

FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL

HENRIQUE BIANCARDI VIGUINI

HENRIQUE VIANNA SALLES

ISABELLA CAMPO DALL'ORTO

MARCUS PANETO KLEM

**COMPARATIVO ENTRE O DIMENSIONAMENTO DE DIFERENTES SISTEMAS
DE LAJES DE CONCRETO ARMADO**

ARACRUZ

2017

HENRIQUE BIANCARDI VIGUINI

HENRIQUE VIANNA SALLES

ISABELLA CAMPO DALL'ORTO

MARCUS PANETO KLEM

**COMPARATIVO ENTRE O DIMENSIONAMENTO DE DIFERENTES SISTEMAS
DE LAJES DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenadoria do Curso de Engenharia Civil das
Faculdades Integradas de Aracruz como requisito
parcial para obtenção do título de Graduação em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Felipe Coelho de
Freitas

ARACRUZ

2017

HENRIQUE BIANCARDI VIGUINI

HENRIQUE VIANNA SALLES

ISABELLA CAMPO DALL'ORTO

MARCUS PANETO KLEM

**COMPARATIVO ENTRE O DIMENSIONAMENTO DE DIFERENTES SISTEMAS
DE LAJES DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenadoria do Curso de Engenharia Civil das
Faculdades Integradas de Aracruz como requisito
parcial para obtenção do título de Graduação em
Engenharia Civil.

Aprovado em ____ de _____ de 2017.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Me. Felipe Coelho de Freitas
Faculdade Integradas de Aracruz
Orientador

Prof. Evandro José Pinto de Abreu
Faculdades Integradas de Aracruz
Membro Interno

Prof. Ernandes Marcos Scopel
Membro Externo

DECLARAÇÃO DO AUTOR

Declaramos, para fins de pesquisa acadêmica, didática e técnico-científica, que este Trabalho de Conclusão de Curso pode ser parcialmente utilizado, desde que se faça referência à fonte e aos autores.

Aracruz, 24 de novembro de 2017.

Henrique Biancardi Viguini

Henrique Vianna Salles

Isabella Campo Dall'orto

Marcus Paneto Klem

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, pela benção de realizarmos esse sonho e, em todos os momentos, ser nosso refúgio, auxílio e proteção.

Ao professor Felipe Coelho de Freitas, pela atenciosa orientação, ensinamentos, incentivos, compreensão e, acima de tudo, pela amizade.

Aos amigos e colegas de faculdade, pelo incentivo e pela história que construímos no decorrer desses cinco anos. Sem vocês certamente esse momento não chegaria e, se chegasse, perderia o brilhantismo da vitória.

Às Faculdade Integradas de Aracruz, por toda estrutura física e seu corpo docente que além de proporcionar o conhecimento teórico também ajudou a compor os profissionais que somos hoje.

E por fim, mas não sem menos importância, aos nossos pais, agradecemos por tudo que sempre fizeram em nossas vidas e especialmente pelo incentivo, paciência e amor de sempre, principalmente nesses cinco anos de graduação.

RESUMO

Desde o princípio da construção civil os métodos de edificação apresentam-se em um progressivo desenvolvimento, principalmente a parte estrutural na qual será o objeto de comparação do trabalho, acompanhando as necessidades do mercado, a tecnologia disponível para estudos e análises, seu desempenho de sustentação e a viabilidade de execução. Entretanto, a aplicação congruente dos métodos em relação às características físicas do projeto, por diversas vezes, não atende de uma maneira a otimizar a construção. O objetivo do trabalho tem como base os parâmetros físicos de um projeto, comprimento de vão e dimensão de vigas, e a relação deles à um estudo aprofundado de alguns desses métodos, como laje maciça e laje nervurada, aplicando cada um dos parâmetros de modo a aprimorar a execução e suas funções estruturais. Para isso, uma análise estrutural perscrutada foi necessária para corroborar a aplicabilidade deles. O processo metodológico constituiu em revisar a bibliografia disponível acerca do tema, seguindo pelas definições teóricas para dimensionamento estrutural, levando em conta as diretrizes normativas. Logo após, sendo complementado com o cálculo de modelos estruturais em exemplos executivos, para efeito de comparação entres as áreas de aço, forma e volume de concreto. Finalizando com a explicitação dos resultados obtidos, através de tabelas e gráficos, e os comparando de modo a evidenciar em qual modelo executivo terá o melhor aproveitamento levando em consideração o custo dos materiais para execução.

Palavras-chaves: Análise estrutural. Laje maciça. Laje nervurada. Custo de materiais. Análise gráfica.

ABSTRACT

Since the beginning of civil construction the buildings methods present themselves in a progressive development, mainly the structural part which will be the comparative object of the project, following the necessities of the sector, the available technology to studies and analysis, and their sustentation performance and execution viability. However, the methods congruent application in relation to physic characteristics of the project, several times, do not answer in a way to optimize the construction. The objective of the project has for base the physical parameters of the project, the span length and beams dimension, and their relation to a deepen study of some methods, like massive slab and ribbed slab, applying each of parameters to improve execution and its structural functions. For this, a scrutinized structural analysis was necessary to confirm their applicability. The methodological process was constituted in reviewing the available bibliography on the subject, following to theoretical definitions to structural dimensioning, taking into account normative guidelines. Then, being complemented with the calculation of structural models in executive examples, to a comparison between the steel areas, shape area and concrete volume. Ending by showing the obtained results through tables and graphics, and comparing in order to substantiate which executive model will have the best application taking into consideration the cost of the materials for execution.

Keywords: Structural analysis. Massive slab. Ribedslab. Materials costs. Graphic analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 –	Carregamento das lajes.....	24
Figura 02 –	Laje maciça.....	27
Figura 03 –	Valores do coeficiente adicional γ_n para lajes em balanço...	28
Figura 04 –	Laje nervurada pré-moldada.....	30
Figura 05 –	Laje nervurada moldada <i>in loco</i>	31
Figura 06 –	Laje armada em uma direção.....	32
Figura 07 –	Laje armada em duas direções.....	32
Figura 08 –	Corte esquemático de laje maciça.....	33
Figura 09 –	Corte esquemático de laje nervurada.....	33
Figura 10 –	Dimensões de bloco de enchimento em EPS e vigota em concreto armado.....	36
Figura 11 –	Convenção de estilo de linha para os vínculos engaste perfeito, apoio simples e borda livre.....	40
Figura 12 –	Valores dos coeficientes de ξ em função do tempo.....	44
Figura 13 –	Classes de agressividade ambiental (CAA).....	46
Figura 14 –	Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm.....	47
Figura 15 –	Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas.....	48
Figura 16 –	Valores mínimos para armaduras passivas aderentes.....	49
Figura 17 –	Perspectiva do comparativo dos tipos de lajes estudados – Pequeno porte.....	65
Figura 18 –	Perspectiva do comparativo dos tipos de lajes estudados – Médio porte.....	65
Figura 19 –	Perspectiva do comparativo dos tipos de lajes estudados – Grande porte.....	66
Figura 20 –	Perspectiva Laje maciça – Pequeno porte.....	66
Figura 21 –	Perspectiva Laje maciça – Médio porte.....	67
Figura 22 –	Perspectiva Laje maciça – Grande porte.....	67
Figura 23 –	Perspectiva Laje nervurada moldada <i>in loco</i> – Pequeno porte.....	68
Figura 24 –	Perspectiva Laje nervurada moldada <i>in loco</i> – Médio porte.....	68

Figura 25 –	Perspectiva Laje nervurada moldada <i>in loco</i> – Grande porte.....	69
Figura 26 –	Perspectiva Laje nervurada pré-moldada – Pequeno porte.	69
Figura 27 –	Perspectiva Laje nervurada pré-moldada – Médio porte.....	70
Figura 28 –	Perspectiva Laje nervurada pré-moldada – Grande porte....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 –	Resultados obtidos no dimensionamento de Lajes maciças	87
Tabela 02 –	Resultados obtidos no dimensionamento de Lajes nervuradas moldada in loco.....	87
Tabela 03 –	Resultados obtidos no dimensionamento de Lajes nervuradas pré-moldada.....	87
Tabela 04 –	Tabela de insumos referenciada do SINAPI.....	109
Tabela 05 –	Custos do concreto referente aos métodos construtivos.....	110
Tabela 06 –	Custos do aço referente aos métodos construtivos.....	111
Tabela 07 –	Custo da forma referente aos métodos construtivos.....	112
Tabela 08–	Custos dos materiais referentes ao métodos construtivos...	114

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	HISTÓRICO/JUSTIFICATIVA.....	20
1.2	OBJETIVOS.....	22
1.2.1	Objetivos específicos.....	22
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	23
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	24
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS TIPOS DE LAJES DE CONCRETO ARMADO.....	24
2.2	TIPOS DE LAJES DE CONCRETO ARMADO.....	25
2.2.1	Laje maciça convencional.....	26
2.2.2	Laje nervurada pré-moldada.....	29
2.2.3	Laje nervurada moldada <i>in-loco</i>.....	31
2.3	CLASSIFICAÇÃO QUANTO A DIREÇÃO.....	31
2.3.1	Laje armada em uma direção.....	32
2.3.2	Laje armada em duas direções.....	32
2.4	VÃO EFETIVO.....	32
2.5	AÇÕES ATUANTES NAS LAJES.....	34
2.5.1	Ações permanentes diretas.....	34
2.5.1.1	Peso próprio.....	35
2.5.1.2	Revestimento.....	37
2.5.1.3	Carga de alvenaria.....	37
2.5.1.4	Carga por nervura.....	37
2.5.2	Ações variáveis normais.....	38
3	DIMENSIONAMENTO COM RELAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES..	39
3.1	VERIFICAÇÃO DOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMO E DE SERVIÇO. FORMULAÇÃO TEÓRICA ADOTADA PARA LAJE MACIÇA	39
3.2	CONVENCIONAL (LMC).....	39
3.2.1	Esforços solicitantes – Momento Fletor.....	40
3.2.2	Momentos de fissuração.....	40
3.2.3	Flechas.....	42
3.2.3.1	Flecha imediata.....	42
3.2.3.2	Flecha diferida no tempo.....	43

3.2.4	Determinação da área de aço.....	44
3.2.4.1	Armadura mínima.....	47
3.3	FORMULAÇÃO TEÓRICA ADOTADA PARA LAJE NERVURADA MOLDADA <i>IN LOCO</i> (LNML).....	49
3.3.1	Momento atuante na nervura.....	49
3.3.2	Determinação da área de aço.....	49
3.3.2.1	Armadura mínima.....	50
3.3.3	Características geométricas.....	51
3.3.3.1	Área da seção transversal.....	51
3.3.3.2	Centro de gravidade.....	52
3.3.3.3	Momento de Inércia.....	52
3.3.4	Flechas.....	53
3.3.4.1	Flecha imediata.....	53
3.3.4.2	Flecha diferida no tempo.....	54
3.4	FORMULAÇÃO TEÓRICA ADOTADA PARA LAJE NERVURADA PRÉ-MOLDADA (LNPM).....	55
3.4.1	Momento atuante na nervura.....	55
3.4.2	Momento de fissuração.....	55
3.4.3	Determinação da área de aço.....	56
3.4.3.1	Armadura mínima.....	58
3.4.4	Características Geométricas.....	58
3.4.4.1	Área da seção transversal.....	58
3.4.4.2	Centro de gravidade.....	59
3.4.4.3	Momento de Inércia.....	60
3.4.5	Flechas.....	61
3.4.5.1	Flecha imediata.....	61
3.4.5.2	Flecha diferida no tempo.....	62
3.4.5.3	Contraflecha.....	63
4	METODOLOGIA.....	64
4.1	MODELAGEM FÍSICA.....	64
4.1.1	Exemplo 1 – Laje maciça – Pequeno porte.....	66
4.1.2	Exemplo 2 – Laje maciça – Médio porte.....	66
4.1.3	Exemplo 3 – Laje maciça – Grande porte.....	67

4.1.4	Exemplo 4 – Laje nervurada moldada <i>in loco</i> – Pequeno porte....	67
4.1.5	Exemplo 5 – Laje nervurada moldada <i>in loco</i> – Médio porte.....	68
4.1.6	Exemplo 6 – Laje nervurada moldada <i>in loco</i> – Grande porte.....	69
4.1.7	Exemplo 7 – Laje nervurada pré-moldada – Pequeno porte.....	69
4.1.8	Exemplo 8 – Laje nervurada pré-moldada – Médio porte.....	70
4.1.9	Exemplo 9 – Laje nervurada pré-moldada – Grande porte.....	71
4.2	CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO.....	71
4.3	EXEMPLOS DE CÁLCULO.....	71
4.3.1	Exemplo 01 – Laje maciça - Pequeno porte.....	72
4.3.1.1	Classificação quanto a direção.....	72
4.3.1.2	Vão efetivo.....	72
4.3.1.3	Ações atuantes nas lajes.....	72
4.3.1.4	Esforços solicitantes.....	72
4.3.1.5	Flechas.....	73
4.3.1.6	Determinação da área de aço.....	74
4.3.2	Exemplo 04 – Laje nervurada moldada <i>in loco</i> - Pequeno porte...	75
4.3.2.1	Vão efetivo.....	75
4.3.2.2	Ações atuantes nas lajes.....	75
4.3.2.3	Momento atuante na nervura.....	76
4.3.2.4	Determinação da área de aço.....	76
4.3.2.5	Características geométricas.....	77
4.3.2.6	Flechas.....	78
4.3.3	Exemplo 07 – Laje nervurada pré-moldada - Pequeno porte.....	79
4.3.3.1	Vão efetivo.....	79
4.3.3.2	Ações atuantes nas lajes.....	79
4.3.3.3	Momento atuante na nervura.....	81
4.3.3.4	Determinação da área de aço.....	81
4.3.3.5	Armadura mínima.....	81
4.3.3.6	Características geométricas.....	82
4.3.3.7	Momento de fissuração.....	83
4.3.3.8	Flechas.....	84
4.3.4	Resultados obtidos nos exemplos.....	85
5	RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO.....	87

5.1	CUSTOS DOS MATERIAIS REFERENTES AOS MÉTODOS CONSTRUTIVOS.....	87
5.2	ANÁLISE GRÁFICA DOS CUSTOS.....	93
6	CONCLUSÃO.....	95
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
	REFERÊNCIAS	97
	ANEXO.....	99

1. INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRICO/JUSTIFICATIVA

Os primeiros materiais a serem empregados nas construções foram os disponíveis na natureza, como a pedra natural e a madeira (BASTOS, 2006). À medida que o homem necessitou desenvolver sistemas construtivos que melhor atendessem suas carências, os materiais empregados tiveram de ser aprimorados. Séculos mais tarde, os insumos derivados das matérias-primas naturais disponíveis, como ferro, aço e concreto, começaram a ser empregados nas obras. Entre eles, pode-se listar o aço, que é um material com resistência à tração elevada, bem como o concreto, que apresenta mistura composta por água, cimento e agregado (brita) com característica principal a resistência à compressão e alta durabilidade.

A definição de concreto se dá por material resultante da mistura dos agregados (naturais ou britados) com cimento e água (ARAUJO, 2014). Quando em necessidades específicas, podem ser acrescentados aditivos químicos e minerais, que melhorem as características do concreto fresco ou endurecido. O concreto armado, por sua vez, surge da necessidade do homem em aliar a durabilidade do concreto à resistência do aço.

O concreto armado é, então, o material composto obtido através da associação do concreto com barras de aço, convenientemente colocadas em seu interior. Essa associação de elementos possui inúmeras vantagens sobre os demais elementos estruturais, como a economia, a facilidade de execução em diversos tipos de formas, a resistência ao fogo, aos agentes atmosféricos e ao desgaste mecânico e a baixa necessidade de manutenção. Algumas desvantagens também devem ser citadas, como o elevado peso das construções, a menor proteção térmica e as dificuldades para a execução de reformas ou demolições (ARAUJO, 2014).

