considerando o concreto com comportamento elástico e linear para todas as cargas incluindo as acidentais.

a) Valores-limite das flechas

Para o cálculo do deslocamento limite das flechas, deve-se levar em consideração:

- Para cargas permanentes: $\frac{l_x}{250}$;
- Para as cargas acidentais: $\frac{l_x}{350}$.

Sabendo que l_x é o menor vão da laje.

Apesar da carga permanente e da carga acidental serem iguais para as cinco lajes, as dimensões das mesmas são diferentes para alguns vãos, sendo assim temos os valores-limite para as flechas das lajes no Quadro 6:

Quadro 6 – Cálculo dos valores-limite para as flechas das lajes

Laje	l_x (cm)	Flecha-limite (cm)	
		Carga total	Carga acidental
L1=L4	350	1,40	1,00
L2=L5	350	1,40	1,00
L3	600	2,40	1,71

Fonte: Elaborado pela autora.

b) Módulo de deformação longitudinal do concreto

De acordo com a NBR 6118/14 (ABNT, 2014), quando não forem realizados ensaios e não existir dados mais precisos sobre o concreto utilizado na idade de 28 dias, valor do módulo de elasticidade inicial pode-se estimado pela Equação 18:

$$E_{ci} = 5600 * \sqrt{f_{ck}} \quad \text{Eq. 18}$$

Para calcular o módulo de elasticidade secante nas análises elásticas do projeto, para determinar os esforços solicitantes e verificar estados-limites de serviço tem-se a Equação 19 com todos os valores em MPa:

$$E_{CS} = 0,85 * E_{Ci} \quad \text{Eq. 19}$$

Utilizando as duas equações anteriores:

$$E_{CS} = 0,85 * 5.600 * \sqrt{30} = 26.072 \text{ MPa} = 26.072.000 \text{ kN/m}^2$$

c) Cálculo da flecha elástica

Por meio da Equação 15 do item 2.7.1 do Capítulo 2 tem-se o cálculo da flecha elástica, gerando novas Equações a ser utilizadas para cada caso.

1. Flecha para carga total (permanente mais acidental)

$$f = \frac{(g_{perm} + g_{sob}) * l_x^4}{E * h^3} * \frac{\alpha}{100} \quad \text{Eq. 20}$$

Onde: g_{perm} é a soma de todas as cargas permanentes;

α expresso no Quadro 3 do Capítulo 2;

$$E * h^3 = 26.072.000 * 0,14^3 = 71.541,6 \text{ kNm}.$$

Utilizando a Equação 20 para esse cálculo, teremos uma nova equação reduzida:

$$f_{tot} = \frac{(4,66 + 2,0) * l_x^4}{71.541,6} * \frac{\alpha}{100} = 9,31 * 10^{-7} * \alpha * l_x^4 \quad \text{Eq. 21}$$

2. Flecha para carga acidental

Para o cálculo da flecha para a ação apenas da carga acidental tem-se a Equação 22:

$$f_{aci} = \frac{2,0 * l_x^4}{71.541,6} * \frac{\alpha}{100} = 2,80 * 10^{-7} * \alpha * l_x^4 \quad \text{Eq. 22}$$

Utilizando as Equações 21 e 22 calculam-se os valores das flechas para a carga total e acidental, considerando os valores limites do Quadro 6 em mm.

Quadro 7 – Cálculo dos valores das flechas das lajes

Laje	Caso	l _x (m)	l _y (m)	λ	α	α * l _x ⁴	Flechas-limite e elásticas (mm)			
							total	total lim	acid	acid lim
L1=L4	4	3,5	6	2	5,39	808,84	0,001	14	0,0002	10
L2=L5	7	3,5	8	2,3	6,38	957,40	0,001	14	0,0003	10
L3	3	6	7	2	5,66	7335,36	0,007	24	0,0021	17,1

Fonte: Elaborado pela autora.

d) Nova altura para as lajes

Como observado, as flechas estão bem abaixo dos valores-limite, podendo concluir que a altura das lajes está muito grande, sendo possível diminuí-las.

Para descobrir a nova altura, deve-se igualar a maior das flechas, que foi a da L3, com a equação da flecha-limite correspondente.

$$\frac{(4,66 + 2,0) * 6^4}{26.072.000 * h^3} * \frac{5,66}{100} = 0,024 \Rightarrow h = 0,092 \text{ m} = 9,2 \text{ cm}$$

Seguindo a Equação 5 para a altura da laje, sabe-se que $h = d_{est} + 4$, de acordo com o cobrimento da armadura.

Podemos então adotar: $h = 10 \text{ cm}$ e $d_{est} = 6 \text{ cm}$.

e) Novo carregamento

Com a mudança da altura da laje o peso próprio sofreu uma alteração, por isso a carga total sobre as lajes deve ser recalculada.

- Peso próprio:

$$g_{pp} = 0,1 * 25 = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

- Carga total:

$$P_{tot} = 2,5 + 1,16 + 0 + 2 = 5,66 \text{ kN/m}^2$$

4.1.6 Cálculo dos momentos fletores

Os próximos cálculos serão feitos com a carga total $P_{\text{tot}} = 5,66 \text{ kN/m}^2$.

a) Determinação dos momentos

Utilizando o método dos quadros desenvolvido por Bares (1972), calculam-se os momentos fletores máximos positivos e negativos nas lajes por unidade de comprimento da Equação 23 a 26.

1. Momentos máximos positivos nas direções x e y:

$$m_x = \mu_x * \frac{p * l_x^2}{100} \quad \text{Eq. 23}$$

$$m_y = \mu_y * \frac{p * l_x^2}{100} \quad \text{Eq. 24}$$

2. Momentos máximos negativos nas direções x e y:

$$m'_x = \mu'_x * \frac{p * l_x^2}{100} \quad \text{Eq. 25}$$

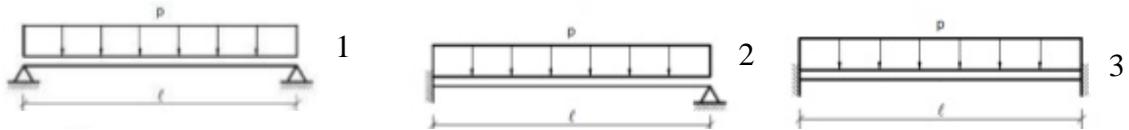
$$m'_y = \mu'_y * \frac{p * l_x^2}{100} \quad \text{Eq. 26}$$

Onde: l_x é o menor lado da laje;

μ_x , μ_y , μ'_x e μ'_y – coeficientes expressos nos Quadros 20, 21 e 22 no Anexo B.

Para as lajes armadas em uma direção o cálculo dos momentos máximos positivos e negativos é feito apenas na direção do menor vão, ou seja, em x. Os cálculos são feitos de acordo com três possíveis casos. (Figura 36)

Figura 36 – Condições de apoio para lajes 1D



Fonte: Prof. Carvalho, 2015.

Para o caso 1, cujos dois lados estão apoiados, há apenas momento positivo, e o cálculo se dá pela Equação 27:

$$m_x = \frac{p * l_x^2}{8} \quad \text{Eq. 27}$$

No caso 2, um lado é engastado e o outro é apoiado, tendo o momento negativo e positivo calculados nas Equações 28 e 29.

$$m_x = \frac{p * l_x^2}{14,222} \quad \text{Eq. 28}$$

$$m'_x = \frac{p * l_x^2}{8} \quad \text{Eq. 29}$$

Já no caso 3, cujos dois lados são engastados, os momentos nos engastes são negativos e no comprimento da laje é positivo, calculados por meio das Equações 30 e 31.

$$m_x = \frac{p * l_x^2}{24} \quad \text{Eq. 30}$$

$$m'_x = \frac{p * l_x^2}{12} \quad \text{Eq. 31}$$

Por terem a relação entre o maior vão e o menor vão maior que 2, as lajes L2 e L5 são armadas em uma direção, e entra no caso 3, foram utilizadas as Equações 30 e 31 para a realização do cálculo do momento. E para as lajes

2D foram utilizadas as Equações 23 a 26. Entretanto, ainda sim é possível calcular as lajes 1D pelo método dos quadros.

Quadro 8 – Cálculo dos momentos máximos em kNm/m

Laje	Caso	l_x (m)	λ	P (kN/m ²)	pl_x^2	μ_x	m_x	μ_y	m_y	μ'_x	m'_x	μ'_y	m'_y
L1=L4	4	3,5	2	5,66	69	5,74	3,98	1,88	1,30	11,89	8,24	8,2	5,69
L2=L5	7	3,5	2,3	5,66	69	-	2,87	-	-	-	5,75	-	-
L3	3	6	2	5,66	204	6,51	13,26	1,48	3,02	12,34	25,14	-	-

Fonte: Elaborado pela autora.

Como observado no quadro acima, não existe momento negativo na direção y para o caso 3. Assim como não há necessidade de calcular o momento positivo e o negativo na direção y para lajes armadas em uma direção, L2 e L5.

b) Determinação da altura mínima (NBR 6118/14)

A partir do maior momento fletor resultante, deve-se calcular a altura útil mínima, que é a menor altura da laje para a armadura tracionada, linha neutra. Para isso usa-se a seguinte equação:

$$M_d = (0,68 * x * d - 0,272 * x^2) * b_w * f_{cd} \quad \text{Eq. 32}$$

Com: $b_w = 1,0$ m, considerando a largura unitária da faixa de laje;

f_{cd} é o f_{ck} em kN/m² sobre o fator de segurança 1,4;

x é o k_x do aço CA-50 para o limite dentro do domínio 3 expresso na Tabela 7 no Anexo A;

d é a altura útil mínima;

M_d é o maior momento fletor multiplicado pelo fator de majoração 1,4.