Antes do desenvolvimento e do descobrimento do concreto armado, a utilização da associação entre o ferro e a pedra para formar vigas foi registrada no ano de 1770 em Paris. As primeiras ocorrências da utilização do concreto armado, maneira a qual o concreto armado inicialmente era tratado, foram registradas no ano de 1840, também na França (BASTOS, 2006).

O desenvolvimento do emprego do concreto armado no Brasil data-se no início do século 20, onde em 1901 galerias de água em cimento armado foram construídas na cidade do Rio de Janeiro. O emprego do concreto armado em obras de maior expressão no Brasil foi registrado também no Rio de Janeiro no ano de 1909, na construção de uma ponte com vão de 5,4 m na Rua Senador Feijó. Já em São Paulo, foi construída uma ponte de concreto armado com 28 m de comprimento na Av. Pereira Rebouças sobre o Ribeirão dos Machados (BASTOS, 2006).

As lajes também surgiram em um passado distante, de maneira completamente diferente dos materiais e forma como se apresentam atualmente. Nas construções das pirâmides do Egito, exemplificando a de Kéfren, existiam câmaras que eram isoladas por pedras de calcário que serviam como teto. No período medieval é possível encontrar obras romanas que se assimilam com as lajes atuais, como arcos que tinham por finalidade suportar esforços normais (DORNELES, 2014).

De acordo com Araújo (2014), as lajes são os elementos estruturais que tem a função básica de receber as cargas de utilização das edificações, aplicadas nos pisos e transmiti-las às vigas. Elas também servem para distribuir as ações horizontais entre os elementos estruturais de contraventamento, além de funcionarem como mesas de compressão das vigas T.

As lajes podem ser classificadas de diversas formas, como por sua natureza e por seu tipo de apoio. No entanto, geralmente são divididas entre pré-moldadas e moldadas *in loco* (DORNELES, 2014). Os pisos das edificações podem ser executados com diferentes tipos de lajes, como as maciças, as nervuradas e as chamadas cogumelos, além de diversos outros tipos de lajes pré-moldadas (ARAUJO, 2014).

As lajes maciça e nervurada são os tipos de laje usadas com mais frequência. A primeira, por ser placa de espessura uniforme, apoiada ao longo do seu contorno e predominantemente empregada nos edifícios residenciais onde os vãos são relativamente pequenos. A laje nervurada, por sua vez, se destaca por vencer grandes vãos, sendo caracterizadas por nervuras que abrigam as armaduras longitudinais de tração.

Com o aumento da construção de edifícios verticais, bem como as imposições exigidas nos projetos arquitetônicos, tais como: grandes vãos, estrutura esbelta, baixo

custo, entre outros, pode-se constatar a limitação de determinados tipos de lajes de concreto armado quanto ao atendimento a essas necessidades. Ainda, o setor da construção civil busca a redução do peso próprio das estruturas, pois proporciona benefício aos empreendimentos como o alívio no carregamento permanente aplicado à fundação (SOUZA e LOPES, 2016).

A crescente concorrência no mercado da construção civil tem levado tanto os projetistas de estruturas de concreto armado como também as construtoras a uma busca por soluções que, além de simples e eficazes, tragam redução de custos (material e/ou mão-de-obra), rapidez, versatilidade nas aplicações ou que ainda proporcionem um aumento na relação custo-benefício. Todas essas soluções devem ser empregadas sem que a qualidade e a durabilidade das estruturas sejam observadas (SILVA, 2005).

Diante disso, neste trabalho serão apresentados diferentes tipos de lajes, cuja importância na cadeia da construção da edificação é de considerável relevância, bem como detalhar três tipos específicos de lajes, que serão os objetos de estudo desse trabalho, quais sejam: lajes de concreto armado maciça, nervurada pré-moldada e moldada *in loco*.

1.2 OBJETIVOS

Conhecer e descrever os procedimentos de dimensionamento das lajes de concreto armado maciça, nervuradas pré-moldada e moldada *in loco* e apresentar rotina de cálculo manual das lajes de concreto armado.

1.2.1 Objetivos específicos

- a) Realizar abordagem literal do referencial teórico sobre o dimensionamento das lajes de concreto armado maciça, nervurada pré-moldada e moldada *in loco*.
- b) Desenvolver modelagem de lajes com diferentes vãos (3, 5 e 7 metros) para aplicação do conteúdo desenvolvido no item anterior.
- c) Obter as grandezas (área de aço e momento) e os quantitativos do projeto estrutural: volume de concreto, área de forma e consumo de aço.
- d) Comparar as grandezas obtidas com relação aos portes das lajes propostas, avaliar o resultado comparando as grandezas obtidas no dimensionamento das lajes

pela variação dos vãos e avaliar a viabilidade financeira para cada tipo de laje dimensionado.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para o desenvolvimento da pesquisa, a estrutura do trabalho foi dividida basicamente em quatro capítulos. O primeiro aborda os tipos de lajes adotados e os principais tipos de ações que nelas atuam, tendo como principal referência a norma técnica ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.

No segundo capítulo, é apresentada a forma de dimensionamento, em relação aos estados limites, dos tipos de laje estudados nessa pesquisa. Também, é abordada a formulação teórica para as verificações necessárias.

A metodologia empregada no desenvolvimento da pesquisa, bem como as características da edificação utilizada como modelo de estudo, segundo os critérios e procedimentos levantados durante as outras etapas, para desenvolver uma análise comparativa entre os tipos lajes, são evidenciados no terceiro capítulo. Por fim, são apresentados os resultados e as conclusões obtidos através do dimensionamento das lajes.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

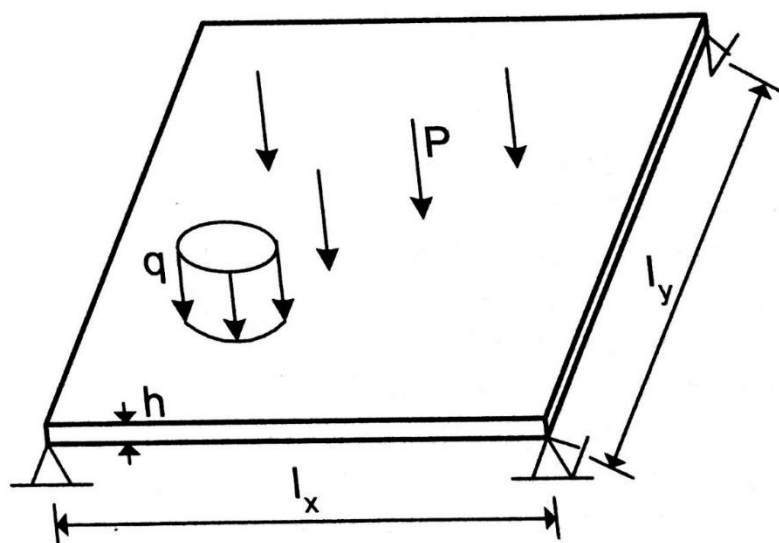
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS TIPOS DE LAJES DE CONCRETO ARMADO

Lajes são elementos estruturais de superfície plana (elementos laminares simétricos em relação ao seu plano médio), em que a dimensão perpendicular à superfície, usualmente chamada espessura, é relativamente pequena comparada às demais (largura e comprimento) e sujeitas principalmente a ações normais a seu plano (CARVALHO, 2014).

As lajes são elementos estruturais que têm a função básica de receber as cargas de utilização das edificações, aplicadas nos pisos, e transmiti-las às vigas. As lajes também servem para distribuir as ações horizontais entre os elementos estruturais de contraventamento, além de funcionarem como mesas de compressão das vigas T (ARAÚJO, 2014).

Segundo Araújo (2014), as lajes são elementos bidimensionais planos cuja espessura h é bem inferior às outras dimensões (l_x, l_y), e que são solicitadas, predominantemente, por cargas perpendiculares ao seu plano médio.

Figura 01 – Carregamento das lajes



Fonte: ARAÚJO (2014, p. 1).

As lajes são classificadas como elementos planos bidimensionais, em que duas de suas dimensões, o comprimento e a largura, são da mesma ordem de grandeza e muito maiores do que a terceira dimensão: a espessura. As lajes também são denominadas como elementos de superfície ou placas (BASTOS, 2015).

Por definição, a norma NBR 6118:2014 cita no item 3.1.3 que elementos de concreto armado são aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência. Para isso, nestes elementos são empregadas apenas as armaduras passivas, as quais não podem ser aplicadas alongamentos iniciais. Os casos em que são considerados alongamentos na armadura são utilizados em elementos de concreto protendido. Neste trabalho, serão consideradas apenas lajes de concreto armado, não sendo verificadas as lajes protendidas.

2.2 TIPOS DE LAJES DE CONCRETO ARMADO

O pavimento de uma edificação, que é um elemento estrutural de superfície, pode ser projetado com elementos pré-moldados ou moldados no local. O pavimento moldado no local pode ser composto de uma única laje (maciça ou nervurada), sem vigas, ou de um conjunto de lajes, maciças ou nervuradas, apoiadas em vigas (CARVALHO, 2014).

As lajes maciças de concreto armado podem ser executadas por diferentes sistemas construtivos. As lajes nervuradas, que são constituídas por vigas solidarizadas por uma mesa de concreto, podem ser totalmente moldadas in loco ou possuírem vigas (nervuras) pré-moldadas, que são informalmente chamadas de lajes treliçadas, lajes de vigotas, e que tem sido corriqueiramente empregado em obras da construção civil (BOCCHI JR., 1995).

As lajes em concreto armado podem ser classificadas segundo diferentes critérios. De acordo com Souza e Lopes (2016), são subdivididas em 4 categorias: quanto à seção transversal (maciça, nervurada), quanto à execução (moldada in loco, pré-moldada), quanto ao apoio (em vigas/alvenaria estrutural, em pilares) e quanto à armação (armada em uma direção, em duas direções) (apud SILVA, 2005).

No item 14.7.7 da norma NBR 6118:2014, as lajes nervuradas são definidas como lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte.

O tipo de laje a ser utilizado depende de considerações econômicas e de segurança, sendo uma função do projeto arquitetônico em análise (ARAÚJO, 2014).

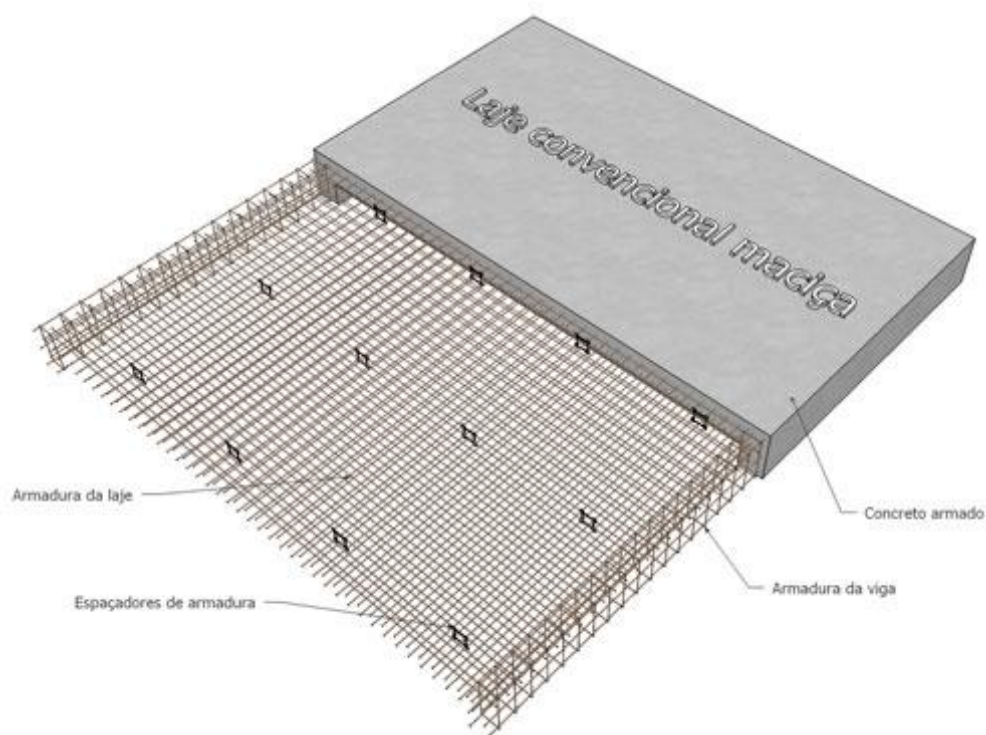
2.2.1 Laje maciça convencional

As lajes maciças foram as primeiras lajes de concreto armado e por isso tem uma mão-de-obra facilmente adquirida e treinada. Possuem elevado peso próprio (não possuem material de enchimento) e não conseguem vencer grandes vãos. As placas maciças possuem armaduras longitudinais de flexão (em poucos casos levam armadura transversal) (DORNELES, 2014).

De acordo com Dorneles (2014) as principais vantagens deste tipo de laje são: possuem desempenho satisfatório na redistribuição de esforços; não necessitam de mão-de-obra qualificada devido a sua simplicidade; o elevado número de vigas colabora na formação de pórticos que proporcionam a propriedade de chapa e auxiliam no processo de contraventamento da estrutura. As principais desvantagens são o elevado peso próprio, o que gera maiores reações nos apoios, elevado gasto com formas, a propriedade acústica é desprezada e possui elevados custos em comparação às lajes com preenchimentos de materiais alternativos.

As lajes maciças têm a característica de distribuir suas reações em todas as vigas de contorno, diferentemente das pré-moldadas. Com isso, há um melhor aproveitamento das vigas do pavimento, pois todas elas, dependendo apenas do vão e condições de contorno, podem ter cargas da mesma ordem de grandeza (CARVALHO, 2014).

Figura 02 – Laje maciça



Fonte: Catálogo Digital de Detalhamento da Construção, adaptada pelos autores (2017).

Para o cálculo de lajes maciças existem basicamente dois métodos: o elástico e o de ruptura. O primeiro se baseia na análise do comportamento do elemento sob cargas de serviço e concreto íntegro (não fissurado). Já o segundo procedimento se baseia nos mecanismos de ruptura das lajes (CARVALHO, 2014).

No método elástico, subestimam-se os deslocamentos, pois não é considerada a fissuração do concreto. Também não se pode dizer que os esforços na situação de ruptura, usados no cálculo da armadura, são proporcionais aos obtidos em serviço.

O método de ruptura é desenvolvido com base no mecanismo de ruptura da laje, ou seja, procura-se identificar de que forma a laje chega ao colapso e, para essa situação, são calculados os esforços pela chamada teoria das charneiras plásticas (CARVALHO, 2014).

No item 13.2.4.1 da norma NBR 6118:2014, são apresentados os limites mínimos para a espessura desse tipo de estrutura que devem ser respeitados a fim de evitar um desempenho inaceitável desses elementos estruturais e também propiciar condições

de execução adequadas. Os limites mínimos para lajes maciças indicados na norma são:

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

Para o dimensionamento das lajes em balanço, os esforços solicitantes de cálculo a serem considerados devem ser multiplicados por um coeficiente adicional γ_n , de acordo com o indicado na tabela 01.

Figura 03 – Valores do coeficiente adicional γ_n para lajes em balanço

h cm	≥ 19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
γ_n	1,00	1,0 5	1,1 0	1,1 5	1,2 0	1,2 5	1,3 0	1,3 5	1,4 0	1,4 5

onde

$\gamma_n = 1,95 - 0,05 h$;

h é a altura da laje, expressa em centímetros (cm).

NOTA O coeficiente γ_n deve majorar os esforços solicitantes finais de cálculo nas lajes em balanço, quando de seu dimensionamento.

Fonte: NBR 6118:2014

Os livros sobre estruturas de concreto armado, na sua maioria, apresentam em seus conteúdos tabelas práticas para o cálculo dos esforços solicitantes e deslocamentos transversais em lajes isoladas com diversas condições de apoio e carregamento. Algumas dessas tabelas fornecem coeficientes para cálculo de deslocamentos transversais, momentos fletores, momentos de torção, forças cortantes, reações de apoio e forças concentradas nos cantos. Outras apresentam coeficientes apenas para

o cálculo de momentos fletores, sem indicar o coeficiente de Poisson adotado e, em alguns casos, os momentos fletores referem-se ao centro da placa, sem a indicação de que pode existir um momento fletor maior em outro ponto fora do centro da mesma. Entre as tabelas mais utilizadas para o dimensionamento de lajes no Brasil, destacam-se as de Marcus, de Bares e Czerny (SILVA, 2005).

Para o dimensionamento dos modelos adotados nesse trabalho de pesquisa foram utilizadas as tabelas de Bares.

2.2.2 Laje nervurada pré-moldada

Segundo Souza e Lopes (2016) as lajes nervuradas pré-moldadas são aquelas em que parte da laje, geralmente a nervura, é executada fora do local definitivo da construção. Nesse tipo de laje, é comum o emprego de vigotas unidirecionais pré-fabricadas com armadura em treliça ou tipo trilho (em concreto armado ou concreto protendido) com elementos leves de enchimento sem função estrutural (blocos cerâmicos, blocos de concreto celular, EPS, entre outros) solidarizados pelo concreto moldado no local (apud SILVA, 2005).

As lajes nervuradas pré-moldadas são utilizadas para pavimentos em que o menor vão a ser vencido pelas lajes é pequeno ou médio (lajes em que a dimensão do menor vão teórico não é maior que 5 metros, em média) e com ações solicitantes não muito elevadas (SILVA, 2005).

O item 13.2.4.2 da norma NBR 6118:2014, evidencia os limites mínimos para a espessura desse tipo de estrutura que devem ser respeitados a fim de evitar um desempenho inaceitável desses elementos estruturais e também propiciar condições de execução adequadas. A norma indica os seguintes limites que devem ser obedecidas na execução de projetos de lajes nervuradas:

- a) A espessura da mesa, quando não existirem tubulações horizontais embutidas, deve ser maior ou igual a $1/15$ da distância entre as faces das nervuras (l_0) e não menor que 4 cm.
- b) O valor mínimo absoluto da espessura da mesa deve ser 5 cm, quando existirem tubulações embutidas de diâmetro menor ou igual a 10 mm. Para tubulações com diâmetro Φ maior que 10 mm, a mesa deve ter a espessura mínima de $4 \text{ cm} + \Phi$,

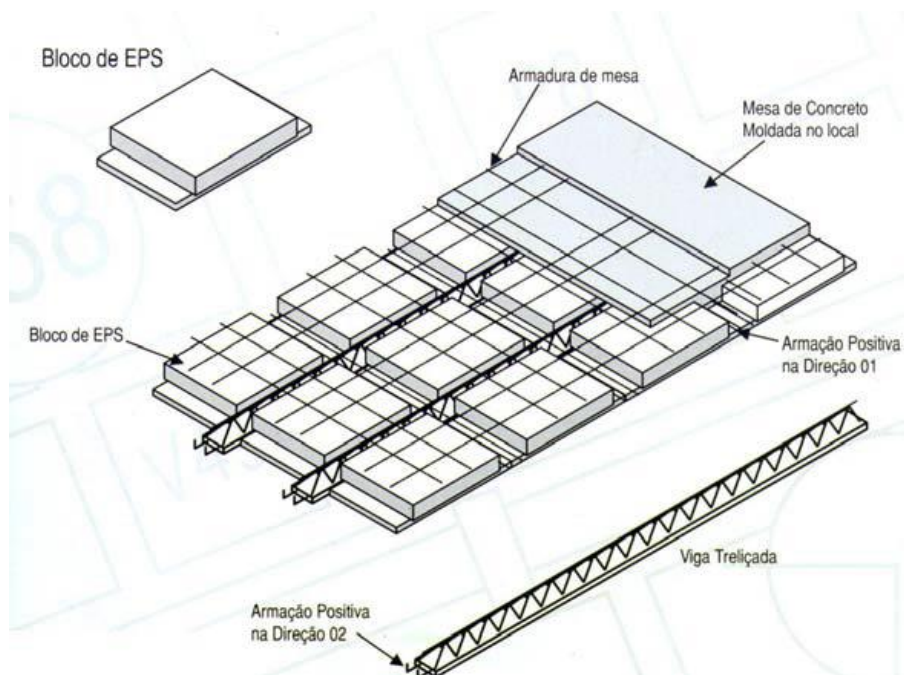
ou $4\text{ cm} + 2\Phi$ no caso de haver cruzamento destas tubulações.

- c) A espessura das nervuras não pode ser inferior a 5 cm.
- d) Nervuras com espessura menor que 8 cm não podem conter armadura de compressão.

O item 13.2.4.2 da NBR 6118:2014 também expõe as seguintes condições que devem ser obedecidas para o projeto das lajes nervuradas:

- a) Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a 65 cm, pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa, e para a verificação do cisalhamento da região das nervuras, permite-se a consideração dos critérios de laje;
- b) Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 cm e 110 cm, exige-se a verificação da flexão da mesa, e as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas; permite-se essa verificação como lajes se o espaçamento entre eixos de nervuras for até 90 cm e a largura média das nervuras for maior que 12 cm;
- c) Para lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras 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.

Figura 04 – Laje nervurada pré-moldada

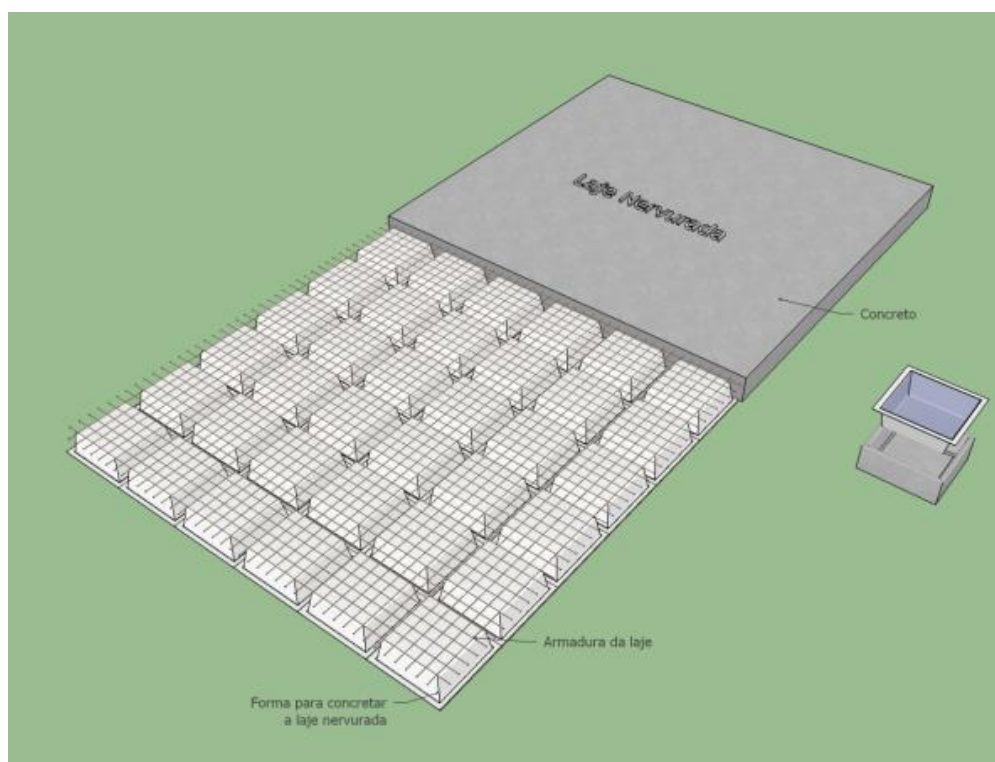


Fonte: Histórico e principais elementos estruturais de concreto armado, adaptada pelos autores (2017).

2.2.3 Laje nervurada moldada *in-loco*

De acordo com Souza e Lopes (2016) as lajes nervuradas moldadas no local são aquelas executadas completamente em sua posição definitiva. Quanto ao posicionamento da nervura, as lajes nervuradas podem ser dupla, invertida e normal, na qual as nervuras estão na parte inferior, com uma mesa superior de concreto. De modo semelhante às lajes nervuradas pré-moldadas, pode-se usar material de enchimento que servirá de forma para a mesa e as faces laterais da nervura ou pode-se optar por deixar vazios os espaços entre as nervuras, reduzindo ainda mais o peso próprio da laje, porém sendo necessária a utilização de formas, feitas de madeira, plásticas, metálicas, ou algum outro material (apud SILVA, 2005).

Figura 05 – Laje nervurada moldada in loco.



Fonte: Catálogo Digital de Detalhamento da Construção, adaptada pelos autores (2017).

2.3 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À DIREÇÃO

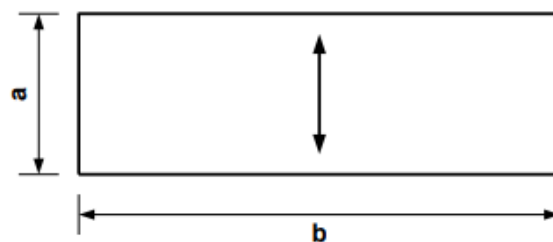
Uma classificação muito importante nas lajes é aquela referente à direção ou direções da armadura principal. As lajes podem ser classificadas em: laje armada em uma direção ou em duas direções.

2.3.1 Laje armada em uma direção

As lajes armadas em uma direção são aquelas em que a relação entre o maior vão (b) e o menor vão (a) é maior que 2.

$$\frac{b}{a} > 2$$

Figura 06 – Laje armada em uma direção



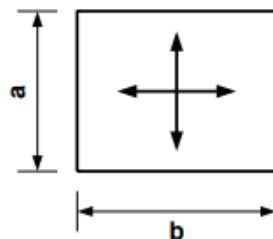
Fonte: CAMPOS FILHO, 2014, p.1, adaptada pelos autores (2017).

2.3.2 Laje armada em duas direções

As lajes armadas em duas direções, ou em cruz, possuem a relação entre o maior vão (b) e o menor vão (a) menor ou igual a 2.

$$\frac{b}{a} \leq 2$$

Figura 07 – Laje armada em duas direções



Fonte: CAMPOS FILHO, 2014, p.1, adaptada pelos autores (2017).

2.4 VÃO FETIVO

No item 14.6.2.4 da norma NBR 6118:2014, o cálculo do vão efetivo na laje pode ser demonstrado pela seguinte expressão:

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

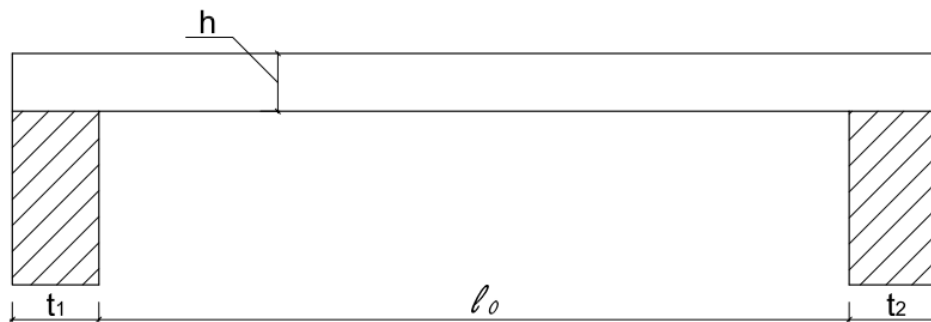
Com a_1 igual ao menor valor entre:

$$\begin{aligned} & - t_1/2 \\ & - 0,3h \end{aligned}$$

Com a_2 igual ao menor valor entre:

$$\begin{aligned} & - t_2/2 \\ & - 0,3h \end{aligned}$$

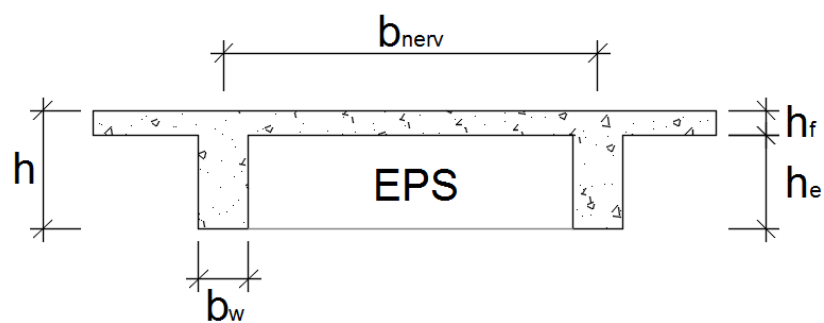
Figura 08 – Corte esquemático da laje maciça



Fonte: Autores (2017).

A figura 8 representa corte da seção transversal de uma laje nervurada com as principais medidas utilizadas.

Figura 09 – Corte esquemático da laje nervurada



Fonte: Autores (2017).

Em que:

b_{nerv} : distância entre eixos das nervuras;

b_w : espessura da nervura;

h : altura da laje;

h_e : altura da nervura;

h_f : espessura da mesa;

2.5 AÇÕES ATUANTES NAS LAJES

As ações são responsáveis por provocarem esforços ou deformações nas estruturas. Usualmente, as forças e as deformações impostas pelas ações são consideradas como se elas fossem as próprias ações (ARAÚJO, 2014). Para o dimensionamento de lajes maciças e nervuradas o carregamento, em geral, é considerado uniformemente distribuído, onde temos:

$$p = g + q$$

p : carga aplicada sobre a laje (kN/m²);

g : carga permanente aplicada sobre a laje (kN/m²);

q : carga acidental aplicada sobre a laje (kN/m²).

2.5.1 Ações permanentes diretas

O item 3.6 da norma NBR 8681:2014 – Ações e segurança na estrutura - Procedimento, apresenta as ações permanentes como as que ocorrem com valores constantes ou de pequena variação em torno de sua média, durante praticamente toda a vida da construção. Também são consideradas como permanentes as ações que crescem no tempo, tendendo a um valor limite constante. As ações permanentes diretas correspondem ao peso próprio da estrutura, peso dos demais elementos permanentes da construção, peso de equipamentos fixos, empuxos de terra e de outros materiais granulosos não removíveis dentre outros elementos que provocam esforços nas estruturas (ARAÚJO, 2014).

2.5.1.1 Peso próprio

O peso próprio é determinado a partir das dimensões da seção transversal da laje e do peso específico do concreto. Normalmente essa ação é admitida uniformemente distribuída na superfície da laje, independentemente do tipo utilizado (SILVA, 2005).

- **Laje maciça**

Para o cálculo do peso próprio para as lajes maciças, tem-se:

$$P_P = e \cdot \gamma_{concreto}$$

P_P : Peso próprio da laje (kN/m²);

e : espessura da laje (m);

$\gamma_{concreto} = 25 \text{ kN/m}^3$: peso específico do concreto (kN/m³).

- **Laje nervurada moldada in loco**

Para o cálculo do peso próprio das lajes nervuradas, tem-se:

$$P_P = e_c \cdot \gamma_{concreto}$$

e_c : espessura média equivalente do concreto (m).