Utilizando essa equação para calcular a altura útil mínima, temos:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{M_d}{b_w * f_{cd} * (0,68 * k_x - 0,272 * k_x^2)}} \quad \text{Eq. 33}$$

Substituindo todos os valores para a resolução da Equação 33, com $k_x = 0,628$ e $m = 25,14 \text{ kNm/m}$, então:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{1,4 * 25,14}{1 * \frac{30000}{1,4} * (0,68 * 0,628 - 0,272 + 0,628^2)}}$$

$$d_{\min} = 0,072 \text{ m} = 7,2 \text{ cm.}$$

c) Determinação da altura final da laje

Para o novo valor da altura mínima, determina-se a nova altura total das lajes:

$$h = d + c + 1,5\phi = d + 2,5 + 1,5 * 1 = d + 4 \text{ cm} = 7,2 + 4 = 11,2 \text{ cm}$$

Adota-se então $h = 12 \text{ cm}$ e $d = 8,0 \text{ cm}$, cujo ambos atendem as condições de flechas-limite.

d) Determinação do carregamento final

A carga sobre a laje deve ser recalculada com a sua nova altura $h = 12 \text{ cm}$.

$$P_{tot} = 0,12 * 25 + 1,16 + 0 + 2 = 6,16 \text{ kN/m}^2$$

e) Momentos finais nas lajes em kNm/m

Recalculam-se os momentos encontrados no Quadro 8 para a nova carga distribuída nas lajes, tendo os novos resultados apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 – Cálculo dos momentos finais em kNm/m

Laje	Caso	l_x (m)	Λ	P (kN/m ²)	pl_x^2	μ_x	m_x	μ_y	m_y	μ'_x	m'_x	μ'_y	m'_y
L1=L4	4	3,5	2	6,16	75	5,74	4,33	1,88	1,42	11,89	8,97	8,2	6,19
L2=L5	7	3,5	2,3	6,16	75	-	3,12	-	-	-	6,25	-	-
L3	3	6	2	6,16	222	6,51	14,44	1,48	3,28	12,34	27,37	-	-

Fonte: Elaborado pela autora.

f) Verificação da altura útil mínima

Para o novo momento máximo $M'_x = 27,37$ kNm/m, verifica-se se a altura útil precisa ser recalculada. Utilizando novamente a Equação 33.

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{1,4 * 27,37}{1 * \frac{30000}{1,4} * (0,68 * 0,628 - 0,272 + 0,628^2)}} = 0,075m$$

$$d_{\min} = 7,5 \text{ cm} < d = 8 \text{ cm}$$

Como a altura útil mínima é menor que altura real, não precisa recalculer a espessura das lajes.

Tendo por fim as alturas finais para o detalhamento das armaduras:

$$h = 12 \text{ cm e } d = 8 \text{ cm.}$$

4.1.7 Cálculo das armaduras longitudinais

a) Área mínima de aço

Antes de calcular a área de aço necessária para as armaduras longitudinais positivas e negativas, deve-se calcular a área mínima pela Equação 34.

$$A_{s_{\min}} = \rho_{\min} * A_c \quad \text{Eq. 34}$$

Onde: ρ_{\min} é a taxa geométrica mínima da armadura longitudinal de vigas e pilares de flexão para o aço CA-50 com relação ao f_{ck} utilizado (ver Tabela 6 no Anexo A);

A_c é a área de concreto ($h * 100$ cm).

Utilizando a Equação 34, calcula-se a área mínima de aço:

Para $f_{ck} = 30$ kN/cm², o ρ_{\min} encontrado é igual a 0,15%.

$$A_{s_{\min}} = \frac{0,15}{100} * 12 * 100 = 1,8 \text{ cm}^2 / m$$

1. Armaduras positivas

$$\text{Laje 2D: } A_s \geq 0,67 * A_{s_{\min}}$$

$$\text{Laje 1D : } A_s \geq A_{s_{\min}} \text{ (armadura principal)}$$

$$A_s \geq \begin{cases} 0,2 * A_{s_{\text{prin}}} \\ 0,9 \text{ cm}^2/\text{m} \text{ (armadura de distribuição)} \\ 0,5 * A_{s_{\min}} \end{cases}$$

Calculando:

$$\text{Laje 2D: } A_s \geq 0,67 * 1,8 = 1,20 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\text{Laje 1D : } A_s \geq 1,8 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$A_s \geq \begin{cases} 0,2 * 1,80 = 0,36 \text{ cm}^2/\text{m} \\ 0,9 \text{ cm}^2/\text{m} \\ 0,5 * 1,8 = 0,9 \text{ cm}^2/\text{m} \end{cases}$$

2. Armaduras negativas

$$\text{Lajes 1D e 2D: } A_s \geq A_{s_{\min}} = 1,8 \text{ cm}^2/\text{m}$$

b) Armaduras positivas e negativas

O cálculo da armadura é feito da mesma maneira que em vigas retangulares sob flexão simples, para uma faixa (b_w) de largura igual a 1,0 m.

Tanto para armaduras positivas como negativas, calcula-se primeiro o KMD (Equação 35), porque de acordo com a Tabela 7 (Anexo A) encontra-se o KZ utilizado na Equação 36 para o cálculo da área (A_s) necessária da armadura longitudinal.

$$KMD = \frac{M_d}{b_w * d^2 * f_{cd}} \quad \text{Eq. 35}$$

Onde: M_d é momento fletor positivo ou negativo da laje multiplicado por 1,4;

d é a altura útil em metros;

resistência do concreto f_{ck} em kN/m^2 dividido pelo fator de segurança 1,4.

$$A_s = \frac{M_d}{KZ * d * f_{yd}} \quad \text{Eq. 36}$$

Onde: KZ é o valor correspondente para o KMD encontrado na Equação 35;

f_{yd} é a resistência do aço em kN/cm² dividido pelo fator de segurança 1,15.

Usando essas duas equações e a Tabela 7 no Anexo A têm-se as áreas de aço da armadura longitudinal apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 – Cálculos para área de aço cm²/m

Laje	L1=L4				L2=L5				L3			
Classif.	2D				1D				2D			
Mom.	Mx	My	M'x	M'y	Mx	My	M'x	M'y	Mx	My	M'x	M'y
kNm/m	4,33	1,42	8,97	6,19	5,28	-	9,38	-	14,44	3,28	27,37	-
Md	6,062	1,988	12,558	8,666	7,392	-	13,132	-	20,216	4,592	38,318	-
KMD	0,044	0,014	0,092	0,063	0,054	-	0,096	-	0,147	0,033	0,279	-
KZ	0,958	0,980	0,931	0,94	0,952	-	0,929	-	0,903	0,965	0,793	-
As	1,819	0,583	3,878	2,651	2,232	-	4,064	-	6,436	1,368	13,892	-
Asadot	1,819	1,20	3,878	2,651	2,232	-	4,064	-	6,436	1,368	13,892	-

Fonte: Elaborado pela autora.

Para KZ foi feito, quando necessário, uma interpolação para achar o valor exato para os KMD encontrados no cálculo da Equação 35. E sempre que a área A_s for menor que a área mínima já calculada, deve-se adotá-la. Nos cálculos foi necessário adotar a área mínima apenas para o momento positivo em y das lajes L1 e L4 armadas em duas direções.

4.1.8 Detalhamento da armadura segundo NBR 6118/14

- a) Diâmetro máximo das barras

$$\phi_{m\acute{a}x} = \frac{h}{8} = \frac{12}{8} = 1,5 \text{ cm} = 15 \text{ mm} \quad \text{Eq. 37}$$

- b) Espaçamento máximo das barras principais (My)

$$s_{m\acute{a}x} \leq \begin{cases} 20 \text{ cm} \\ 2 * h = 2 * 12 = 24 \text{ cm} \end{cases}$$

c) Espaçamento máximo das armaduras de distribuição e secundárias (M_x)

$$s_{\text{máx}} \leq 33 \text{ cm}$$

Para a escolha do espaçamento das armaduras e das barras principais, olha-se na Tabela 5 no Anexo A, a área de aço mais próxima para maior da calculada (A_s) para cada diâmetro tabelado até dar o espaçamento máximo.

Usando como exemplo as lajes L1 e L4 em M_x , têm-se as seguintes opções:

- Ø 5 mm a cada 10 cm (1,96 cm²/m)
- Ø 6,3 mm a cada 17 cm (1,83 cm²/m)
- Ø 8 mm a cada 27 cm (1,86 cm²/m)

Então se escolhe a menor área com o maior espaçamento, caso as áreas sejam iguais adota-se o que tem o maior espaçamento, desde que este não ultrapasse o máximo definido. Fazer isso para todos os momentos em todas as lajes, e assim se obtém os diâmetros, áreas e os espaçamentos resultantes e finais no Quadro 11, para as barras principais (M_y) e barras secundárias (M_x).

Quadro 11 – Valores para as barras principais e secundárias

Laje	L1=L4				L2=L5		L3		
Classif.	2D				1D		2D		
Mom.	M_x	M_y	M'_x	M'_y	M_x	M'_x	M_x	M_y	M'_x
A_s (cm ² /m)	1,82	1,2	3,88	2,65	2,23	4,06	6,44	1,37	13,89
Ø (mm)	6,3	6,3	6,3	8	6,3	12,5	12,5	5	12,5
s (cm)	17	26	8	19	14	30	19	14	8,5
A_s princ (cm ² /m)	1,83	1,2	3,90	2,65	2,23	4,09	6,46	1,4	14,44

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Como as lajes 2D possuem armaduras nas duas direções, positivas e negativas, os cálculos são feitos com a mesma área de aço já calculada. Já nesse caso para as lajes 1D como as lajes L2 e L5, por serem armadas apenas em uma direção (menor vão), elas não possuem a armadura principal (M_y), apenas as armaduras de distribuição (M_x).

Devido a isso já foi calculado a área mínima de aço para essas armaduras no item 4.1.7 deste capítulo.

Sabendo que $A_s = 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ e $s_{\text{máx}} \leq 33 \text{ cm}$, ainda utilizando a Tabela 5 no Anexo A, temos as seguintes informações para as armaduras de distribuição para as lajes L2 e L5:

- $\varnothing 5 \text{ mm}$ a cada 21 cm ($0,94 \text{ cm}^2/\text{m}$)
- $\varnothing 6,3 \text{ mm}$ a cada 33 cm ($0,94 \text{ cm}^2/\text{m}$)

Neste caso, como já foi citado, para duas áreas iguais, adota-se o que tem o maior espaçamento para economizar na quantidade de barras.

d) Comprimentos das barras

1. Armadura positiva (a letra N e o número identificam as barras na planta)

- Serão colocadas barras em todo o vão das lajes;
- As barras deverão penetrar nos apoios (vigas) 6 cm ou $10 \varnothing$, usando o maior, então: $10 * 0,63 = 6,3 \text{ cm}$, adotando-se 7 cm;
- Largura das vigas = 12 cm; e
- As dimensões das lajes relacionadas aos eixos das vigas estão na planta.

➤ Comprimento para a laje L1 e L4

$$l_x = 350 - 2 * 6 + 2 * 7 = 352 \text{ cm (N1)}$$

$$l_y = 600 - 2 * 6 + 2 * 7 = 602 \text{ cm (N2)}$$

➤ Comprimento para a laje L2 e L5

$$l_x = 350 - 2 * 6 + 2 * 7 = 352 \text{ cm (N1)}$$

$$l_y = 800 - 2 * 6 + 2 * 7 = 802 \text{ cm (N3)}$$

➤ Comprimento para a laje L3

$$l_x = 600 - 2 * 6 + 2 * 7 = 602 \text{ cm (N2)}$$

$$l_y = 700 - 2 * 6 + 2 * 7 = 702 \text{ cm (N4)}$$

2. Armadura negativa (a letra N e o número identificam as barras na planta)

- Como as barras da armadura negativa tem diâmetros diferentes, calcula-se o l_b (comprimento de ancoragem) para cada um.
- Nas lajes adjacentes será considerada a armadura referente ao maior momento;
- Todas as lajes serão isoladamente consideradas, e a armadura, para todas as situações de vinculação, será estendida no interior da laje a uma distância de $0,25 * l_x$.

Sabendo que para $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ o $l_b = 33\emptyset$.

Em todas as extremidades da armadura negativa serão adotados ganchos retos, calculados de forma simplificada, descontando da altura total da laje 2,5 cm em cada face:

$$l_g = 12 - 2,5 - 2,5 = 7 \text{ cm}$$

Para o comprimento final em cada laje, dá-se a seguinte expressão:

$$l = 0,25 * l_x + l_b + l_g \quad \text{Eq. 38}$$

➤ Espaçamento e comprimento das barras da armadura às lajes L1 e L4

$$L1_x = L4_x = \emptyset 6,3 \text{ c/ } 8 \text{ cm}$$

$$l_b = 33 * 0,63 = 20,8 \text{ cm}$$

Comprimento nas lajes L1 = L4:

$$0,25 * 350 + 20,8 + 7 = 116 \text{ cm}$$

$$\text{Comprimento total para as duas lajes} = 232 \text{ cm (N5)}$$

- Espaçamento e comprimento das barras da armadura às lajes L1 e L2

$$L1_y = \emptyset 8 \text{ c/ } 19 \text{ cm}$$

$L2_y =$ não possui armadura em y

Adota-se: $\emptyset 8 \text{ c/ } 19 \text{ cm}$

$$l_b = 33 * 0,8 = 26,4 \text{ cm}$$

Comprimento na laje L1:

$$0,25 * 600 + 26,4 + 7 = 184 \text{ cm}$$

Comprimento total para a laje = 368 cm (N6)

- Espaçamento e comprimento das barras da armadura às lajes L2 e L3

$L2_y =$ não possui armadura em y

$$L3_x = \emptyset 12,5 \text{ c/ } 8,5 \text{ cm}$$

Adota-se: $\emptyset 12,5 \text{ c/ } 8,5 \text{ cm}$

$$l_b = 33 * 1,25 = 41,25 \text{ cm}$$

Comprimento na laje L3:

$$0,25 * 600 + 41,25 + 7 = 199 \text{ cm}$$

Comprimento total para a laje = 398 cm (N7)

- Espaçamento e comprimento das barras da armadura às lajes L2 e L5

$$L2_x = L5_x = \emptyset 6,3 \text{ c/ } 33 \text{ cm}$$

$$l_b = 33 * 0,63 = 20,8 \text{ cm}$$

Comprimento nas lajes L2 = L5:

$$\text{Em x: } 0,25 * 350 + 20,8 + 7 = 116 \text{ cm}$$

Comprimento total para as duas lajes = 232 cm (N5)

➤ Espaçamento e comprimento das barras da armadura às lajes L4 e L5

$$L4_y = \emptyset 8 \text{ c/ } 19 \text{ cm}$$

L5_y = não possui armadura em y

Adota-se: $\emptyset 8 \text{ c/ } 19 \text{ cm}$

$$l_b = 33 * 0,8 = 26,4 \text{ cm}$$

Comprimento na laje L4:

$$0,25 * 600 + 26,4 + 7 = 217 \text{ cm}$$

Comprimento total para a laje = 368 cm (N6)

➤ Espaçamento e comprimento das barras da armadura às lajes L5 e L3

$$L3_y = \emptyset 12,5 \text{ c/ } 8,5 \text{ cm}$$

Adota-se: $\emptyset 12,5 \text{ c/ } 8,5 \text{ cm}$

$$l_b = 33 * 1,25 = 41,25 \text{ cm}$$

Comprimento na laje L3:

$$0,25 * 600 + 41,25 + 7 = 217 \text{ cm}$$

Comprimento total para a laje = 398 cm (N7)

e) Quantidade de barras positivas e negativas para cada situação

A quantidade de barras (N) é calculada dividindo a distância de eixo a eixo em uma direção pelo espaçamento s adotado, sempre arredondando o número para cima e somando mais uma barra, como na Equação 39.

$$N = \frac{l_{eixo-eixo}}{s} + 1 \quad \text{Eq. 39}$$

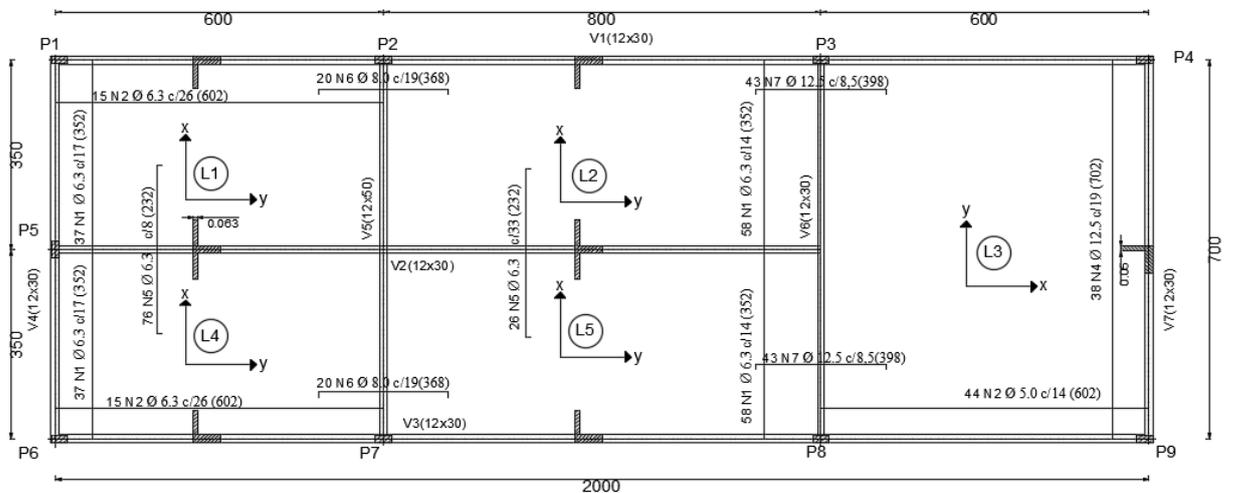
Para cada laje foi calculada a quantidade de barras N na direção x e y para as armaduras negativas e positivas, apresentada no Quadro 12.

Quadro 12 – Quantidade de barras N

Barras	Laje	lx (cm)	ly (cm)	s		N	
				x	y	x	y
Positivas	L1=L4	350	600	17	26	37	15
	L2=L5	350	800	14	-	58	-
	L3	600	700	19	14	38	44
Negativas	L1;L2	350	-	-	19	-	20
	L1;L4		600	8		76	-
	L2;L3	350		8,5		-	43
	L2;L5		800	33		26	-
	L4;L5	350			19	-	20
	L5;L3	350				8,5	-

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Figura 37 – Detalhamento da armadura do pavimento em cm



Fonte: Elaborada pela autora, 2017.

4.1.9 Reações das lajes nas vigas, segundo Carvalho (2012)

As reações nas vigas de contorno são calculadas por meio das Equações 40 a 43.

- Reações nas direções x e y nas vigas em bordas simplesmente apoiadas:

$$r_x = k_x * p * \frac{l_x}{10} \quad \text{Eq. 40}$$

$$r_y = k_y * p * \frac{l_x}{10} \quad \text{Eq. 41}$$

- Reações nas direções x e y nas vigas em bordas engastadas:

$$r'_x = k'_x * p * \frac{l_x}{10} \quad \text{Eq. 42}$$

$$r'_y = k'_y * p * \frac{l_x}{10} \quad \text{Eq. 43}$$

Sabe-se que p é a carga na laje e l_x o seu menor vão. Já o fator k está relacionado com os casos de apoio das lajes e o λ . Os valores de k_x , k_y , k'_x e k'_y estão expressos nos Quadros 23, 24 e 25 no Anexo B.

Utilizando essas Equações para a carga $p = 6,16 \text{ kN/m}^2$, tem-se os valores das reações para cada laje no Quadro 13.

Quadro 13 – Cálculo das reações das lajes nas vigas em kN/m

Laje	Caso	l_x (m)	λ	P (kN/m ²)	pl_x	k_x	r_x	k_y	r_y	k'_x	r'_x	k'_y	r'_y
L1=L4	4	3,5	2	6,16	22	2,75	5,93	1,83	3,95	4,75	10,24	3,17	6,83
L2=L5	7	3,5	2,3	6,16	22	3,66	7,89	-	-	6,34	13,67	3,17	6,83
L3	3	6	2	6,16	37	2,99	11,05	1,83	6,76	5,18	19,15	-	-

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

4.1.10 Verificação quanto ao cisalhamento

a) Verificação da necessidade de armadura de cisalhamento

Essa verificação será feita para a laje L3 que apresenta o maior valor para a reação da força cortante.

Para isso compara-se a força cortante V_{Sd} com a força resistente de projeto ao cisalhamento V_{Rd1} . Se $V_{Sd} \leq V_{Rd1}$ não é necessário armadura de cisalhamento.

Para essa verificação necessita de informações e resultados já calculados:

- Força cortante solicitante: $V_S = 19,15$ kN/m;
- Toda armadura inferior estende-se ao longo das lajes, chegando até o apoio;
- Na laje L3, a armadura longitudinal inferior é composta por barras de \emptyset 12,5 mm (1,23 cm²) a cada 19 cm, resultando em cinco barras por metro.

O valor de V_{Sd} é:

$$V_{Sd} = 1,4 * V_S = 1,4 * 19,15 = 26,81 \text{ kN}$$

O valor de V_{Rd1} é expresso pela Equação 44:

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} * k * (1,2 + 40 * \rho_1) + 0,15 * \sigma_{cp}] * b_w * d \quad \text{Eq. 44}$$

Onde:

$$\tau_{Rd} = 0,25 * f_{ctd} = 0,25 * \frac{f_{ctd,inf}}{\gamma_c} = 0,25 * 0,7 * \frac{f_{ct,m}}{\gamma_c} = 0,25 * 0,7 * 0,3 * \frac{f_{ck}^{2/3}}{\gamma_c}$$

$$\tau_{Rd} = 0,0525 * \frac{30^{2/3}}{1,4} = 0,0525 * 6,90 = 0,362 \text{ MPa} = 362 \text{ kN/m}^2;$$

$$k = 1,6 - d = 1,6 - 0,08 = 1,52 > 1;$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w * d} = \frac{5 * 1,23}{100 * 8} = 0,0077 < 0,02;$$

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

Voltando na Equação 44:

$$V_{Rd1} = [362 * 1,52 * (1,2 + 40 * 0,0077)] * 1,0 * 0,08 = 66,38 \text{ kN}$$

Portanto $V_{Sd} = 26,81 \text{ kN} < V_{Rd1} = 66,38 \text{ kN}$, e não há necessidade de armadura de cisalhamento.

b) Verificação da compressão diagonal do concreto

Essa verificação nas bielas de concreto é feita comparando o V_{Sd} com V_{Rd2} :

$$V_{Sd} = 1,4 * V_S = 1,4 * 19,15 = 26,81 \text{ kN}$$

$$V_{Rd2} = 0,5 * \alpha_{v1} * f_{cd} * b_w * 0,9 * d \quad \text{Eq. 45}$$

$$\text{Onde: } \alpha_{v1} = \left(0,7 - \frac{f_{ck}}{200}\right) = \left(0,7 - \frac{30}{200}\right) = 0,55 > 0,5 \rightarrow \alpha_{v1} = 0,5;$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{30000}{1,4} = 21428 \text{ kN/m}^2.$$

Calculando na Equação 45:

$$V_{Rd2} = 0,5 * 0,5 * 21428 * 1,0 * 0,9 * 0,08 = 385,7 \text{ kN}$$

Como V_{Sd} é menor que V_{Rd2} , não há problemas de compressão excessiva nas bielas de concreto.