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

$$\xi = \frac{l_{ox}l_{oy}}{b_{wx}b_{wy}}$$

h : Altura total da laje (m);

h_f : espessura da mesa (m);

l_{ox} : Dimensão do enchimento na direção x (m);

l_{oy} : Dimensão do enchimento na direção y (m);

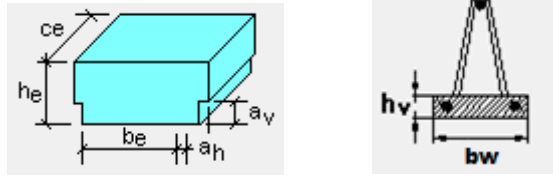
b_{wy} : Dimensão entre nervuras na direção y (m);

b_{wx} : Dimensão entre nervuras na direção x (m).

- **Laje nervurada pré-moldada**

Para o cálculo do peso próprio das lajes nervuradas pré-moldada, tem-se:

Figura 10 – Dimensões de bloco de enchimento em EPS e vigota em concreto armado



Fonte: Autores (2017).

Obs.: Utilizar valores das dimensões em centímetro

$$V_{bloco} = \left((b_e \cdot h_e) + ((h_e - a_v) \cdot a_h \cdot 2) \right) \cdot c_e$$

V_{bloco} : volume do bloco de EPS (cm³).

$$\gamma_{aparente} = \frac{m_{bloco} \cdot 9,81}{\frac{V_{bloco}}{100^3}}$$

$\gamma_{aparente}$: peso específico do EPS (kN/m³);

m_{bloco} : massa do bloco de EPS (kg).

$$A_{bloco} = b_e \cdot h_e + ((h_e - a_v) \cdot 2 \cdot a_h)$$

A_{bloco} : área do bloco do EPS (cm²).

$$A_{concreto} = (b_w + b_e) \cdot (h_e + h_f) - A_{bloco}$$

$A_{concreto}$: área do concreto (cm²).

$$P_p = \left(\frac{\frac{A_{bloco} \cdot c_e \cdot \gamma_{aparente}}{100^3} + \frac{A_{concreto} \cdot c_e \cdot 25}{100^3}}{(b_e + b_w) \cdot c_e} \right) \cdot 100^2$$

P_p : peso próprio da laje nervurada pré-moldada (kN/m²).

2.5.1.2 Revestimento

Para o cálculo do peso do revestimento, tem-se:

$$P_R = \gamma_{REV} \cdot e_r$$

P_R : peso do revestimento na laje (kN/m²);

γ_{REV} : peso específico do revestimento (kN/m³);

e_r : espessura do revestimento (m).

2.5.1.3 Carga de alvenaria

Para o cálculo do peso de alvenaria, tem-se:

$$P_A = \frac{\gamma_{ALV} \cdot e_p \cdot h_p \cdot l}{A_{laje}}$$

P_A : peso da alvenaria na laje (kN/m²);

γ_{ALV} : peso específico da unidade de alvenaria que compõe a parede (kN/m³);

e_p : espessura total da parede (m);

h_p : altura da parede (m);

l : comprimento da parede sobre a laje (m);

A_{laje} : área da laje (m²).

2.5.1.4 Carga por nervura

$$P_{nervura} = b_{nerv}(P_p + P_A + P_R + q)$$

P_A : peso da alvenaria na laje (kN/m²);

P_p : peso próprio (kN/m²);

P_R : peso do revestimento (kN/m²);

q : ações variáveis (kN/m²);

b_{nerv} : distância entre eixos de nervura (m);

2.5.2 Ações variáveis normais

De acordo com o item 2.2 da norma técnica ABNT NBR 6120:1980 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações, a ação variável nas lajes é tratada como “carga accidental”. Na prática costumam ser tratadas também como “sobrecarga”. A carga

acidental é definida pela NBR 6120:1980 como toda aquela que pode atuar sobre a estrutura de edificações em função do seu uso. As cargas verticais que se consideram atuando nos pisos de edificações, além das que se aplicam em caráter especial, referem-se a carregamentos devidos a pessoas, móveis, utensílios materiais diversos e veículos, e são supostas uniformemente distribuídas, com os valores mínimos indicados na Tabela 2 da norma.

3. DIMENSIONAMENTO COM RELAÇÃO AOS ESTADOS LIMITES

3.1 VERIFICAÇÃO DOS ESTADOS LIMITES ÚLTIMO E DE SERVIÇO

A segurança das estruturas de concreto deve ser verificada em relação aos estados-limites último (ELU) e estados-limites de serviço (ELS). O ELU está relacionado ao colapso, ou a qualquer outra forma de ruína estrutural que determine a paralisação do uso da estrutura, em outras palavras, trata-se da situação na qual espera-se que uma estrutura nunca atinja. O ELS por sua vez, procura retratar o “dia-a-dia” de uma estrutura, isto é, está relacionado ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas.

Na verificação do ELU a NBR 6118:2014 diz que devem ser verificados os esforços internos causados pelas ações externas normais e tangenciais. As ações externas normais irão gerar esforços internos de momento fletor e esforço normal, e os esforços tangenciais farão surgir esforços de cisalhamento na laje.

O atendimento à norma com relação ao momento fletor é o objetivo principal deste trabalho, cujas verificações serão realizadas para todos os exemplos. A verificação com relação ao esforço cortante em lajes é apresentada na norma pelo item 19.4, por meio da verificação da Força cortante resistente de cálculo (V_{Rd1}) comparada à Força cortante solicitante de cálculo (V_{Sd}). Quando $V_{Sd} \leq V_{Rd1}$ a laje não necessita de armadura transversal para resistir aos esforços de tração oriundos da força cortante. No caso de lajes usuais de edifícios residenciais, que é o objetivo deste trabalho, as forças cortantes são baixas, dispensando o emprego de armadura transversal.

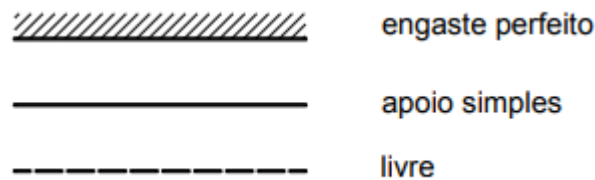
Para verificação do ELS serão analisadas as aberturas de fissuras e deformação excessiva, conforme NBR 6118:2014. Para o controle das fissuras, interessa saber se haverá fissuração na peça quando esta estiver em utilização, bem como limitar o valor desta abertura, quando houver. Neste caso, serão comparados o momento solicitante na laje com o momento de fissuração. No caso da verificação da deformação excessiva, os deslocamentos calculados deverão ser menores que os valores limites.

3.2 FORMULAÇÃO TEÓRICA ADOTADA PARA LAJE MACIÇA CONVENCIONAL (LMC)

3.2.1 Esforços solicitantes – Momento Fletor

Conforme as Tabelas de Bares que serão utilizadas para o cálculo das lajes maciças convencionais, a convenção de vinculação é feita com diferentes estilos de linhas, como mostrado na figura 10.

Figura 11 – Convenção de estilo de linha para os vínculos engaste perfeito, apoio simples e borda livre.



Fonte: BASTOS (2015, p.6)

Em função das várias combinações possíveis de vínculos nas quatro bordas da laje, é necessário fazer uma análise e determinar em qual exemplo ela se encaixa, de acordo com os números determinados na Tabela de Bares.

Conforme as Tabelas de Bares, os momentos fletores são calculados pela seguinte equação:

$$M = \mu \cdot \frac{p \cdot l_x^2}{100}$$

M : momento fletor (kN.m/m);

μ : coeficiente tabelado, de acordo com cada tipo de laje e em função de $\lambda = \frac{l_y}{l_x}$;

p : valor da carga atuante na laje (kN/m²);

l_x : menor vão da laje (m).

3.2.2 Momentos de fissuração

Para o cálculo das flechas é necessário conhecer o estágio de cálculo da seção crítica considerada. Segundo o item 17.3.1 da NBR 6118:2014 nos estados-limites de serviço as estruturas trabalham parcialmente no estágio I e parcialmente no estágio II. A separação entre esses dois comportamentos é definida pelo momento de fissuração. Esse momento pode ser calculado pela seguinte expressão aproximada:

$$M_R = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t}$$

M_R : momento de fissuração (kN.m/m);

α : é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta;

f_{ct} : é a resistência à tração direta do concreto (MPa);

I_c : é o momento de inércia da seção bruta de concreto (m^4);

y_t : é a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada (m).

O item 8.2.5 da NBR 6118:2014 demonstra que na falta de ensaios, o valor médio da resistência a tração direta ($f_{ct,m}$) pode ser avaliado em função da resistência característica do concreto a compressão (f_{ck}), por meio das seguintes expressões:

- Para concretos de classes até C50:

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

com:

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

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

- Para concretos de classes C55 até C90:

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

Utilizando o $f_{ct,m}$ e f_{ctk} em MPa. Os valores $f_{ctk,inf}$ e $f_{ctk,sup}$ são os valores mínimo e máximo para a resistência a tração direta. Se o momento atuante na laje for maior que o momento de fissuração, quer dizer que a seção está no estágio II, ou seja, está fissurada. Assim, deve-se considerar o módulo de elasticidade secante (E_{cs}) e a posição da linha neutra deve ser calculada no estágio II e deverá ser utilizada a inercia fissurada obtida por meio do cálculo do I_2 segundo a NBR 6118:2014.

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

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80}$$

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

Sendo:

E_{ci} : Módulo de elasticidade (MPa);

α_E : 1,2 para basalto e diabásio;

α_E : 1,0 para granito e gnaisse;

α_E : 0,9 para calcário;

α_E : 0,7 para arenito;

Quando se tem situação contrária, em que o momento atuante na laje seja menor que o momento de fissuração, a seção se encontra no estágio I, ou seja, não está fissurada. As deformações podem ser determinadas no estágio I, com momento de inércia da seção bruta de concreto (I_c).

$$I_c = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

I_c : momento de inércia da seção bruta de concreto;

3.2.3 Flechas

3.2.3.1 Flecha imediata

O cálculo da flecha imediata para carregamentos uniformes e triangulares pode ser obtido através da seguinte equação. Serão utilizadas as tabelas de Bares como referência para determinar os valores dos coeficientes.

$$a_i = \frac{\alpha \cdot b}{1200} \frac{p \cdot l_x^4}{EI}$$

$$EI = E_{cs} \cdot I_c$$

a_i : flecha imediata (m);

p : valor do carregamento na laje considerando a combinação quase permanente (kN/m²);

b : largura unitária da laje (m);

α : coeficiente tabelado em função de λ ou γ (ver tabelas A-6 e A-7 anexas);

EI : rigidez da laje a flexão;

Para o momento fletor na laje a ser comparado com o momento de fissuração, deve ser considerada a combinação quase permanente. No item 11.8.3.1 da NBR 6118:2014 diz que as combinações quase permanentes “podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura, e sua consideração pode ser necessária na verificação do estado-limite de deformações excessivas”.

Portanto, segundo a tabela 11.4 da NBR 6118:2014, para a combinação quase permanente, tem-se:

$$F_{d,ser} = \Sigma F_{gi,k} + \Sigma F_{\Psi_2j} F_{qj,k}$$

Após consulta à tabela 11.2 da referida norma, o valor do fator de redução de combinação quase permanente para ELS é $\Psi_2 = 0,3$ para cargas acidentais de edifícios residenciais (Tabela 11.2 – NBR 6118:2014). Assim, a combinação quase permanente é dada por:

$$p = 1. g + 0,3. q$$

g : carga permanente da laje (kN/m²);

q : carga acidental da laje (kN/m²).

3.2.3.2 Flecha diferida no tempo

De acordo com o item 17.3.2.1.2 da NBR 6118:2014, a flecha adicional diferida, decorrente das cargas de longa duração em função da fluência, pode ser calculada de maneira aproximada pela multiplicação da flecha imediata pelo fator α_f dado pela expressão:

$$\alpha_f = \frac{\Delta \xi}{1 + 50p'}$$

Em que:

$$p' = \frac{A_s'}{bd}$$

$$\Delta \xi = \xi(t) - \xi(t_0)$$

$$\xi(t) = 0,68(0,996^t)t^{0,32} \text{ para } t \leq 70 \text{ meses}$$

$$\xi(t) = 2 \text{ para } t > 70 \text{ meses}$$

ξ : coeficiente em função do tempo;

t : o tempo, em meses, quando se deseja o valor da flecha diferida;

t_0 : idade, em meses, relativa a data de aplicação da carga de longa duração.

Figura 12 – Valores dos coeficientes de ξ em função do tempo

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

Fonte: NBR 6118:2014.

Portanto, para obtenção da flecha total, deve-se multiplicar a flecha imediata por $1 + \alpha_f$:

$$a_t = a_i(1 + \alpha_f)$$

Para o cálculo da flecha limite, tem-se:

$$f_{lim} = \frac{l}{250}$$

l : comprimento do vão na direção considerada da laje (m).

Assim, o valor da flecha total precisa ser menor que a flecha limite.

3.2.4 Determinação da área de aço

O item 14.6.4.3 da NBR 6118:2014 especifica que “A capacidade de rotação dos elementos estruturais é função da posição da linha neutra no ELU. Quanto menor for x/d , tanto maior será essa capacidade.

Para proporcionar o adequado comportamento dúctil em vigas e lajes, a posição da linha neutra no ELU deve obedecer aos seguintes limites:

- a) $x/d \leq 0,45$, para concretos com $f_{ck} \leq 50$ Mpa;
- b) $x/d \leq 0,35$, para concretos com $50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$.

Conhecendo os momentos fletores máximos atuantes na laje, o dimensionamento a flexão normal simples pode ser obtido de uma forma semelhante ao cálculo de vigas, supondo faixas de 100 cm de largura.

$$K_c = \frac{b_w \cdot d^2}{M_d}$$

$$M_d = M \cdot 1,4$$

Com M_d em kN.m

Para determinar a espessura do cobrimento é necessário avaliar em qual classe de agressividade ambiental a estrutura está inserida. Nos projetos das estruturas correntes, a agressividade ambiental deve ser classificada de acordo com o apresentado na Tabela 03 e pode ser avaliada, simplificada, segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes (NBR 6118, item 6.4.2).

Figura 13 – Classes de agressividade ambiental (CAA)

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

^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: NBR 6118:2014

Conforme os valores constantes na Tabela 04 e classe de agressividade ambiental II com Δc de 10 mm, para cálculo das armaduras positivas e negativas foi considerado o cobrimento nominal de 2,0 cm.

Figura 14 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10 \text{ mm}$

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

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.
^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal $\geq 15 \text{ mm}$.
^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.
^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal $\geq 45 \text{ mm}$.

Fonte: NBR 6118:2014

Para concretos de classe de resistência superior ao mínimo exigido, os cobrimentos definidos na Tabela 04 podem ser reduzidos em até 5 mm.

Considerando armadura composta por barras com diâmetro de 10 mm, temos:

$$d = h - c - \frac{\phi_{aço}}{2}$$

Portanto, a altura útil será:

$$d = h - 2,0 \text{ cm para momentos fletores negativos e positivos}$$

Utilizando a tabela A-8 do anexo, determinam-se os valores dos coeficientes de B_x e K_s e o domínio em que a laje está. Com o $B_x = x/d$ é determinada a posição da linha neutra, de modo a verificar os valores limites para a relação x/d .

Se todos os valores limites forem atendidos, a área de armadura, em cm^2/m , é calculada com:

$$A_s = K_s \frac{M_d}{d}$$

Na tabela A-9 encontram-se o diâmetro e o espaçamento das barras para uma dada área de armadura em cm²/m.

3.2.4.1 Armadura mínima

De acordo com a tabela 06, a armadura mínima, negativa para lajes sem armaduras ativas, e positiva para lajes armadas em uma direção, deve ser:

$$\rho_s \geq \rho_{\min}$$

Segundo a tabela 05, para o concreto C25 a taxa de armadura mínima será igual:

$$\rho_{\min} = \frac{A_s}{b_w \cdot h} = 0,15\%$$

Considerando $b_w = 100 \text{ cm}$ a armadura mínima resulta:

$$A_{s,\min} = 0,15 \cdot h$$

Sendo: $A_{s,\min}$ = cm²/m para h em centímetros.