4.1.11 Volume de concreto (m³)

Para o cálculo de volume do concreto necessário para cada laje maciça (V_{CLM}), multiplica-se a área da laje pela sua espessura, como na Equação 46:

$$V_{CLM} = A * h \quad \text{Eq. 46}$$

Depois se calcula a quantidade de concreto para as vigas, o volume se dá multiplicando a área de seção da viga pelo seu comprimento, considerando a espessura da laje já calculada.

Área das vigas:

$$V_{CV} = 0,12 * (0,30 - 0,12) = 0,0216$$

Usando a Equação 46 e a área das vigas, calcula-se o volume para cada uma e soma para obter o volume do concreto para cada laje no Quadro 14.

Quadro 14 – Volume de concreto necessário para a laje maciça

Laje	Área (m ²)	h (m)	Vol laje (m ³)	Área viga (m ²)	Comp (m)	Vol vig (m ³)	Vol total
L1=L4	21	0,12	2,52	0,0216	19	0,4104	2,9304
L2=L5	28	0,12	3,36	0,0216	23	0,4968	3,8568
L3	42	0,12	5,04	0,0216	26	0,5616	5,6016

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

5 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO TIPO PARA LAJES NERVURADAS

Para o dimensionamento e detalhamento das lajes nervuradas (LN) será utilizado o mesmo exemplo de pavimento tipo para o cálculo das lajes maciças no Capítulo 4.

Considerar:

- Blocos cerâmicos de 9x19x19 (4 blocos/nervura);
- Peso específico do tijolo: 13 kN/m³ (Ver Tabela 3 no Anexo A);
- $F_{ck} = 30$ MPa

5.1 PARA LAJES NERVURADAS

5.1.1 Esquema estrutural e direção das nervuras das lajes

O esquema estrutural e a classificação das lajes são as mesmas das maciças para as nervuradas. Quanto às direções das nervuras, são paralelas ao menor lado das vigas.

Para as lajes L1=L4 e L2=L5 as nervuras estão em direção a $l_x = 3,5$ m, e para a laje L3 as nervuras são paralelas a $l_x = 6$ m.

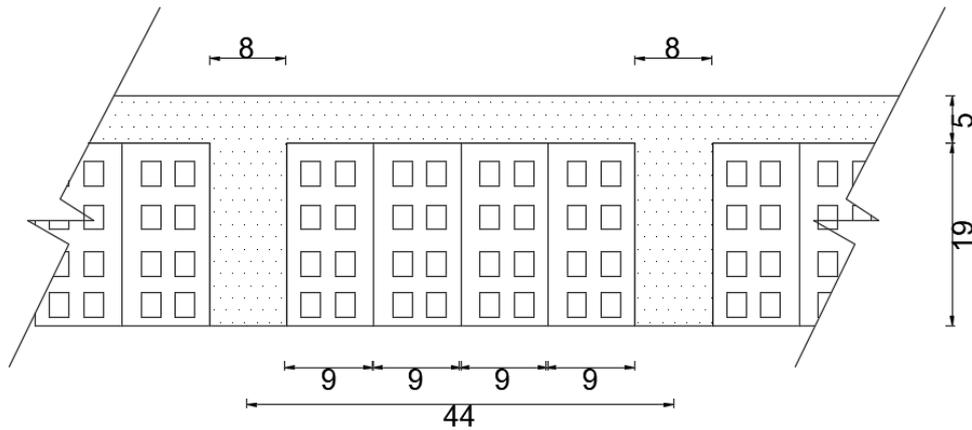
5.1.2 Pré-dimensionamento

- Espessura das nervuras
 $b_w = 8$ cm
- Espessura da mesa
 $h_f = 5$ cm (maior que 4 cm e $44/15 = 2,9$ cm)
- Espaçamento entre nervuras
 $l_0 = 36$ cm (4 blocos de 9 cm)
- Altura da laje
 $h = 24$ cm ($h_f = 5$ cm mais a altura do bloco de 19 cm)

- Altura útil da laje

$$d = 20,9 \text{ cm} \quad (h = 24 \text{ cm} \text{ menos o cobrimento de } 2,5 \text{ cm} - \varnothing 12 \text{ mm} = 0,6 \text{ cm})$$

Figura 38 – Seção transversal adotada para a laje nervurada



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

5.1.3 Vãos efetivos

Utilizando a Equação 16 do item 3.3 temos que:

$$l_{ef} = l_0 + a_1 + a_2 = 36 + 4 + 4 = 44 \text{ cm}$$

Com:

$$a_1 \leq \left\{ \begin{array}{l} \frac{8}{2} = 4 \\ 0,3 * 24 = 7,2 \end{array} \right\} \text{ e } a_2 \leq \left\{ \begin{array}{l} \frac{8}{2} = 4 \\ 0,3 * 24 = 7,2 \end{array} \right\}$$

5.1.4 Determinação das cargas atuantes

- a) Cargas permanentes

Assim como já foi calculado para as lajes maciças calcula-se para cada nervura.

- Peso próprio - g_{pp}

$$\text{Concreto} = (0,08 * 0,19 + 0,45 * 0,05) * 25 = 0,94 \text{ kN/m/nervura}$$

$$\text{Tijolo} = (0,36 * 0,19) * 13 = 0,89 \text{ kN/m/nervura}$$

$$g_{pp} = 1,83 \text{ kN/m/nervura}$$

➤ Revestimentos - g_{rev}

A soma das cargas do contrapiso, piso e revestimento inferior é igual a 1,16 kN/m², já calculado para as lajes maciças, e agora para cada nervura.

$$g_{rev} = 1,16 * 0,45 = 0,522 \text{ kN/m/nervura}$$

b) Carga acidental

A sobrecarga da laje obedece ao critério de escritórios e banheiros. $g_{sob} = 2 \text{ kN/m}^2$

$$g_{sob} = 2 * 0,45 = 0,9 \text{ kN/m/nervura}$$

c) Carga total

Como não há paredes sobre as lajes no projeto deste pavimento a carga de $g_{par} = 0 \text{ kN/m}^2$.

Tendo assim a carga total para todas as lajes:

$$P_{tot} = 1,83 + 0,522 + 0 + 0,9 = 3,252 \text{ kN/m/nervura}$$

5.1.5 Cálculo da armadura longitudinal (ELU)

a) Largura colaborante

Considerando a nervura com seção T, deve-se calcular a largura colaborante segundo a NBR 6118/14 (ABNT, 2014), utilizando a Equação 47.

$$b_f = b_w + 2 * b_1 \quad \text{Eq. 47}$$

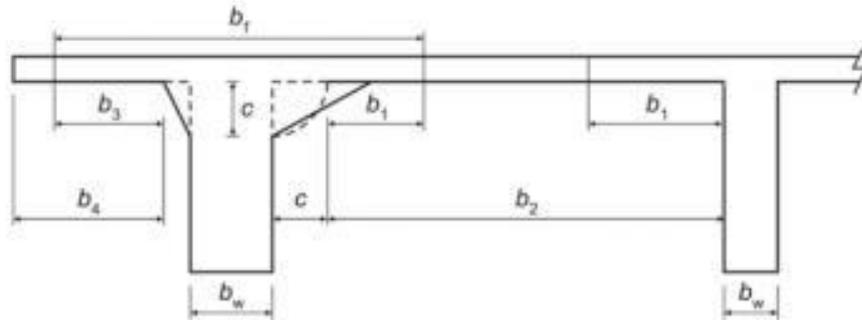
Onde: $b_w = 8 \text{ cm}$ é a largura da alma da seção;

$$b_1 \leq \begin{cases} 0,1 * a \\ 0,5 * b_2 \end{cases}$$

Segundo a NBR 6118/14 (ABNT, 2014), para calcular b_1 sabe-se que:

- Viga simplesmente apoiada: $a = 1,00 l$;
- Tramo com momento em uma só extremidade: $a = 0,75 l$;
- Tramo com momentos nas duas extremidades: $a = 0,60 l$;
- Tramo em balanço: $a = 2,00 l$.

Figura 39 – Largura da mesa colaborante



Fonte: Calheiros, 2013.

Sabendo que a direção das nervuras é paralela ao menor vão da laje, e que as lajes L1=L4 estão classificadas com momento em uma só extremidade, L2=L5 com momentos nas duas extremidades e L3 com viga simplesmente apoiada, tem-se os valores para a largura colaborante no Quadro 14.

Quadro 15 – Valores da largura colaborante (b_f)

Laje	k (cm)	a	b2	b1		bw	bf (cm)
				0,5*b2	0,1*a		
L1=L4	350	262,5	36	18	26,25	8	44
L2=L5	350	210	36	18	21	8	44
L3	600	600	36	18	60	8	44

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

b) Cálculo do máximo momento fletor atuando em uma armadura

Utilizando as Equações do item 4.1.6 do Capítulo 4, calculam-se os momentos nas lajes em cada nervura. (Ver Quadro 16)

Quadro 16 – Cálculo dos momentos máximos em kNm/nervura

Laje	Caso	lx (m)	λ	P (kN/m/n)	pl _x ²	μ _x	m _x	μ _y	m _y	μ' _x	m' _x	μ' _y	m' _y
L1=L4	4	3,5	2	3,252	40	5,74	2,29	1,88	0,75	11,89	4,74	8,2	3,27
L2=L5	7	3,5	2,3	3,252	40	-	1,66	-	-	-	3,32	-	-
L3	3	6	2	3,252	117	6,51	7,62	1,48	1,73	12,34	14,45	-	-

Fonte: Elaborado pela autora.