Para as lajes armadas em duas direções, a armadura mínima positiva deve ser multiplicada por 0,67, tal que:

$$A_{s,\min} = 0,67 \cdot 0,15 \cdot h = 0,10h$$

Sendo: $A_{s,\min}$ = cm²/m para h em centímetros.

Portanto, a área de armadura calculada deverá ser maior que a armadura mínima exigida pela NBR 6118.

$$A_s \geq A_{s,\min}$$

Figura 15 – Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas

Forma da seção	Valores de $\rho_{\min}^a$ ($A_{s,\min}/A_c$) %														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256

^a Os valores de $\rho_{\min}$ estabelecidos nesta Tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $d/h = 0,8$ e $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, $\rho_{\min}$ deve ser recalculado.

Fonte: NBR 6118:2014

Figura 16 – Valores mínimos para armaduras passivas aderentes

Armadura	Elementos estruturais sem armaduras ativas	Elementos estruturais com armadura ativa aderente	Elementos estruturais com armadura ativa não aderente
Armaduras negativas	$\rho_s \geq \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,67 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,67 \rho_{\min}$ (ver 19.3.3.2)
Armaduras negativas de bordas sem continuidade	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min}$		
Armaduras positivas de lajes armadas nas duas direções	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$
Armadura positiva (principal) de lajes armadas em uma direção	$\rho_s \geq \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$	$\rho_s \geq \rho_{\min} - 0,5 \rho_p \geq 0,5 \rho_{\min}$
Armadura positiva (secundária) de lajes armadas em uma direção	$A_s/s \geq 20\%$ da armadura principal $A_s/s \geq 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ $\rho_s \geq 0,5 \rho_{\min}$		—
onde $\rho_s = A_s/b_W h$ e $\rho_p = A_p/b_W h$. NOTA Os valores de $\rho_{\min}$ são definidos em 17.3.5.2.1.			

Fonte: NBR 6118:2014

3.3 FORMULAÇÃO TEÓRICA ADOTADA PARA LAJE NERVURADA MOLDADA *IN LOCO* (LNML)

3.3.1 Momento atuante na nervura

Conforme as Tabelas de Bares que serão utilizadas para o cálculo das lajes maciças convencionais, a convenção de vinculação é feita com diferentes estilos de linhas, como mostrado na figura 10.

Em função das várias combinações possíveis de vínculos nas quatro bordas da laje, é necessário fazer uma análise e determinar em qual exemplo ela se encaixa, de acordo com os números determinados na Tabela de Bares.

Conforme as Tabelas de Bares, os momentos fletores são calculados pela seguinte equação:

$$M_x = \mu \cdot \frac{p_{nervura_x} \cdot l_x^2}{100} \quad M_y = \mu \cdot \frac{p_{nervura_y} \cdot l_y^2}{100}$$

M : momento na nervura (kN.m/m);

μ : coeficiente tabelado, de acordo com cada tipo de laje e em função de $\lambda = \frac{l_y}{l_x}$;

p : valor da carga atuante na laje (kN/m²);

l : vão na direção x da laje (m).

3.3.2 Determinação da área de aço

Conhecendo os momentos fletores máximos atuantes na laje, o dimensionamento a flexão normal simples pode ser obtido de uma forma semelhante ao cálculo de vigas, supondo faixas conforme a distância entre eixos de nervuras.

O cálculo da armadura para combater a flexão deve ser calculado nas direções x e y, para suportar as flexões obtidas na laje nervurada moldada in loco.

$$K_{c_x} = \frac{b_{nerv} \cdot d^2}{M_{d_x}} \quad K_{c_y} = \frac{b_{nerv} \cdot d^2}{M_{d_{xy}}}$$

$$M_{d_x} = M_{x.nerv} \cdot 1,4 \quad M_{d_y} = M_{y.nerv} \cdot 1,4$$

M_d : momento de cálculo (kN.m);

M_{nerv} : momento atuante na nervura.

$d = h - 2,0$ cm para momentos fletores negativos e positivos

Utilizando a tabela A-8 do anexo, determinam-se os valores dos coeficientes de B_x e K_s e o domínio em que a laje está. Com o $B_x = x/d$ é determinada a posição da linha neutra, de modo a verificar os valores limites para a relação x/d .

Se todos os valores limites forem atendidos, a área de armadura, em cm^2/m , é calculada com:

$$A_s = K_s \frac{M_{nerv}}{d}$$

Na tabela A-9 encontram-se o diâmetro e o espaçamento das barras para uma dada área de armadura em cm^2/m .

3.3.2.1 Armadura mínima

Segundo a tabela 06, para o concreto C25 a taxa de armadura mínima será igual:

$$\rho_{\min} = \frac{A_s}{h \cdot b_w} = 0,15\%$$

$$A_{s.\min} = \frac{0,15}{100} \cdot h \cdot b_w$$

Sendo: $A_{s.\min} = \text{cm}^2/\text{nervura}$

Portanto, a área de armadura calculada deverá ser maior que a armadura mínima exigida pela NBR 6118.

$$A_s \geq A_{s.\min}$$

A área de aço deverá ser adotada para as nervuras das duas direções considerando que elas irão possuir as mesmas dimensões.

- **Armadura da mesa**

Como os exemplos adotados terão uma distância entre eixos de nervura menor que 65cm, basta colocar uma malha com armadura mínima na mesa. A área de aço em cada direção é igual a:

$$A_{sm} = 0,15h_f$$

A_{sm} : área de aço em cada direção na mesa (cm^2/m);

h_f : altura da mesa (cm).

3.3.3 Características Geométricas

As características geométricas são valores necessários para obtenção das flechas atuantes na laje, podendo ser determinadas no estágio I ou estágio II conforme o momento atuante nas nervuras.

3.3.3.1 Área da seção transversal

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

Sendo:

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

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80}$$

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

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

$\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaiss;

$\alpha_E = 0,9$ para calcário;

$\alpha_E = 0,7$ para arenito;

De acordo com a NBR 6118:2014, item 8.3.5, na falta de ensaios ou valores fornecidos pelo fabricante, o módulo de elasticidade do aço (E_s) pode ser admitido igual a 210 GPa.

Dessa forma, determina-se a área transversal:

$$A_h = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h + A_s \cdot (\alpha_e - 1)$$

A_h : área da seção transversal (cm^2);

b_f : distância efetiva entre nervuras (cm);

b_w : espessura da nervura (cm);

h_f : espessura da mesa (cm);

h : altura total da laje (cm);

A_s : área de aço (cm²).

3.3.3.2 Centro de gravidade

$$y_h = \frac{(b_f - b_w) \cdot \left(\frac{h_f^2}{2}\right) + b_w \cdot \left(\frac{h^2}{2}\right) + A_s \cdot (\alpha_e - 1) \cdot d}{A_h}$$

y_h : centro de gravidade (cm);

A_h : área da seção transversal (cm²);

b_f : distância efetiva entre nervuras (cm);

b_w : espessura da nervura (cm);

h_f : espessura da mesa (cm);

h : altura total da laje (cm);

d : altura atuante (cm).

3.3.3.3 Momento de Inércia

Se o momento atuante na nervura for menor que o momento de fissuração, a seção se encontra no estágio I, ou seja, não está fissurada. Quando temos uma situação contrária, em que o momento atuante na nervura for maior que o momento de fissuração, quer dizer que a seção se encontra no estágio II. Assim, deve-se considerar o momento de inércia de acordo com o estágio.

- **Estádio I**

$$I_c = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(y_h - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w \cdot h \cdot \left(y_h - \frac{h}{2}\right)^2 + A_s \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (y_h - d)^2$$

I_c : momento de Inércia (cm⁴);

y_h : centro de gravidade (cm);

b_f : distância efetiva entre nervuras (cm);

b_w : espessura da nervura (cm);

h_f : espessura da mesa (cm);

h : altura total da laje (cm);

d : altura atuante (cm).

3.3.4 Flechas

3.3.4.1 Flecha imediata

Considerando uma largura $b = 100 \text{ cm}$, determina-se a altura h_n da laje maciça de mesma inércia à flexão que a da laje nervurada moldada *in loco* no estádio I.

$$h_n = \left(\frac{12 \cdot I_c}{100} \right)^{1/3}$$

O cálculo da flecha imediata pode ser obtido através da seguinte expressão, de acordo com o estádio atuante. Serão utilizadas as tabelas de Bares como referência para determinar os valores dos coeficientes.

$$a_i = \frac{p \cdot l^4 \cdot \alpha}{E_{cs} \cdot h_n^3 \cdot 100}$$

a_i : flecha imediata (m);

p : carga quase permanente (kN/m²);

h_n : altura equivalente da laje nervurada moldada *in loco* (m);

α : coeficiente tabelado em função de λ ou γ (ver tabelas A-6 e A-7 anexas);

l : menor vão na laje (m).

Para o momento atuante na nervura a ser comparado com o momento de fissuração, deve ser considerada a combinação quase permanente. No item 11.8.3.1 da NBR 6118:2014 diz que as combinações quase permanentes “podem atuar durante grande

parte do período de vida da estrutura, e sua consideração pode ser necessária na verificação do estado-limite de deformações excessivas”.

Portanto, segundo a tabela 11.4 da NBR 6118:2014, para a combinação quase permanente, tem-se:

$$F_{d,ser} = \Sigma F_{gi,k} + \Sigma F_{\Psi_2j} F_{qj,k}$$

Após consulta à tabela 11.2 da referida norma, o valor do fator de redução de combinação quase permanente para ELS é $\Psi_2 = 0,3$ para cargas acidentais de edifícios residenciais (Tabela 11.2 – NBR 6118:2014). Assim, a combinação quase permanente é dada por:

$$p = 1.g + 0,3.q$$

3.3.4.2 Flecha diferida no tempo

De acordo com o item 17.3.2.1.2 da NBR 6118:2014, a flecha adicional diferida, decorrente das cargas de longa duração em função da fluência, pode ser calculada de maneira aproximada pela multiplicação da flecha imediata pelo fator α_f dado pela expressão:

$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1 + 50p'}$$

Em que:

$$p' = \frac{A_s'}{bd}$$

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0)$$

$$\xi(t) = 0,68(0,996^t)t^{0,32} \text{ para } t \leq 70 \text{ meses}$$

$$\xi(t) = 2 \text{ para } t > 70 \text{ meses}$$

ξ : coeficiente em função do tempo;

t : o tempo, em meses, quando se deseja o valor da flecha diferida;

t_0 : idade, em meses, relativa a data de aplicação da carga de longa duração.

Portanto, para obtenção da flecha total, deve-se multiplicar a flecha imediata por $1 + \alpha_f$:

$$a_t = a_i(1 + \alpha_f)$$

Para o cálculo da flecha limite, tem-se:

$$f_{lim} = \frac{l}{250}$$

l : comprimento do vão na direção considerada da laje (m).

Assim, o valor da flecha total precisa ser menor que a flecha limite.

3.4 FORMULAÇÃO TEÓRICA ADOTADA PARA LAJE NERVURADA PRÉ-MOLDADA

3.4.1 Momento atuante na nervura

Devido à laje nervurada pré-moldada unidirecional ser mais utilizada em edifícios residenciais, as vigotas são apoiadas em uma só direção. Portanto, o momento fletor será calculado somente para direção de apoio através da fórmula:

$$M_{nervura} = p_{nervura} \cdot \frac{l^2}{8}$$

$M_{nervura}$: momento fletor na nervura (kN.m);

$p_{nervura}$: valor da carga atuante na nervura (kN/m²);

l : menor vão da laje (m).

3.4.2 Momento de fissuração

$$M_R = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t}$$

$$y_t = h - y_{cg}$$

$$A_g = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h$$

$$y_{cg} = \frac{(b_f - b_w) \cdot \left(\frac{h_f^2}{2}\right) + b_w \cdot \frac{h^2}{2}}{A_g}$$

M_R : momento de fissuração (kN.m);

α : é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta;

f_{ct} : é a resistência à tração direta do concreto (MPa);

I_c : é o momento de inércia da seção bruta de concreto no estágio I (m^4);

y_t : é a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada (m);

b_f : distância efetivas entre nervuras (m);

b_w : espessura da nervura (m);

h_f : espessura da mesa (m);

h : altura total da laje (m).

Na falta de ensaios, o valor médio da resistência a tração direta ($f_{ct,m}$) pode ser avaliado em função da resistência característica do concreto a compressão (f_{ck}), por meio das expressões descritas na NBR 6118 (item 8.2.5).

- Para concretos de classes até C50:

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

com:

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

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

- Para concretos de classes C55 até C90:

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

Utilizando o $f_{ct,m}$ e f_{ctk} em MPa.

3.4.3 Determinação da área de aço

A área de aço na laje nervurada é determinada em cada nervura que tem por finalidade combater a flexão normal simples causado pelos momentos fletores atuantes na laje. O K_{Md} calculado pela expressão abaixo é o valor de entrada na Tabela A-10 do anexo.

$$K_{Md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot \frac{f_{cd}}{10}}$$

Sendo:

$$M_d = 1,4 \cdot M_{nervura}$$

$$d = h - 2$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4}$$

$$b_f = b_w + 2 \cdot b_1$$

$$b_1 \leq \begin{matrix} 0,10 \cdot l_{ef} \\ 0,5 \cdot b_e \end{matrix}$$

b_w : espessura da nervura (m);

d : altura atuante (cm);

h : altura total da laje (cm);

f_{cd} : resistência de dimensionamento a compressão (MPa);

f_{ck} : resistência característica do concreto a compressão (MPa).

Através do valor encontrado do K_{Md} utilizamos a Tabela A-10 do anexo para encontrar o K_x e K_z . Adota-se um valor inicial da espessura da mesa (h_f) e ela deverá ser maior que o valor do centro de gravidade encontrado para a condição ser atendida.

Assim, a área de armadura, em $\text{cm}^2/\text{nervura}$, é calculada por:

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

Sendo:

$$M_d = 1,4 \cdot M_{nervura}$$

$$d = h - 2$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15}$$

A_s : área de aço (cm^2);

d : altura atuante (cm);

h : altura total da laje (cm).

3.4.3.1 Armadura mínima

Segundo a tabela 05, para o concreto C25 a taxa de armadura mínima será igual:

$$\rho_{\min} = \frac{A_s}{h \cdot b_w} = 0,15\%$$

$$A_{s,\min} = \frac{0,15}{100} \cdot h \cdot b_w$$

Sendo: $A_{s,\min}$ = cm²/nervura

Portanto, a área de armadura calculada deverá ser maior que a armadura mínima exigida pela NBR 6118/2014.

$$A_s \geq A_{s,\min}$$

A área de aço deverá ser adotada para as nervuras das duas direções considerando que elas irão possuir as mesmas dimensões.

- **Armadura da mesa**

Como os exemplos adotados terão uma distância entre eixos de nervura menor que 65 cm, basta colocar uma malha com armadura mínima na mesa. A área de aço em cada direção é igual a:

$$A_{sm} = 0,15h_f$$

A_{sm} : área de aço em cada direção na mesa (cm²/m);

h_f : altura da mesa (cm).

3.4.4 Características Geométricas

As características geométricas são valores necessários para obtenção das flechas atuantes na laje, podendo ser determinadas no estágio I ou estágio II conforme o momento atuante nas nervuras.

3.4.4.1 Área da seção transversal

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

Sendo:

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

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80}$$

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

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

$\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaiss;

$\alpha_E = 0,9$ para calcário;

$\alpha_E = 0,7$ para arenito;

De acordo com a NBR 6118:2014, item 8.3.5, na falta de ensaios ou valores fornecidos pelo fabricante, o módulo de elasticidade do aço (E_s) pode ser admitido igual a 210 GPa.