Usando as fórmulas de Carvalho e Figueiredo Filho (2007), verifica-se a linha neutra da laje nervurada, Equação 35 do Capítulo anterior.

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

Após calcular o KMD encontra-se o seu respectivo KX na Tabela 7 no Anexo A para o cálculo da posição da linha neutra, na Equação 48.

$$x = KX * d \quad \text{Eq. 48}$$

Se $x < h_f = 0,05$ m, a linha neutra passa na mesa.

Quadro 17 – Cálculo da posição da linha neutra

Laje	L1=L4				L2=L5				L3			
Classif.	2D				1D				2D			
Mom.	M _x	M _y	M' _x	M' _y	M _x	M _y	M' _x	M' _y	M _x	M _y	M' _x	M' _y
kNm/ner	2,29	0,75	4,74	3,27	1,66	-	3,32	-	7,62	1,73	14,45	-
M _d	3,206	1,050	6,636	4,578	2,324	-	4,648	-	10,668	2,422	20,23	-
KMD	0,023	0,008	0,048	0,033	0,017	-	0,034	-	0,078	0,018	0,148	-
KX	0,068	0,012	0,111	0,088	0,056	-	0,089	-	0,154	0,058	0,244	-
d (m)	0,209	0,209	0,209	0,209	0,209	-	0,209	-	0,209	0,209	0,209	-
x (m)	0,014	0,003	0,023	0,018	0,012	-	0,019	-	0,032	0,012	0,050	-

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Analisando os resultados para a linha neutra, todas as linhas passam na mesa.

- c) Quantidade da armadura longitudinal A_s (CA-50, $f_{yd} = 50 \text{ kN/cm}^2$)

Utilizando o Quadro 17 com os valores de M_d e KMD encontra-se os valores de KZ utilizando a Tabela 7 no Anexo A, aplicados na Equação 36 para o cálculo da área de aço. (Ver Quadro 18)

Quadro 18 – Valores da área de aço em $\text{cm}^2/\text{nervura}$

Laje	L1=L4				L2=L5				L3			
Classif.	2D				1D				2D			
Mom.	Mx	My	M'x	M'y	Mx	My	M'x	M'y	Mx	My	M'x	M'y
kNm/m	2,29	0,75	4,74	3,27	1,66	-	3,32	-	7,62	1,73	14,45	-
Md	3,206	1,050	6,636	4,578	2,324	-	4,648	-	10,668	2,422	20,23	-
Kmd	0,023	0,008	0,048	0,033	0,017	-	0,034	-	0,078	0,018	0,148	-
Kz	0,986	0,995	0,917	0,94	0,989	-	0,979	-	0,951	0,989	0,903	-
As	0,358	0,116	0,796	0,536	0,259	-	0,522	-	1,234	0,270	2,465	-

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Admitindo armaduras de $\varnothing 12,5 \text{ mm}$ com espaçamento de 7 cm em cada nervura.

5.1.6 Verificação do estado de deformação excessiva (ELS-DEF)

- a) Módulo de elasticidade

Como já calculado no item 4.1.5 por meio da Equação 19:

$$E_{cs} = 0,85 * 5.600 * \sqrt{30} = 26.072 \text{ MPa} = 26.072.000 \text{ kN/m}^2$$

- b) Coeficiente de homogeneização da seção

É a relação entre os módulos de elasticidade do aço e do concreto.

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} = \frac{210.000}{26.072} = 8,05$$

- c) Momento de inércia da nervura em relação ao eixo horizontal

Considerada como viga T, calcula-se o momento de inércia em relação a um eixo horizontal no centro de gravidade da seção no estágio II.

$$y_{cg} = \frac{0,44 * 0,05 * 0,03 + 0,08 * 0,19 * 0,155}{0,44 * 0,05 + 0,08 * 0,19} = 0,081 \text{ m}$$

Medido a partir da borda superior:

$$I_b = \frac{0,44 \cdot 0,05^3}{12} + 0,44 \cdot 0,05 \cdot (0,081 - 0,03)^2 + \frac{0,08 \cdot 0,19^3}{12} + 0,08 \cdot 0,19 \cdot (0,0155 - 0,081)^2 = 1,72 \cdot 10^{-4} m^4$$

d) Cálculo do momento de fissuração

Calcula-se o momento de fissuração para todas as lajes pela Equação 49 e compara com o momento atuante devido ao peso próprio.

$$M_r = \frac{\alpha \cdot f_{ct,m} \cdot I}{\gamma_t} \quad \text{Eq. 49}$$

Onde: $\gamma_t = 0,24 - 0,081 = 0,159 \text{ m}$ (tração na borda inferior);

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{30^2} = 2,90 \text{ MPa} = 2900 \text{ kN/m}^2;$$

$$\alpha = 1,2 \text{ (seção T)}.$$

Resolvendo a Equação 49:

$$M_r = \frac{1,2 \cdot 2900 \cdot 1,72 \cdot 10^{-4}}{0,159} = 3,76 \text{ kN/m/nervura}$$

Considerando apenas o peso próprio da laje, a carga é $g_{pp} = 1,83 \text{ kN/m}$ e o momento atuante M_{g1} para o menor lado da maior laje, ou seja L3, $l_x = 6 \text{ m}$:

$$M_{g1} = \mu_x \cdot \frac{p \cdot l^2}{100} = 6,51 \cdot \frac{1,83 \cdot 6^2}{100} = 4,29 \text{ kNm/nervura}$$

Como $M_{g1} > M_r$, após a retirada do escoramento, a seção central já estará aplicada no estágio II, sendo necessário o cálculo da inércia equivalente segundo a NBR 6118/14 (ABNT, 2014).

e) Cálculo da inércia no estágio II puro

Ainda para a laje com maior momento L3, determina a posição da linha neutra no estágio II, supondo que ela esteja na mesa da seção, tem-se:

$$a_1 = \frac{b_w}{2} = 22 \text{ cm};$$

$$a_2 = \alpha_e * A_s = 8,05 * 2,465 = 19,84 \text{ cm}^2;$$

$$a_3 = -d * \alpha_e * A_s = -20,9 * 19,84 = -414,65 \text{ cm}^3;$$

Cálculo da posição da linha neutra na Equação 50:

$$x_{II} = \frac{-a_2 + \sqrt{(a_2)^2 - 4 * a_1 * a_3}}{2 * a_1} \quad \text{Eq. 50}$$

Calculando:

$$= \frac{-19,84 + \sqrt{19,84^2 - 4 * 22 * (-414,65)}}{2 * 22} = 0,039 \text{ m}$$

$x_{II} = 3,9 \text{ cm} < h_f = 5 \text{ cm}$, então a linha neutra passa na mesa.

A inércia no estádio II calcula-se por meio da Equação 51:

$$I_{II0} = \frac{b_f * (x_{II})^3}{3} + \alpha_e * A_s * (d - x_{II})^2 \quad \text{Eq. 51}$$

Resolvendo a Equação 51:

$$I_{II0} = \frac{44 * (3,9)^3}{3} + 8,05 * 2,465 * (20,9 - 3,9)^2 = 6604,7 \text{ cm}^4$$

$$I_{II0} = 0,6604 * 10^{-4} \text{ m}^4$$

5.1.7 Cálculo da armadura de cisalhamento

O ideal para uma laje nervurada é que ela não necessite de armadura de cisalhamento, isso se $\tau_{sd} \leq \tau_{Rd1}$, ou seja, se a tensão de cisalhamento devida a V_{sd} for menor que aquela resistida pelo concreto.

V_{sd} é igual a reação de cada nervura nas vigas de apoio, para o carregamento total de 3,252 kN/m em uma nervura e o vão de 6 m para a laje L3 com maior reação à força.

$$V_{Sd} = \frac{3,252 \cdot 6}{2} = 9,756 \text{ kN}$$

$$\tau_{Sd} = \frac{1,4 \cdot 9,5}{0,08 \cdot 0,209} = 795,45 \text{ kN/m}^2$$

A resistência de projeto ao cisalhamento é dada pela Equação 52:

$$\tau_{Rd1} = [\tau_{Rd} * k * (1,2 + 40 * \rho_1)] \quad \text{Eq. 52}$$

Onde: $\tau_{Rd} = 362 \text{ kN/m}^2$ já calculado no item 4.1.10;

$$k = 1,6 - d = 1,6 - 0,209 = 1,391 > 1;$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w * d} = \frac{2,465}{8 * 20,9} = 0,015$$

Resolvendo a Equação 52:

$$\tau_{Rd1} = [362 * 1,391 * (1,2 + 40 * 0,015)] = 906,37 \text{ kN/m}^2$$

Como $\tau_{Sd} = 795,45 \text{ kN/m}^2 < \tau_{Rd1} = 906,37 \text{ kN/m}^2$, não há necessidade de armadura transversal.

5.1.8 Volume de concreto (m³)

Para calcular o volume de concreto necessário para a laje nervurada, leva-se em consideração o volume da mesma laje já calculado para a maciça menos o volume do espaçamento entre as nervuras que não estão preenchidos com concreto, como na Equação 53.

$$V_{CLN} = V_{CLM} - Q_{BC} * V_{BC} \quad \text{Eq. 53}$$

Onde: V_{CLM} é o volume de concreto da laje maciça, já calculado anteriormente;

Q_{BC} é a quantidade de blocos cerâmicos em todas as nervuras;

V_{BC} é o volume de cada bloco cerâmico.

Como as nervuras estão no sentido da menor direção, calcula-se o volume para cada bloco vezes a quantidade aplicada nela.

O Volume das vigas ainda é o mesmo para todas elas como já calculado no item 4.1.1 do Capítulo 4. Assim temos o volume total para aplicar o concreto nas lajes nervuradas com preenchimento de blocos cerâmicos no Quadro 19.

Quadro 19 – Volume de concreto necessário para a laje nervurada

Laje	V _{CLM} (m ³)	Q _{BC}	V _{BC} (m ³)	V _{EL} (m ³)	V _{CLN} (m ³)	Vol vg (m ³)	Vol total
L1=L4	2,52	434	0,001539	0,667926	2,282994	0,4104	2,69339
L2=L5	3,36	558	0,001539	0,858762	3,047583	0,4968	3,54438
L3	5,04	970	0,001539	1,49283	4,479804	0,5616	5,0414

Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em um projeto estrutural, as lajes são os elementos que mais consomem materiais pensando nisso o uso de lajes nervuradas cresceu significativamente devido ao seu peso estrutural ser menor em diversos casos.

As lajes nervuradas têm como função reduzir a utilização de concreto e armaduras de aço, porém para ela ser realmente a mais econômica o consumo de fôrmas para as nervuras não deve ser alto.

Para o pavimento tipo utilizado neste trabalho, escolheu-se o preenchimento entre nervuras de blocos cerâmicos furados, pois este material já está disponível no canteiro de obra por ser utilizado nas paredes de fechamento e divisórias da edificação. Este tipo de material reduz o consumo de fôrmas e beneficia o custo da obra.