Dessa forma, determina-se a área transversal:

$$A_h = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h + A_s \cdot (\alpha_e - 1)$$

A_h : área da seção transversal (cm²);

b_f : distância efetiva entre nervuras (cm);

b_w : espessura da nervura (cm);

h_f : espessura da mesa (cm);

h : altura total da laje (cm);

A_s : área de aço (cm²).

3.4.4.2 Centro de gravidade

$$y_h = \frac{(b_f - b_w) \cdot \left(\frac{h_f^2}{2}\right) + b_w \cdot \left(\frac{h^2}{2}\right) + A_s \cdot (\alpha_e - 1) \cdot d}{A_h}$$

y_h : centro de gravidade (cm);

A_h : área da seção transversal (cm²);

b_f : distância efetiva entre nervuras (cm);

b_w : espessura da nervura (cm);

h_f : espessura da mesa (cm);

h : altura total da laje (cm);

d : altura atuante (cm).

3.4.4.3 Momento de Inércia

Se o momento atuante na nervura for menor que o momento de fissuração, a seção se encontra no estágio I, ou seja, não está fissurada. Quando temos uma situação contrária, em que o momento atuante na nervura for maior que o momento de fissuração, quer dizer que a seção se encontra no estágio II. Assim, deve-se considerar o momento de inércia de acordo com o estágio.

- **Estádio I**

$$I_c = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(y_h - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w \cdot h \cdot \left(y_h - \frac{h}{2}\right)^2 + A_s \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (y_h - d)^2$$

I_c : momento de Inércia (cm⁴);

y_h : centro de gravidade (cm);

b_f : distância efetiva entre nervuras (cm);

b_w : espessura da nervura (cm);

h_f : espessura da mesa (cm);

h : altura total da laje (cm);

d : altura atuante (cm).

- **Estádio II**

$$I_{II} = \frac{b_f \cdot X_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (X_{II} - d)^2 + (\alpha_e - 1) \cdot A'_s \cdot (X_{II} - d')^2$$

$$X_{II} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1}$$

Considerando que $X_{II} < h_f$, , utilizar nas expressões abaixo $b_w = b_f$ (vamos retirar isso que está grifado) $a_1 = \frac{b_w}{2}$

$$a_2 = h_f \cdot (b_f - b_w) + (\alpha_e - 1) \cdot A'_s + \alpha_e \cdot A_s$$

$$a_3 = -d' \cdot (\alpha_e - 1) \cdot A'_s - d \cdot \alpha_e \cdot A_s - \frac{h_f^2}{2} \cdot (b_f - b_w)$$

3.4.5 Flechas

3.4.5.1 Flecha imediata

O cálculo da flecha imediata pode ser obtido através da seguinte expressão, de acordo com o estágio atuante.

- **Estádio I**

$$a_i = \frac{5 \cdot p \cdot b_f \cdot l^4}{384 \cdot (EI)}$$

$$(EI) = E_{cs} \cdot I_c$$

a_i : flecha imediata (cm)

p : carga quase permanente (kN/cm)

l : Maior vão na laje (cm)

- **Estádio II**

$$a_i = \frac{5 \cdot p \cdot b_f \cdot l^4}{384 \cdot (EI)_{eq}}$$

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \cdot \left\{ \left(\frac{M_R}{M_{at}} \right)^3 \cdot I_c + \left[1 - \left(\frac{M_R}{M_{at}} \right)^3 \right] \cdot I_{II} \right\} < E_{cs} \cdot I_c$$

$$M_{at} = \frac{p \cdot l^2}{8}$$

Para o momento atuante na nervura a ser comparado com o momento de fissuração, deve ser considerada a combinação quase permanente. No item 11.8.3.1 da NBR 6118:2014 diz que as combinações quase permanentes “podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura, e sua consideração pode ser necessária na verificação do estado-limite de deformações excessivas”.

Portanto, segundo a tabela 11.4 da NBR 6118:2014, para a combinação quase permanente, tem-se:

$$F_{d,ser} = \Sigma F_{gi,k} + \Sigma F_{\Psi_2j} F_{qj,k}$$

Após consulta à tabela 11.2 da referida norma, o valor do fator de redução de combinação quase permanente para ELS é $\Psi_2 = 0,3$ para cargas acidentais de edifícios residenciais (Tabela 11.2 – NBR 6118:2014). Assim, a combinação quase permanente é dada por:

$$p = 1. g + 0,3. q$$

3.4.5.2 Flecha diferida no tempo

De acordo com o item 17.3.2.1.2 da NBR 6118:2014, a flecha adicional diferida, decorrente das cargas de longa duração em função da fluência, pode ser calculada de maneira aproximada pela multiplicação da flecha imediata pelo fator α_f dado pela expressão:

$$\alpha_f = \frac{\Delta \xi}{1 + 50p'}$$

Em que:

$$p' = \frac{A_s'}{bd}$$

$$\Delta \xi = \xi(t) - \xi(t_0)$$

$$\xi(t) = 0,68(0,996^t)t^{0,32} \text{ para } t \leq 70 \text{ meses}$$

$$\xi(t) = 2 \text{ para } t > 70 \text{ meses}$$

ξ : coeficiente em função do tempo;

t : o tempo, em meses, quando se deseja o valor da flecha diferida;

t_0 : idade, em meses, relativa a data de aplicação da carga de longa duração.

Portanto, para obtenção da flecha total, deve-se multiplicar a flecha imediata por $1 + \alpha_f$:

$$a_t = a_i(1 + \alpha_f)$$

Para o cálculo da flecha limite, tem-se:

$$f_{lim} = \frac{l}{250}$$

l : comprimento do vão na direção considerada da laje (m).

Assim, o valor da flecha total precisa ser menor que a flecha limite.

3.4.5.3 Contraflecha

Segundo a NBR 6118:2014 os deslocamentos excessivos podem ser parcialmente compensados por contraflechas.

$$a_0 = \frac{l}{250}$$

No caso de se adotar contraflecha, a flecha total a ser verificada passa a ser:

$$a_t = a_i(1 + \alpha_f) - a_o$$

4. METODOLOGIA

Os processos metodológicos empregados abordam pesquisa bibliográfica exploratória descritiva dos conteúdos relacionados ao dimensionamento de lajes de concreto armado submetidos à flexão e aos esforços dos momentos atuantes.

Serão apresentadas as definições teóricas para o dimensionamento estrutural, bem como as diretrizes normativas da norma brasileira NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.

Em seguida, a pesquisa será complementada com o cálculo de modelos estruturais em exemplos executivos, para efeito de comparação entre as áreas de aço, área de forma e os volumes de concreto para cada método construtivo adotado.

Por fim, os resultados obtidos no dimensionamento dos modelos adotados serão apresentados através de tabelas indicativas na qual evidenciarão em qual exemplo executivo terá o melhor aproveitamento dentro dos parâmetros apresentados, levando em conta sua atuação nos diferentes tamanhos de vãos e dimensões de vigas.

4.1 MODELAGEM FÍSICA

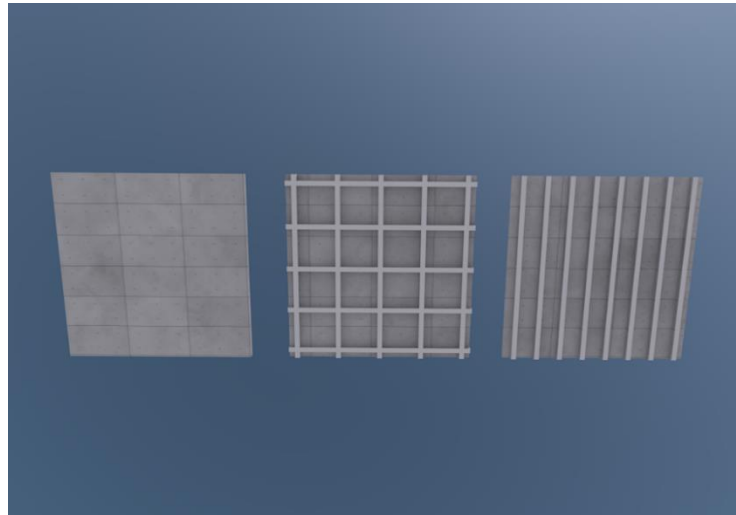
Levando em consideração todo o processo de dimensionamento de estruturas exercido durante o curso e experiências em campo, sendo elas em visitas técnicas ou em estágios, optou-se em adotar por uma edificação de caráter residencial. Tendo em vista que, o objetivo é de comparar três lajes de dimensões e modelos construtivos diferentes, as três plantas baixas utilizadas para o dimensionamento foram projetadas pelo grupo para atender as necessidades do projeto.

Após a escolha do tipo de edificação e da planta baixa, foram detalhadas as suas características, e foram extraídos da NBR 6120:1980 os pesos específicos, pela “Tabela 1 – Peso específico dos materiais de construção” (NBR 6120:1980) e as cargas verticais, segundo a “Tabela 2 – Valores mínimos das cargas verticais”.

Como mérito de decisão, os materiais e os métodos construtivos presenciados no cotidiano, foram escolhidos para o projeto, deixando o problema em questão dentro da realidade da região onde o estudo foi realizado.

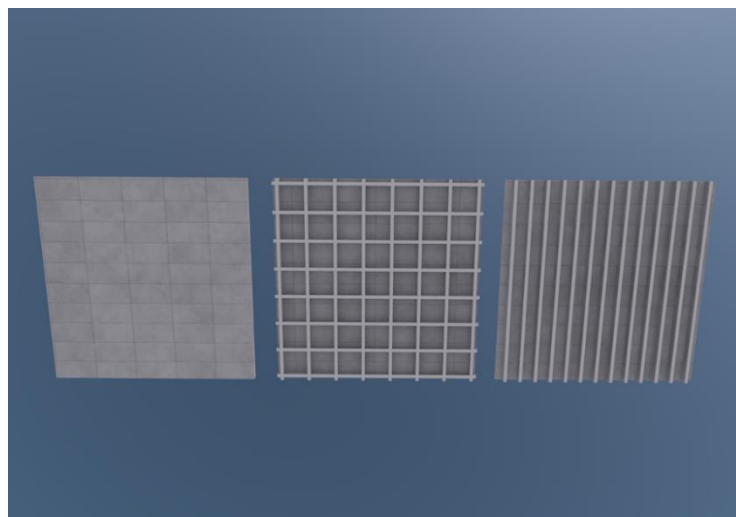
Para a criação dos modelos de ensaio foi levado em conta a mudança do comprimento dos vãos entre apoios, divididos em três dimensões, sendo eles: pequeno porte (vãos de até 3,00m); médio porte (vãos de até 5,00m); grande porte (vãos de até 7,00m). Obtendo, com isso, resultados diferentes de momentos fletores e consequentemente uma área de aço equivalente aos momentos.

Figura 17 – Perspectiva do comparativo dos tipos de lajes estudados – Pequeno porte.



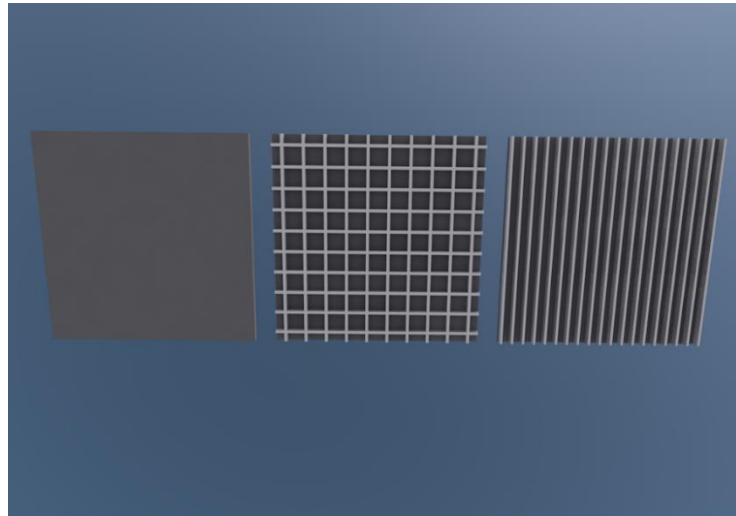
Fonte: Autores (2017)

Figura 18 – Perspectiva do comparativo dos tipos de lajes estudados – Médio porte.



Fonte: Autores (2017).

Figura 19 – Perspectiva do comparativo dos tipos de lajes estudados – Grande porte.

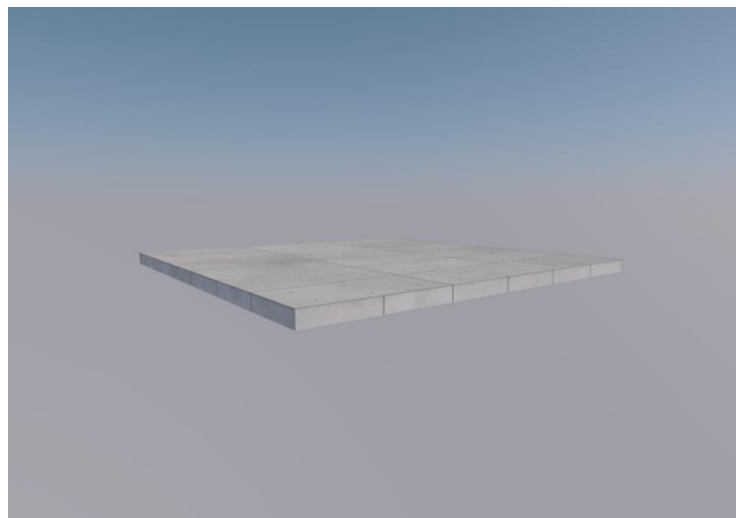


Fonte: Autores (2017)

4.1.1 Exemplo 1 – Laje maciça - Pequeno porte

Para o exemplo de pequeno porte de laje maciça, foi adotada laje com o vão de 3,00 m de comprimento entre apoios, vigas de 0,15m de largura e altura de 10 cm.

Figura 20 – Perspectiva Laje maciça – Pequeno porte.

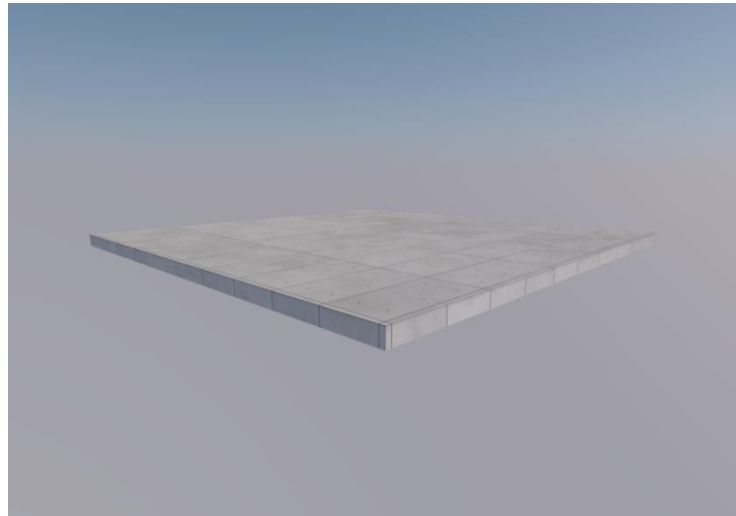


Fonte: Autores (2017)

4.1.2 Exemplo 2 – Laje maciça - Médio Porte

Para o exemplo de médio porte de laje maciça, foi adotada laje com o vão de 5,00 m de comprimento entre apoios, vigas de 0,15m de largura e altura de 14 cm.

Figura 21 – Perspectiva Laje maciça – Médio porte.

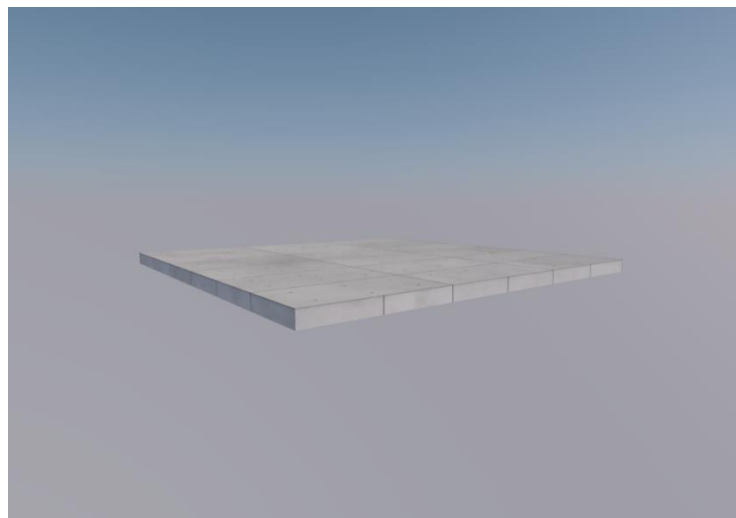


Fonte: Autores (2017)

4.1.3 Exemplo 3 – Laje maciça - Grande Porte

Para exemplo de grande porte de laje maciça, foi adotada laje com vão de 7,00 m de comprimento entre apoios, vigas de 0,15m de largura e altura de 22 cm.

Figura 22 – Perspectiva Laje maciça – Grande porte.



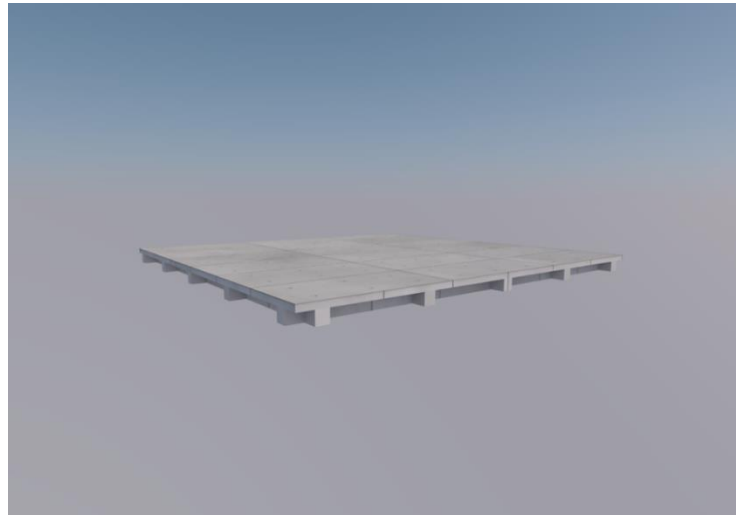
Fonte: Autores (2017)

4.1.4 Exemplo 4 – Laje nervurada moldada *in loco* – Pequeno Porte

Para o exemplo de pequeno porte de laje nervurada moldada *in loco*, foi adotada para as duas direções, laje com vão de 3,00 m, altura da nervura de 8,00 cm, espessura

da mesa de 4,00 cm, espessura da nervura de 8,00 cm e espaçamento entre nervuras de 60,00 cm.

Figura 23 – Perspectiva Laje nervurada moldada *in loco* – Pequeno porte.

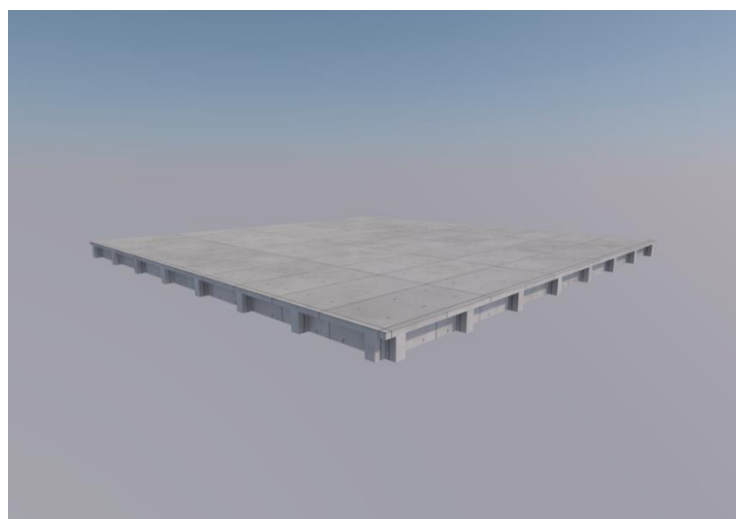


Fonte: Autores (2017)

4.1.5 Exemplo 5 – Laje nervurada moldada *in loco* - Médio Porte

Para o exemplo de médio porte de laje nervurada moldada *in loco*, foi adotada para as duas direções, laje com vão de 5,00 m, altura da nervura de 15,00 cm, espessura da mesa de 4,00 cm, espessura da nervura de 8,00 cm e espaçamento entre nervuras de 60,00 cm.

Figura 24 – Perspectiva Laje nervurada moldada *in loco* – Médio porte.

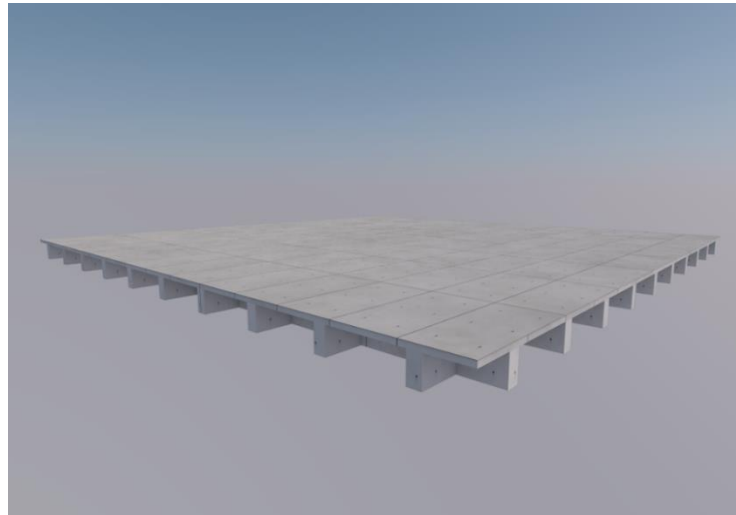


Fonte: Autores (2017)

4.1.6 Exemplo 6 – Laje nervurada moldada in loco - Grande Porte

Para o exemplo de grande porte de laje nervurada moldada in loco, foi adotada para as duas direções, laje com vão de 7,00 m, altura da nervura de 20,00 cm, espessura da mesa de 4,00 cm, espessura da nervura de 10,00 cm e espaçamento entre nervuras de 60,00 cm.

Figura 25 – Perspectiva Laje nervurada moldada *in loco* – Grande porte.

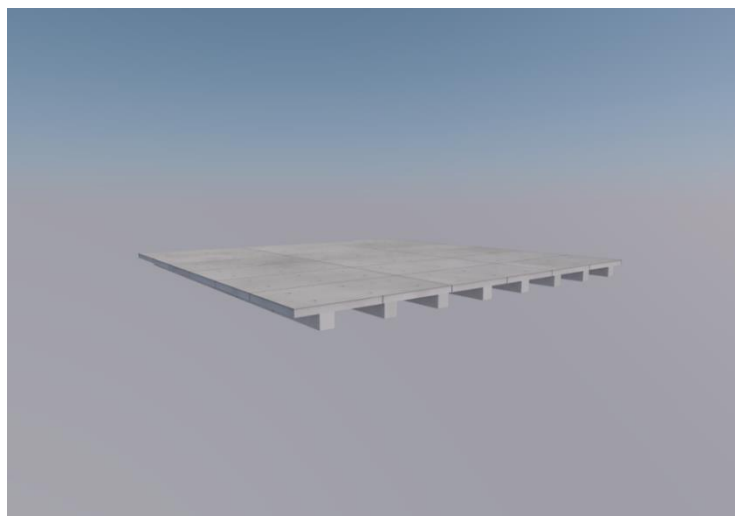


Fonte: Autores (2017)

4.1.7 Exemplo 7 – Laje nervurada pré-moldada - Pequeno Porte

Para o exemplo de pequeno porte de laje nervurada pré-moldada, foi adotada laje com vão de 3,00 m, espessura da mesa de 4,00 cm, altura da nervura de 10,00 cm, espessura da nervura de 8,00 cm e espaçamento entre nervuras de 30,00 cm.

Figura 26 – Perspectiva Laje nervurada pré-moldada – Pequeno porte.

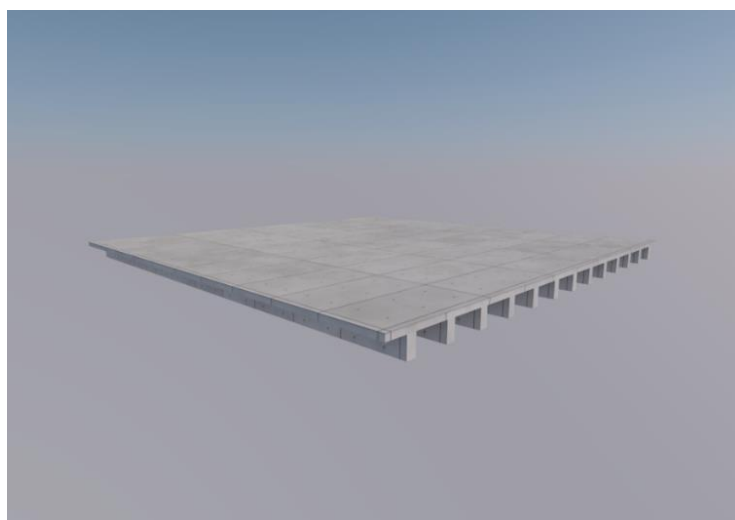


Fonte: Autores (2017)

4.1.8 Exemplo 8 – Laje nervurada pré-moldada - Médio Porte

Para o exemplo de médio porte de laje nervurada pré-moldada, foi adotada laje com vão de 5,00 m, espessura da mesa de 5,00 cm, altura da nervura de 16,00 cm, espessura da nervura de 8,00 cm e espaçamento entre nervuras de 30,00 cm.

Figura 27 – Perspectiva Laje nervurada pré-moldada – Médio porte.

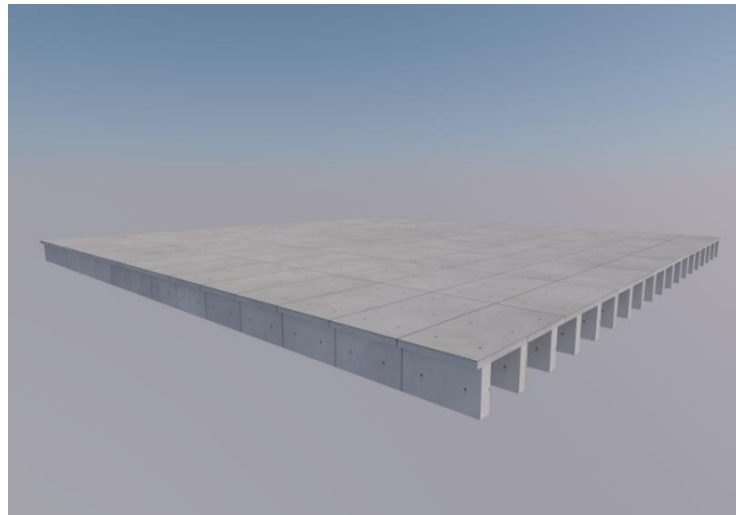


Fonte: Autores (2017)

4.1.9 Exemplo 9 – Laje nervurada pré-moldada - Grande Porte

Para o exemplo de grande porte de laje nervurada pré-moldada, foi adotada laje com vão de 7,00 m, espessura da mesa de 4,00 cm, altura da nervura de 25,00 cm, espessura da nervura de 8,00 cm e espaçamento entre nervuras de 30,00 cm.

Figura 28 – Perspectiva Laje nervurada pré-moldada– Grande porte.



Fonte: Autores (2017).

4.2 CARACTERÍSTICAS DA EDIFICAÇÃO

Para o projeto das lajes maciças e nervuradas devem ser consideradas as seguintes informações:

- Concreto com resistência de 25MPa e brita 1 de granito;
- Peso próprio do concreto igual a 25 kN/m³
- Aço CA-50;
- Ambiente do tipo: Edifícios Residenciais;
- Classe II de agressividade ambiental;
- Espessura mínima de cobrimento igual a 2,0cm;
- Coeficientes de ponderação $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$.

4.3 EXEMPLOS DE CÁLCULO

4.3.1 Exemplo 01 – Laje maciça – Pequeno porte

4.3.1.1 Classificação quanto a direção

$$\frac{b}{a} = \frac{3,0}{3,0} = 1,0$$

Portanto, a Laje 01 será armada em duas direções, pois o $a/b \leq 2$.

4.3.1.2 Vão efetivo

Para o cálculo do vão efetivo, iremos considerar a altura da L1 igual a 10cm e a largura das vigas de apoio igual a 15cm. Portanto, os vãos efetivos nas duas direções da laje serão os vãos livres acrescidos dos valores:

$$a_1 = a_2 \leq \begin{array}{l} \frac{t_1}{2} = \frac{15}{2} = 7,5 \text{ cm} \\ 0,3h = 0,3 \cdot 10 = 3 \text{ cm} \end{array}$$

$$l_{ef} = l_0 + a_1 + a_2 = 300 + 3 + 3 = 306 \text{ cm} = 3,06 \text{ m}$$

4.3.1.3 Ações atuantes nas lajes

$$p = g + q$$

Peso próprio (g): $P_P = e \cdot \gamma_{concreto} = 0,10 \cdot 25 = 2,5 \text{ kN/m}^2$

Peso do revestimento (g): $P_R = 0,15 \text{ kN/m}^2$

Peso da alvenaria (g): $P_A = 2,5 \text{ kN/m}^2$

Carga acidental (q): Segundo a tabela 2 da NBR 6120:1980, para a edificação do tipo edifícios residenciais, o valor mínimo para as cargas verticais será de $1,5 \text{ kN/m}^2$.

$$p = g + q = 2,5 + 0,15 + 2,5 + 1,5 = 6,65 \text{ kN/m}^2$$

4.3.1.4 Esforços solicitantes

- Momentos fletores:

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} = \frac{3,06}{3,06} = 1,0$$

Conforme a Tabela A-1 do anexo tem-se que a laje se encaixa no tipo 1, com valor de $\mu = 4,23$.

Portanto, o momento fletor pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$M = \mu \cdot \frac{p \cdot l_x^2}{100} = 4,23 \cdot \frac{6,65 \cdot 3,06^2}{100} = 2,63 \text{ kN.m/m}$$

- Momento de fissuração:

Segundo o item 17.3.1 da NBR 6118:2014, o valor de $\alpha = 1,5$ para seções retangulares.

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 0,3 \cdot 25^{2/3} = 2,56 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ct,m} = 0,7 \cdot 2,56 = 1,80 \text{ MPa}$$

$$I_c = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{1 \cdot 0,1^3}{12} = 8,33 \times 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$M_R = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t} = \frac{1,5 \cdot (1,80 \times 10^3) \cdot (8,33 \times 10^{-5})}{0,05} = 4,49 \text{ kN.m/m}$$

Desse modo, o momento fletor < momento de fissuração → OK!