Demonstra-se através da análise do estudo de caso apresentado neste trabalho uma comparação entre o consumo de materiais para lajes maciças e nervuradas. Apesar de as LM resistirem a um maior momento em seu pior caso que foi na laje L3, as LN podem suportar cargas mais elevadas devido ao seu peso próprio ser menor. Devido a isso a sua resistência ao cisalhamento é consideravelmente duas vezes maior que a das lajes maciças.

Ainda analisando os cálculos, observa-se que o consumo de armaduras de aço para as lajes nervuradas foi menor do que para as lajes maciças por utilizar apenas duas barras de armadura longitudinal em cada nervura.

Comparando os cálculos realizados nos item 4.1.11 e 5.1.8, quanto ao volume necessário para a concretagem do pavimento, houve uma economia de 1 m³ de concreto, reduzindo assim o peso estrutural. No entanto como foram utilizados blocos cerâmicos para as lajes nervuradas o seu peso aumenta, porém não como se os espaçamentos fossem cheios de concreto como nas maciças, pois os blocos ainda são mais leves.

Com base em todas as observações feitas ao longo do trabalho, seria mais vantajoso utilizar cubetas de plásticos reutilizáveis entre as nervuras, pois assim o peso da estrutura seria mais leve.

Também seria interessante mudar a estrutura do projeto alterando a posição das vigas, já que as lajes nervuradas comportam vãos bem maiores do que as maciças, entretanto ao fazer isso a resistência quanto ao cisalhamento reduziria, mas não deixando de ser mais vantajosa do que as lajes maciças.

Considerando todos os tópicos de comparativo, conclui-se que para este pavimento tipo a laje nervurada com preenchimento de blocos cerâmicos é mais econômica do que

utilizar a laje maciça. O consumo de materiais como armadura de aço e concreto foram reduzidos, e ao colocar os blocos cerâmicos desde que eles estejam vedados com argamassa, funcionam como um isolante térmico melhor do que o concreto. O peso estrutural dos blocos cerâmicos das lajes nervuradas é mais leve que o do concreto nas lajes maciças. O peso das lajes nervuradas pode ser reduzido mais ainda se forem utilizadas cubetas de plástico como formas. Isto pode aumentar capacidade da laje nervurada poder resistir a maiores cargas acidentais.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Augusto Teixeira de; PINHEIRO, Libânio Miranda. **Viabilidade econômica de alternativas estruturais de concreto armado para edifícios**. 2002. 220 f. Curso de Engenharia Civil, Engenharia de Estruturas, USP, São Carlos, 2002
- ARAÚJO, Anderson da Rosa. **Estudo técnico comparativo entre pavimentos executados com lajes nervuradas e lajes convencionais**. 2008. 150 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2008.
- ARAÚJO, José Milton de. **Projeto estrutural de edifícios de concreto armado**. 2. ed. Rio Grande: Dunas, 2009. 224 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 256 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Cargas para o cálculo de estrutura de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1980. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 15 p.
- ÁVILA, Clara. **Laje Nervurada**. 2015. Disponível em: <<https://blogdopetcivil.com/2015/01/14/laje-nervurada/>>. Acesso em: 03 set. 2017.
- BASTOS, Prof. Dr. Paulo Sérgio dos Santos. **Lajes de Concreto**. Bauru: UNESP, 2015. 119 p.
- BOCCHI JUNIOR, Carlos Fernando. **Lajes Nervuradas de concreto armado: projeto e execução**. 1995. 204 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.
- BOCCHI JUNIOR, Carlos Fernando; GIONGO, José Samuel. **Concreto armado: projeto e construção de lajes nervuradas**. 2007. 53 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- BONAFÉ, Gabriel. **Lajes nervuradas garantem economia à construção**. 2017. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/lajes-nervuradas-garantem-economia-a-construcao_11026_0_1>. Acesso em: 01 jun. 2017.
- BRUMATTI, Dioni O.. **USO DE PRÉ-MOLDADOS MOLDADOS MOLDADOS - ESTUDO E ESTUDO E VIABILIDADE**. 2008. 54 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Vitória, 2008.
- CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**. 3. ed. São Carlos: Edufcar, 2012. 367 p.
- CARVALHO, Roberto Chust; PINHEIRO, Libânio Miranda. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado: Volume 2**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2013. 617 p.

EDIFICAM. **Laje Cogumelo**. 2013. Disponível em: <<http://edificam.blogspot.com.br/2013/01/laje-cogumelo.html>>. Acesso em: 27 set. 2017.

KUPINSKI, Rodrigo. **Lajes nervuradas**. 2011. Disponível em: <<http://construcaoengineharia.blogspot.com.br/2011/09/lajes-nervuradas.html>>. Acesso em: 28 out. 2017.

LOPES, André F. de O.; BONO, Giuliana F. F.; BONO, Gustavo. **Análise numérica comparativa entre lajes maciças e nervuradas com diferentes tipos de materiais de enchimento**. Associação Argentina de Mecânica Computacional, Mendoza, v. 32, n. 10, p.3483-3495, 19 nov. 2013.

LOPES, André Felipe de Oliveira. **Estudo técnico comparativo entre lajes maciças e nervuradas com diferentes tipos de enchimento**. 2012. 131 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

MARINO, M. UFPR. **Análise comparativa de normas para o cálculo de lajes submetidas ao efeito da punção**. 2015. Disponível em: <<http://www.estruturas.ufpr.br/analise-comparativa-de-normas-para-o-calculo-de-lajes-submetidas-ao-efeito-da-puncao/>>. Acesso em: 29 set. 2017.

NAKAMURA, Juliana. **Cobrimento de armaduras**. 2011. Disponível em: <<http://equipedeobra.pini.com.br/construcao-reforma/45/artigo250451-2.aspx>>. Acesso em: 20 maio 2017.

NOGUEIRA, Dorival Jorge Lacerda; CASTRO, Fábio dos Santos. **Sistemas Estruturais de Lajes: Parâmetros de escolha da solução estrutural de lajes**. 2010. 133 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Ccet, Universidade da Amazônia, Belém, 2010. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/6288702/sistemas-estruturais-lajes>>. Acesso em: 02 set. 2017.

PARSEKIAN, Eng. Guilherme Aris. **Cálculo e armação de lajes de concreto armado com a consideração do momento volvente**. 1996. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Usp, São Carlos, 1996.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P.. **Lajes Maciças**. São Carlos: EESC, 2010. 29 p.

PINHEIRO, Libânio M.; RAZENTE, Julio A.. **Lajes Nervuradas**. São Carlos: EESC, 2003. 18 p.

PORTAL PLANALTO. **Setor da construção civil aposta em crescimento e geração de empregos com mudanças no MCMV**. 2017. Disponível em: <<http://www2.planalto.gov.br/acompanhe-planalto/noticias/2017/02/setor-da-construcao-civil-aposta-em-crescimento-e-geracao-de-empregos-com-mudancas-no-mcmv>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

RESTELLI, Ana Paula. **Laje Nervurada - Processo Construtivo**. 2011. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/eso/content/?p=752>>. Acesso em: 08 set. 2017.

ROSSI, Fabrício. **Laje Nervurada, passo a passo!** 2014. Disponível em: <<http://pedreiro.com.br/laje-nervurada-passo-a-passo/>>. Acesso em: 09 set. 2017.

SOUZA, Caroline Gonçalves Silva e; LOPES, Rayane Campos. **Estudo comparativo entre laje maciça convencional e lajes nervuradas.** 2016. 134 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

VASCONCELLOS, Prof. Arq. Juliano. **Lajes Maciças de Concreto Armado.** 2012. Disponível em: <<https://cddcarqfevale.wordpress.com/2012/04/03/lajes-macicas-de-concreto-armado/>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

VASQUES, David de Souza; DIOGO, Maísa Mendes. **Desenvolvimento de software didático para análise de estruturas de concreto armado.** 2017. 105 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unievangélica, Anápolis, 2017.

VENTURINI, Jamila. **Lajes nervuradas.** 2011. Disponível em: <<http://equipedeobra.pini.com.br/construcao-reforma/38/lajes-nervuradas-225239-1.aspx>>. Acesso em: 11 set. 2017.

ANEXO A - Tabelas

Tabela 3- Peso específico dos materiais de construção

Materiais		Peso específico aparente (kN/m ³)
1 Rochas	Arenito	26
	Basalto	30
	Gneiss	30
	Granito	28
	Mármore e calcáreo	28
2 Blocos artificiais	Blocos de argamassa	22
	Cimento amianto	20
	Lajotas cerâmicas	18
	Tijolos furados	13
	Tijolos maciços	18
	Tijolos sílico-calcáreos	20
3 Revestimentos e concreto	Argamassa de cal, cimento e areia	19
	Argamassa de cimento e areia	21
	Argamassa de gesso	12,5
	Concreto simples	24
	Concreto armado	25
4 Madeiras	Pinho, cedro	5
	Louro, imbuia, pau óleo	6,5
	Guajuvirá, guatambu, grápia	8
	Angico, cabriuva, ipê róseo	10
5 Metais	Aço	78,5
	Alumínio e ligas	28
	Bronze	85
	Chumbo	114
	Cobre	89
	Ferro fundido	72,5
	Estanho	74
	Latão	85
	Zinco	72
6 Materiais diversos	Alcatrão	12
	Asfalto	13
	Borracha	17
	Papel	15
	Plástico em folhas	21
	Vidro plano	26

Fonte: Tabela 1 da NBR 6120/80,(ABNT,2014).

Tabela 4- Valores mínimos das cargas verticais

		(continua)
	Local	Carga (kN/m ²)
1	Arquibancadas	4
2	Balcões	-
3	Bancos	2
	Escritórios e banheiros Salas de diretoria e de gerência	1,5
4	Bibliotecas	2,5
	Sala de leitura	4
	Sala para depósito de livros Sala com estantes de livros a ser determinada em cada caso ou 2,5 kN/m ² por metro de altura observado, porém o valor mínimo de	6
5	Casas de máquinas	7,5
6	Cinemas	3
	Platéia com assentos fixos	4
	Estúdio e platéia com assentos móveis Banheiro	2
7	Clubes	3
	Sala de refeições e de assembleia com assentos fixos	4
	Sala de assembleia com assentos móveis	5
	Salão de danças e salão de esportes Sala de bilhar e banheiro	2
8	Corredores	3
	Com acesso ao público Sem acesso ao público	2
9	Cozinhas não residenciais	3
10	Depósitos	-
11	Edifícios residenciais	3
	Dormitórios, sala, copa, cozinha e banheiro Dispensa, área de serviço e lavanderia	2
12	Escadas	3
	Com acesso ao público (ver 2.2.1.7) Sem acesso ao público	2,5
13	Escolas	3
	Anfiteatro com assentos fixos	2
	Corredor e sala de aula Outras salas	2
14	Escritórios	2
15	Forros	0,5
16	Galerias de arte	3
17	Galerias de lojas	3
18	Garagens e estacionamentos	3
19	Ginásios de esportes	5

		(conclusão)
Local		Carga (kN/m ²)
20 Hospitais	Dormitórios, enfermarias, sala de recuperação, sala de cirurgia, sala de raio X e banheiro	2
	Corredor	3
21 Laboratórios	Incluindo equipamentos, a ser determinado em cada caso, porém com o mínimo	3
22 Lavanderias	Incluindo equipamentos	3
23 Lojas		4
24 Restaurantes		3
25 Teatros	Palco	5
	Demais dependências: cargas iguais às especificadas para cinemas	-
26 Terraços	Sem acesso ao público	2
	Com acesso ao público	3
	Inacessível a pessoas	0,5
	Destinados a heliportos elevados: as cargas deverão ser fornecidas pelo órgão competente do Ministério da Aeronáutica	-
27 Vestíbulo	Sem acesso ao público	1,5
	Com acesso ao público	3

2.2.1.3 No caso de armazenagem em depósitos e na falta de valores experimentais, o peso dos materiais armazenados pode ser obtido através dos pesos específicos aparentes que constam na Tabela 3.

2.2.1.5 Ao longo dos parapeitos e balcões devem ser consideradas aplicadas uma carga horizontal de 0,8 kN/m na altura do corrimão e uma carga vertical mínima de 2 kN/m.

2.2.1.6 O valor do coeficiente ϕ de majoração das cargas acidentais a serem consideradas no projeto de garagens e estacionamentos para veículos deve ser determinado do seguinte modo: sendo l o vão de uma viga ou o vão menor de uma laje; sendo o $l_0 = 3$ m para o caso das lajes e o $l_0 = 5$ m para o caso das vigas, tem-se:

- a) $\phi = 1,00$quando o $l \geq l_0$;
- b) $\phi = \frac{l_0}{l} \leq 1,43$ quando o $l \geq l_0$.

Nota: O valor de ϕ não precisa ser considerado no cálculo das paredes e pilares.

2.2.1.7 Quando uma escada for constituída por degraus isolados, estes devem ser calculados para suportarem uma carga concentrada de 2,5 kN, aplicada na posição mais desfavorável. Este carregamento não deve ser considerado na composição de cargas das vigas que suportam os degraus, as quais devem ser calculadas para carga indicada na Tabela 2.

Tabela 5 – Área de aço para relação espaçamento/bitola (cm²/m)

Esp. s (cm)	Bitola				
	5	6,3	8	10	12,5
7,0	2,80	4,45	7,18	11,22	17,53
7,5	2,62	4,16	6,70	10,47	16,36
8,0	2,45	3,90	6,28	9,82	15,34
8,5	2,31	3,67	5,91	9,24	14,44
9,0	2,18	3,46	5,59	8,73	13,64
9,5	2,07	3,28	5,29	8,27	12,92
10	1,96	3,12	5,03	7,85	12,27
11	1,78	2,83	4,57	7,14	11,16
12	1,64	2,60	4,19	6,54	10,23
13	1,51	2,40	3,87	6,04	9,44
14	1,40	2,23	3,59	5,61	8,77
15	1,31	2,08	3,35	5,24	8,18
16	1,23	1,95	3,14	4,91	7,67
17	1,15	1,83	2,96	4,62	7,22
18	1,09	1,73	2,79	4,36	6,82
19	1,03	1,64	2,65	4,13	6,46
20	0,98	1,56	2,51	3,93	6,14
21	0,93	1,48	2,39	3,74	5,84
22	0,89	1,42	2,28	3,57	5,58
23	0,85	1,36	2,19	3,41	5,34
24	0,82	1,30	2,09	3,27	5,11
25	0,79	1,25	2,01	3,14	4,91
26	0,76	1,20	1,93	3,02	4,72
27	0,73	1,15	1,86	2,91	4,55
28	0,70	1,11	1,80	2,80	4,38
29	0,68	1,07	1,73	2,71	4,23
30	0,65	1,04	1,68	2,62	4,09

Fonte: ARÁUJO, 2010 – Adaptada.

Tabela 6 – Valores de ρ_{\min} (%)

f_{ck}	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
ρ_{\min}	0,15	0,15	0,15	0,165	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256

Fonte: Adaptado da Tabela 17.3, NBR 6118/14(ABNT,2014).

Tabela 7 – Tabela de dimensionamento de seção retangular com diagrama retangular de acordo com a NBR 6118 (continua)

KMD	Kx	Kz	DOMÍNIO		
0,000	0,000	1,000			
0,005	0,007	0,997			
0,010	0,015	0,994			
0,015	0,022	0,991			
0,020	0,030	0,988			
0,025	0,037	0,985			
0,030	0,045	0,982			
0,035	0,053	0,979			
0,040	0,060	0,976			
0,045	0,068	0,973			
0,050	0,076	0,970			
0,055	0,084	0,967			
0,060	0,092	0,963			
0,065	0,100	0,960			
0,070	0,108	0,957			
0,075	0,116	0,954			
0,080	0,124	0,950			
0,085	0,132	0,947			
0,090	0,140	0,944			
0,095	0,149	0,941			
0,100	0,157	0,937			
0,105	0,165	0,934			
0,110	0,174	0,930			
0,115	0,182	0,927			
0,120	0,191	0,924			
0,125	0,200	0,920			
0,130	0,209	0,917			
0,135	0,217	0,913			
0,140	0,226	0,909			
0,145	0,235	0,906			
0,150	0,244	0,902			
0,155	0,254	0,899			
0,158	0,259	0,896			
0,160	0,263	0,895			
0,165	0,272	0,891			
0,170	0,282	0,887			
0,175	0,291	0,883			
0,180	0,301	0,880			
0,185	0,311	0,876			
			DOMÍNIO 2 - CA25 / CA50 / CA60		
			DOMÍNIO 3 - CA25	DOMÍNIO 3 - CA50	DOMÍNIO 3 - CA60

(conclusão)

KMD	Kx	Kz	DOMÍNIO		
0,190	0,320	0,872			
0,195	0,330	0,868			
0,200	0,340	0,864			
0,205	0,351	0,860			
0,210	0,361	0,856			
0,215	0,371	0,851			
0,220	0,382	0,847			
0,225	0,392	0,843			
0,230	0,403	0,839			
0,235	0,414	0,834			
0,240	0,425	0,830			
0,245	0,436	0,825			
0,246	0,439	0,824			
0,250	0,448	0,821			
0,255	0,459	0,816			
0,260	0,471	0,812			
0,265	0,483	0,807			
0,270	0,495	0,802			
0,275	0,507	0,797			
0,280	0,520	0,792			
0,285	0,532	0,787			
0,290	0,545	0,782			
0,295	0,559	0,777			
0,300	0,572	0,771			
0,305	0,586	0,766			
0,310	0,600	0,760			
0,315	0,614	0,754			
0,320	0,629	0,749			
0,325	0,644	0,743			
0,330	0,659	0,736			
0,335	0,675	0,730			
0,340	0,691	0,724			
0,345	0,708	0,717			
0,350	0,725	0,710			
0,355	0,743	0,703			
0,360	0,761	0,696			
0,362	0,769	0,692			
0,365	0,780	0,688			
0,370	0,800	0,680			
0,375	0,821	0,671			
0,380	0,843	0,663			
0,385	0,866	0,653			
0,390	0,891	0,643			
0,395	0,918	0,633			
0,400	0,947	0,621			
0,405	0,978	0,608			
0,408	1,000	0,600			
			DOMÍNIO 3 - CA25	DOMÍNIO 3 - CA50	
				DOMÍNIO 4 - CA50	DOMÍNIO 4 - CA60
			DOMÍNIO 4 - CA25		

Fonte: Prof. Hélio, 2016.

ANEXO B - Quadros

Quadro 20 - Coeficientes μ_x , μ_y , μ'_x e μ'_y para o 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	3,94	8,52	3,94	8,52	3,07
1,05	4,80	4,45	3,42	3,78	8,79	4,19	8,91	2,84
1,10	5,18	4,49	3,77	3,90	9,18	4,43	9,30	2,76
1,15	5,56	4,49	4,14	3,97	9,53	4,64	9,63	2,68
1,20	5,90	4,48	4,51	4,05	9,88	4,85	9,95	2,59
1,25	6,27	4,45	4,88	4,10	10,16	5,03	10,22	2,51
1,30	6,60	4,42	5,25	4,15	10,41	5,20	10,48	2,42
1,35	6,93	4,37	5,60	4,18	10,64	5,36	10,71	2,34
1,40	7,25	4,33	5,95	4,21	10,86	5,51	10,92	2,25
1,45	7,55	4,30	6,27	4,19	11,05	5,64	11,10	2,19
1,50	7,86	4,25	6,60	4,18	11,23	5,77	11,27	2,12
1,55	8,12	4,20	6,90	4,18	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 e Figueiredo, 2012.

Quadro 21 – Coeficientes μ_x , μ_y , μ'_x e μ'_y para o cálculo dos momentos máximos em lajes retangulares uniformemente carregadas (Casos 4, 5 e 6)

λ	Caso 4				Caso 5			Caso 6		
	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ'_x	μ_y
1,00	2,81	6,99	2,81	6,99	2,15	3,17	6,99	3,17	6,99	2,15
1,05	3,05	7,43	2,81	7,18	2,47	3,32	7,43	3,29	7,20	2,07
1,10	3,30	7,87	2,81	7,36	2,78	3,47	7,87	3,42	7,41	1,99
1,15	3,53	8,28	2,80	7,50	3,08	3,58	8,26	3,52	7,56	1,89
1,20	3,76	8,69	2,79	7,63	3,38	3,70	8,65	3,63	7,70	1,80
1,25	3,96	9,03	2,74	7,72	3,79	3,80	9,03	3,71	7,82	1,74
1,30	4,16	9,37	2,69	7,81	4,15	3,90	9,33	3,79	7,93	1,67
1,35	4,33	9,65	2,65	7,88	4,50	3,96	9,69	3,84	8,02	1,59
1,40	4,51	9,93	2,60	7,94	4,85	4,03	10,00	3,90	8,11	1,52
1,45	4,66	10,41	2,54	8,00	5,19	4,09	10,25	3,94	8,13	1,45
1,50	4,81	10,62	2,47	8,06	5,53	4,14	10,49	3,99	8,15	1,38
1,55	4,93	10,82	2,39	8,09	5,86	4,16	10,70	4,03	8,20	1,34
1,60	5,06	10,99	2,31	8,12	6,18	4,17	10,91	4,06	8,25	1,28
1,65	5,16	11,16	2,24	8,14	6,48	4,14	11,08	4,09	8,28	1,23
1,70	5,27	11,30	2,16	8,15	6,81	4,12	11,24	4,12	8,30	1,18
1,75	5,36	11,43	2,11	8,16	7,11	4,12	11,39	4,14	8,31	1,15
1,80	5,45	11,55	2,04	8,17	7,41	4,10	11,43	4,15	8,32	1,11
1,85	5,53	11,57	1,99	8,17	7,68	4,08	11,65	4,16	8,33	1,08
1,90	5,60	11,67	1,93	8,18	7,95	4,04	11,77	4,17	8,33	1,04
1,95	5,67	11,78	1,91	8,19	8,21	3,99	11,83	4,17	8,33	1,01
2,00	5,74	11,89	1,88	8,20	8,47	3,92	11,88	4,18	8,33	0,97
∞	7,06	12,50	1,95	8,20	12,58	4,13	11,88	4,18	8,33	0,97

Fonte: Carvalho e Figueiredo, 2012.

Quadro 22 – Coeficientes μ_x , μ_y , μ'_x e μ'_y para o cálculo dos momentos máximos em lajes retangulares uniformemente carregadas (Casos 7, 8 e 9)

λ	Caso 4				Caso 5			Caso 6		
	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ'_x	μ_y
1,00	2,81	6,99	2,81	6,99	2,15	3,17	6,99	3,17	6,99	2,15
1,05	3,05	7,43	2,81	7,18	2,47	3,32	7,43	3,29	7,20	2,07
1,10	3,30	7,87	2,81	7,36	2,78	3,47	7,87	3,42	7,41	1,99
1,15	3,53	8,28	2,80	7,50	3,08	3,58	8,26	3,52	7,56	1,89
1,20	3,76	8,69	2,79	7,63	3,38	3,70	8,65	3,63	7,70	1,80
1,25	3,96	9,03	2,74	7,72	3,79	3,80	9,03	3,71	7,82	1,74
1,30	4,16	9,37	2,69	7,81	4,15	3,90	9,33	3,79	7,93	1,67
1,35	4,33	9,65	2,65	7,88	4,50	3,96	9,69	3,84	8,02	1,59
1,40	4,51	9,93	2,60	7,94	4,85	4,03	10,00	3,90	8,11	1,52
1,45	4,66	10,41	2,54	8,00	5,19	4,09	10,25	3,94	8,13	1,45
1,50	4,81	10,62	2,47	8,06	5,53	4,14	10,49	3,99	8,15	1,38
1,55	4,93	10,82	2,39	8,09	5,86	4,16	10,70	4,03	8,20	1,34
1,60	5,06	10,99	2,31	8,12	6,18	4,17	10,91	4,06	8,25	1,28
1,65	5,16	11,16	2,24	8,14	6,48	4,14	11,08	4,09	8,28	1,23
1,70	5,27	11,30	2,16	8,15	6,81	4,12	11,24	4,12	8,30	1,18
1,75	5,36	11,43	2,11	8,16	7,11	4,12	11,39	4,14	8,31	1,15
1,80	5,45	11,55	2,04	8,17	7,41	4,10	11,43	4,15	8,32	1,11
1,85	5,53	11,57	1,99	8,17	7,68	4,08	11,65	4,16	8,33	1,08
1,90	5,60	11,67	1,93	8,18	7,95	4,04	11,77	4,17	8,33	1,04
1,95	5,67	11,78	1,91	8,19	8,21	3,99	11,83	4,17	8,33	1,01
2,00	5,74	11,89	1,88	8,20	8,47	3,92	11,88	4,18	8,33	0,97
∞	7,06	12,50	1,95	8,20	12,58	4,13	11,88	4,18	8,33	0,97

Fonte: Carvalho e Figueiredo, 2012.

Quadro 23 – Coeficientes k_x , k_y , k'_x e k'_y para o cálculo das reações nas vigas de apoio de em lajes retangulares uniformemente carregadas (Casos 1, 2 e 3)

λ	Caso 1		Caso 2			Caso 3		
	k_x	k_y	k_x	k_y	k'_y	k_x	k'_x	k_y
1,00	2,50	2,50	1,83	2,32	4,02	2,32	4,02	1,83
1,05	2,62	2,50	1,92	2,37	4,10	2,38	4,13	1,83
1,10	2,73	2,50	2,01	2,41	4,17	2,44	4,23	1,83
1,15	2,83	2,50	2,10	2,44	4,22	2,50	4,32	1,83
1,20	2,92	2,50	2,20	2,46	4,27	2,54	4,41	1,83
1,25	3,00	2,50	2,29	2,48	4,30	2,59	4,48	1,83
1,30	3,08	2,50	2,38	2,49	4,32	2,63	4,55	1,83
1,35	3,15	2,50	2,47	2,50	4,33	2,67	4,62	1,83
1,40	3,21	2,50	2,56	2,50	4,33	2,70	4,68	1,83
1,45	3,28	2,50	2,64	2,50	4,33	2,74	4,74	1,83
1,50	3,33	2,50	2,72	2,50	4,33	2,77	4,79	1,83
1,55	3,39	2,50	2,80	2,50	4,33	2,80	4,84	1,83
1,60	3,44	2,50	2,87	2,50	4,33	2,82	4,89	1,83
1,65	3,48	2,50	2,93	2,50	4,33	2,85	4,93	1,83
1,70	3,53	2,50	2,99	2,50	4,33	2,87	4,97	1,83
1,75	3,57	2,50	3,05	2,50	4,33	2,89	5,01	1,83
1,80	3,61	2,50	3,10	2,50	4,33	2,92	5,05	1,83
1,85	3,65	2,50	3,15	2,50	4,33	2,94	5,09	1,83
1,90	3,68	2,50	3,20	2,50	4,33	2,96	5,12	1,83
1,95	3,72	2,50	3,25	2,50	4,33	2,97	5,15	1,83
2,00	3,75	2,50	3,29	2,50	4,33	2,99	5,18	1,83
∞	5,00	2,50	5,00	2,50	4,33	3,66	6,25	1,83

Fonte: Carvalho e Figueiredo, 2012

Quadro 24 – Coeficientes k_x , k_y , k'_x e k'_y para o cálculo das reações nas vigas de apoio de em lajes retangulares uniformemente carregadas (Casos 4, 5 e 6)

λ	Caso 4				Caso 5		Caso 6	
	k_x	k'_x	k_y	k'_y	k_x	k'_y	k'_x	k_y
1,00	1,83	3,17	1,83	3,17	1,44	3,56	3,56	1,44
1,05	1,92	3,32	1,83	3,17	1,52	3,66	3,63	1,44
1,10	2,00	3,46	1,83	3,17	1,59	3,75	3,69	1,44
1,15	2,07	3,58	1,83	3,17	1,66	3,84	3,74	1,44
1,20	2,14	3,70	1,83	3,17	1,73	3,92	3,80	1,44
1,25	2,20	3,80	1,83	3,17	1,80	3,99	3,85	1,44
1,30	2,25	3,90	1,83	3,17	1,88	4,06	3,89	1,44
1,35	2,30	3,99	1,83	3,17	1,95	4,12	3,93	1,44
1,40	2,35	4,08	1,83	3,17	2,02	4,17	3,97	1,44
1,45	2,40	4,15	1,83	3,17	2,09	4,22	4,00	1,44
1,50	2,44	4,23	1,83	3,17	2,17	4,25	4,04	1,44
1,55	2,48	4,29	1,83	3,17	2,20	4,28	4,07	1,44
1,60	2,52	4,36	1,83	3,17	2,31	4,30	4,10	1,44
1,65	2,55	4,42	1,83	3,17	2,38	4,32	4,13	1,44
1,70	2,58	4,48	1,83	3,17	2,45	4,33	4,15	1,44
1,75	2,61	4,53	1,83	3,17	2,53	4,33	4,17	1,44
1,80	2,64	4,58	1,83	3,17	2,59	4,33	4,20	1,44
1,85	2,67	4,63	1,83	3,17	2,66	4,33	4,22	1,44
1,90	2,70	4,67	1,83	3,17	2,72	4,33	4,24	1,44
1,95	2,72	4,71	1,83	3,17	2,78	4,33	4,26	1,44
2,00	2,75	4,75	1,83	3,17	2,84	4,33	4,28	1,44
∞	3,66	6,33	1,83	3,17	5,00	4,33	5,00	1,44

Fonte: Carvalho e Figueiredo, 2012

Quadro 25 – Coeficientes k_x , k_y , k'_x e k'_y para o cálculo das reações nas vigas de apoio de em lajes retangulares uniformemente carregadas (Casos 7, 8 e 9)

λ	Caso 7			Caso 8			Caso 9	
	k_x	k'_x	k'_y	k'_x	k_y	k'_y	k'_x	k'_y
1,00	1,44	2,50	3,03	3,03	1,44	2,50	2,50	2,50
1,05	1,52	2,63	3,08	3,12	1,44	2,50	2,62	2,50
1,10	1,59	2,75	3,11	3,21	1,44	2,50	2,73	2,50
1,15	1,66	2,88	3,14	3,29	1,44	2,50	2,83	2,50
1,20	1,73	3,00	3,16	3,36	1,44	2,50	2,92	2,50
1,25	1,80	3,13	3,17	3,42	1,44	2,50	3,00	2,50
1,30	1,88	3,25	3,17	3,48	1,44	2,50	3,08	2,50
1,35	1,94	3,36	3,17	3,54	1,44	2,50	3,15	2,50
1,40	2,00	3,47	3,17	3,59	1,44	2,50	3,21	2,50
1,45	2,06	3,57	3,17	3,64	1,44	2,50	3,28	2,50
1,50	2,11	3,66	3,17	3,69	1,44	2,50	3,33	2,50
1,55	2,16	3,75	3,17	3,73	1,44	2,50	3,39	2,50
1,60	2,21	3,83	3,17	3,77	1,44	2,50	3,44	2,50
1,65	2,25	3,90	3,17	3,81	1,44	2,50	3,48	2,50
1,70	2,30	3,98	3,17	3,84	1,44	2,50	3,53	2,50
1,75	2,33	4,04	3,17	3,87	1,44	2,50	3,57	2,50
1,80	2,37	4,11	3,17	3,90	1,44	2,50	3,61	2,50
1,85	2,40	4,17	3,17	3,93	1,44	2,50	3,65	2,50
1,90	2,44	4,21	3,17	3,96	1,44	2,50	3,68	2,50
1,95	2,47	4,28	3,17	3,99	1,44	2,50	3,72	2,50
2,00	2,50	4,33	3,17	4,01	1,44	2,50	3,75	2,50
∞	3,66	6,34	3,17	5,00	1,44	2,50	5,00	2,50

Fonte: Carvalho e Figueiredo, 2012