4.3.1.5 Flechas

- Flecha imediata

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} = 0,86 \cdot 28000 = 24150 \text{ MPa}$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{25}{80} = 0,86$$

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} = 1,0 \cdot 5600 \cdot \sqrt{25} = 28000 \text{ MPa}$$

Para a combinação quase permanente, tem-se que:

$$p = 1 \cdot g + 0,3 \cdot q = 1,5,15 + 0,3 \cdot 1,5 = 5,6 \text{ kN/m}^2$$

Conforme Tabela A-6 do anexo, encontra-se $\alpha = 4,76$, para o tipo 1 de laje.

$$a_i = \frac{\alpha \cdot b \cdot p \cdot l_x^4}{1200 \cdot EI} = \frac{4,76 \cdot 1}{1200} \frac{5,6 \cdot 3,06^4}{(24150 \cdot 10^3) \cdot (8,33 \times 10^{-5})} = 0,97 \text{ mm}$$

- Flecha diferida no tempo

$$\alpha_f = \frac{\Delta \xi}{1 + 50p'} = \frac{1,32}{1 + 0} = 1,32 \text{ mm}$$

Portanto, $p' = 0$, pois não existe armadura comprimida A_s' (armadura superior na área do centro da laje).

$$p' = \frac{A_s'}{bd} = 0$$

Considerando o tempo igual a 1 mês para desforma da laje após a execução:

$$\Delta \xi = \xi(t) - \xi(t_0) = 2 - 0,68 = 1,32$$

Assim, a flecha total será igual:

$$a_t = a_i(1 + \alpha_f) = 0,97(1 + 1,32) = 2,25 \text{ mm}$$

Calculando a flecha limite:

$$f_{lim} = \frac{l}{250} = \frac{3,06}{250} = 12,24 \text{ mm}$$

Assim, a flecha total < flecha limite → OK!

4.3.1.6 Determinação da área de aço

Calculando o dimensionamento a flexão normal simples:

$$K_c = \frac{b_w \cdot d^2}{M_d} = \frac{100 \cdot 8^2}{263 \cdot 1,4} = 17,36$$

$$M_d = M \cdot 1,4$$

Na tabela A-8 do anexo, $K_s = 0,023$, domínio 2, e para verificação da posição da linha neutra, tem-se que:

$$B_x = \frac{x}{d} = 0,04 \leq 0,45 \rightarrow OK!$$

Para momentos fletores negativos e positivos:

$$d = h - 2,0 = 10 - 2,0 = 8,0 \text{ cm}$$

Portanto, a área de armadura será igual:

$$A_s = K_s \frac{M_d}{d} = 0,023 \cdot \frac{263,1,4}{8} = 1,06 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Para a armadura mínima:

$$A_{s,min} = 0,67 \cdot 0,15 \cdot h = 0,10h = 0,10 \cdot 10 = 1,00 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Assim, a área de armadura calculada > área mínima → OK!

Portanto, como a L1 possui o mesmo comprimento em l_x e l_y a área de aço será igual para as duas direções.

4.3.2 Exemplo 04 – Laje nervurada moldada *in loco* – Pequeno porte

4.3.2.1 Vão efetivo

Para o cálculo do vão efetivo, iremos considerar a altura da L4 igual a 12 cm e a largura das vigas de apoio igual a 15cm. Portanto, os vãos efetivos nas duas direções da laje serão os vãos livres acrescidos dos valores:

$$a_1 = a_2 \leq \frac{t_1}{2} = \frac{15}{2} = 7,5 \text{ cm}$$

$$0,3h = 0,3 \cdot 12 = 3,60 \text{ cm}$$

$$l_{ef} = l_0 + a_1 + a_2 = 300 + 3,6 + 3,6 = 307,2 \text{ cm} = 3,072 \text{ m}$$

4.3.2.2 Ações atuantes na laje

Peso próprio (g):

$$P_P = e_c \cdot \gamma_{concreto} = 0,0756 \cdot 25 = 1,89 \text{ kN/m}^2$$

$$e_c = [(1 - \xi)h^3 + \xi h_f^3]^{1/3} = [(1 - 0,779)12^3 + 0,779 \cdot 4^3]^{1/3} = 0,0756 \text{ m}$$

$$\xi = \frac{l_{ox}l_{oy}}{b_{wx}b_{wy}} = \frac{60 \cdot 60}{68 \cdot 68} = 0,779$$

Peso do revestimento (g): $P_R = 0,15 \text{ kN/m}^2$

Peso da alvenaria (g): $P_A = 2,5 \text{ kN/m}^2$

Carga accidental (q): Segundo a tabela 2 da NBR 6120, para a edificação do tipo edifícios residenciais, o valor mínimo para as cargas verticais será de $1,5 \text{ kN/m}^2$.

$$p = g + q = 1,89 + 0,15 + 2,5 + 1,5 = 6,04 \text{ kN/m}^2$$

Carga por nervura:

$$P_{nervura} = b_{nerv} (P_p + P_A + P_R + q) = 0,68 \cdot (1,89 + 0,15 + 2,5 + 1,5) = 4,11 \text{ kN/m}$$

4.3.2.3 Momento atuante na nervura

$$M = \mu \cdot \frac{p_{nervura} \cdot l^2}{100} = \frac{4,23 \cdot 4,11 \cdot 3,072^2}{100} = 1,64 \text{ kN.m}$$

4.3.2.4 Determinação da área de aço

$$K_c = \frac{b_{nerv} \cdot d^2}{M_d} = \frac{68 \cdot 10^2}{2296} = 29,62$$

$$d = h - 2 = 12 - 2 = 10 \text{ cm}$$

$$M_d = M_{nerv} \cdot 1,4 = 1,4 \cdot 1,64 = 2,296 \text{ kN.m} = 2296 \text{ kN.cm}$$

Na tabela A-8 do anexo, $K_s = 0,023$, domínio 2, e para verificação da posição da linha neutra, tem-se que:

$$B_x = \frac{x}{d} = 0,02 \leq 0,45 \rightarrow OK!$$

Para momentos fletores negativos e positivos:

$$d = h - 2,0 = 12 - 2,0 = 10,0 \text{ cm}$$

Portanto, a área de armadura será igual:

$$A_s = K_s \frac{M_d}{d} = 0,023 \cdot \frac{229,6}{10} = 0,53 \text{ cm}^2/\text{nervura}$$

Para a armadura mínima:

$$A_{s,min} = \frac{0,15}{100} \cdot h \cdot b_w = \frac{0,15 \cdot 12 \cdot 68}{100} = 0,14 \text{ cm}^2/\text{nervura}$$

Para a armadura mínima da mesa, tem-se:

$$A_{sm} = 0,15h_f = 0,15 \cdot 4 = 0,60 \text{ cm}^2/\text{m}$$

A área de armadura calculada > área mínima → OK!

Portanto, como a L4 possui o mesmo comprimento em l_x e l_y a área de aço será igual para as duas direções.

4.3.2.5 Características geométricas

- **Área da seção transversal**

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} = \frac{210000}{24150} = 8,7$$

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} = 0,86 \cdot 28000 = 24150 \text{ MPa}$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{25}{80} = 0,86$$

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} = 1,0 \cdot 5600 \cdot \sqrt{25} = 28000 \text{ MPa}$$

Dessa forma, determina-se a área transversal:

$$A_h = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h + A_s \cdot (\alpha_e - 1)$$

$$A_h = (68 - 8) \cdot 4 + 8 \cdot 12 + 0,53 \cdot (8,7 - 1) = 340,06 \text{ cm}^2$$

- **Centro de gravidade**

$$y_h = \frac{(b_f - b_w) \cdot \left(\frac{h_f^2}{2}\right) + b_w \cdot \left(\frac{h^2}{2}\right) + A_s \cdot (\alpha_e - 1) \cdot d}{A_h}$$

$$y_h = \frac{(68 - 8) \cdot \left(\frac{4^2}{2}\right) + 8 \cdot \left(\frac{12^2}{2}\right) + 0,53 \cdot (8,7 - 1) \cdot 10}{340,06} = 3,22 \text{ cm}$$

- **Momento de inércia**

Momento de inércia – Estádio I:

$$I_c = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(y_h - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w \cdot h \cdot \left(y_h - \frac{h}{2}\right)^2 + A_s \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (y_h - d)^2$$

$$I_c = \frac{(68 - 8) \cdot 4^3}{12} + \frac{8 \cdot 12^3}{12} + (68 - 8) \cdot 4 \cdot \left(3,22 - \frac{4}{2}\right)^2 + 8 \cdot 12 \cdot \left(3,22 - \frac{12}{2}\right)^2 + 0,53 \cdot (8,7 - 1) \cdot (3,22 - 10)^2 = 2757,92 \text{ cm}^4$$

4.3.2.6 Flechas

- **Flecha imediata**

Calculando a altura equivalente da laje nervurada moldada *in loco*, tem-se que:

$$h_n = \left(\frac{12 \cdot I_c}{100}\right)^{1/3} = \left(\frac{12 \cdot 2757,92}{100}\right)^{1/3} = 6,92 \text{ cm}$$

Para a combinação quase permanente, tem-se que:

$$p = 1 \cdot g + 0,3 \cdot q = 1,4,54 + 0,3 \cdot 1,5 = 4,99 \text{ kN/m}^2$$

Conforme Tabela A-6 do anexo, encontra-se $\alpha = 4,76$, para o tipo 1 de laje.

$$a_i = \frac{p \cdot l^4 \cdot \alpha}{E_{cs} \cdot h_n^3 \cdot 100} = \frac{4,99 \cdot 3,072^4 \cdot 4,76}{(24150 \times 10^3) \cdot \left(\frac{6,92}{100}\right)^3 \cdot 100} = 0,0026 \text{ m} = 0,26 \text{ cm}$$

- **Flecha diferida no tempo**

$$\alpha_f = \frac{\Delta \xi}{1 + 50p'} = \frac{1,32}{1 + 0} = 1,32 \text{ cm}$$

Portanto, $p' = 0$, pois não existe armadura comprimida A_s' (armadura superior na área do centro da laje).

$$p' = \frac{A_s'}{bd} = 0$$

Considerando o tempo igual a 1 mês para desforma da laje após a execução:

$$\Delta \xi = \xi(t) - \xi(t_0) = 2 - 0,68 = 1,32$$

Assim, a flecha total será igual:

$$a_t = a_i(1 + \alpha_f) = 0,26(1 + 1,32) = 0,61 \text{ cm}$$

Calculando a flecha limite:

$$f_{lim} = \frac{l}{250} = \frac{307,2}{250} = 1,23 \text{ cm}$$

Portanto, a flecha total < flecha limite → OK!

4.3.3 Exemplo 07 – Laje nervurada pré-moldada – Pequeno porte

4.3.3.1 Vão efetivo

Para o cálculo do vão efetivo, iremos considerar a altura da L7 igual a 14 cm e a largura das vigas de apoio igual a 15cm. Portanto, os vãos efetivos nas duas direções da laje serão os vãos livres acrescidos dos valores:

$$a_1 = a_2 \leq \frac{t_1}{2} = \frac{15}{2} = 7,5 \text{ cm}$$

$$0,3h = 0,3 \cdot 14 = 4,2 \text{ cm}$$

$$l_{ef} = l_0 + a_1 + a_2 = 300 + 4,2 + 4,2 = 3084 \text{ cm} = 3,084 \text{ m}$$

4.3.3.2 Ações atuantes na laje

- **Volume do bloco EPS**

$$V_{bloco} = \left((b_e \cdot h_e) + ((h_e - a_v) \cdot a_h \cdot 2) \right) \cdot c_e$$

$$V_{bloco} = \left((30 \cdot 10) + ((10 - 2,5) \cdot 1,5 \cdot 2) \right) \cdot 100$$

$$V_{bloco} = 32250 \text{ cm}^3$$

- **Peso específico do EPS**

$$\gamma_{aparente} = \frac{m_{bloco} \cdot 9,81}{\frac{1000}{\frac{V_{bloco}}{100^3}}}$$

$$\gamma_{aparente} = \frac{0,5.9,81}{\frac{1000}{\frac{32250}{100^3}}}$$

$$\gamma_{aparente} = 0,15 \text{ kN/m}^3$$

- **Área do bloco do EPS**

$$A_{bloco} = b_e \cdot h_e + ((h_e - a_v) \cdot 2 \cdot a_h)$$

$$A_{bloco} = 30 \cdot 10 + ((10 - 2,5) \cdot 2 \cdot 1,5)$$

$$A_{bloco} = 322,5 \text{ cm}^2$$

- **Área do concreto**

$$A_{concreto} = (b_w + b_e) \cdot (h_e + h_f) - A_{bloco}$$

$$A_{concreto} = (8 + 30) \cdot (10 + 4) - 322,5$$

$$A_{concreto} = 209,5 \text{ cm}^2$$

Peso próprio (g):

$$P_p = \left(\frac{\frac{A_{bloco} \cdot c_e \cdot \gamma_{aparente}}{100^3} + \frac{A_{concreto} \cdot c_e \cdot 25}{100^3}}{(b_e + b_w) \cdot c_e} \right) \cdot 100^2$$

$$P_p = \left(\frac{\frac{322,5 \cdot 100 \cdot 0,15}{100^3} + \frac{209,5 \cdot 100 \cdot 25}{100^3}}{(30 + 8) \cdot 100} \right) \cdot 100^2$$

$$P_p = 1,39 \text{ kN/m}^2$$

Peso do revestimento (g): $P_R = 0,15 \text{ kN/m}^2$

Peso da alvenaria (g): $P_A = 0,65 \text{ kN/m}^2$

Carga acidental (q): Segundo a tabela 2 da NBR 6120, para a edificação do tipo edifícios residenciais, o valor mínimo para as cargas verticais será de $1,5 \text{ kN/m}^2$.

$$p = g + q = 1,39 + 0,15 + 0,65 + 1,5 = 3,69 \text{ kN/m}^2$$

- **Carga por nervura**

$$P_{nervura} = b_{nerv}(P_p + P_A + P_R + q)$$

$$P_{nervura} = 0,38(1,39 + 0,65 + 0,15 + 1,5)$$

$$P_{nervura} = 1,40 \text{ kN/nervura}$$

4.3.3.3 Momento atuante na nervura

$$M_{nervura} = p_{nervura} \cdot \frac{l^2}{8}$$

$$M_{nervura} = 1,40 \cdot \frac{3,084^2}{8}$$

$$M_{nervura} = 1,67 \text{ kN.m}$$

4.3.3.4 Determinação da área de aço

$$b_f = b_w + 2 \cdot b_1 = 8 + 2 \cdot 15 = 38 \text{ cm}$$

$$b_1 \leq \begin{matrix} 0,10 \cdot l_{ef} = 0,10 \cdot 308,4 = 30,84 \text{ cm} \\ 0,5 \cdot b_e = 0,5 \cdot 30 = 15 \text{ cm} \end{matrix}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,4} = \frac{25}{1,4} = 17,86 \text{ MPa}$$

$$M_d = 1,4 \cdot M_{nervura} = 1,4 \cdot 1,67 \cdot 100 = 233,8 \text{ kN.cm}$$

$$d = h - 2 = 14 - 2 = 12 \text{ cm}$$

$$K_{Md} = \frac{M_d}{b_w \cdot d^2 \cdot \frac{f_{cd}}{10}} = \frac{233,8}{8 \cdot 12^2 \cdot \frac{17,86}{10}} = 0,113$$

De acordo com a tabela A-10 do anexo para $K_{Md} = 0,113$ temos $K_x = 0,182$ e $K_z = 0,927$. Adotando a espessura da mesa (h_f) igual a 4,0 cm, tem-se que a área de armadura:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15} = \frac{50}{1,15} = 43,48$$

$$A_s = \frac{M_d}{K_z \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{233,8}{0,927 \cdot 12 \cdot 43,48} = 0,48 \text{ cm}^2/\text{nervura}$$

4.3.3.5 Armadura mínima

$$A_{s,min} = \frac{0,15}{100} \cdot h \cdot b_w = \frac{0,15}{100} \cdot 14,8 = 0,17 \text{ cm}^2/\text{nervura}$$

Para a armadura mínima da mesa, tem-se:

$$A_{sm} = 0,15h_f = 0,15 \cdot 4 = 0,60 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Portanto, a área de aço calculada > área de aço mínima → OK!

4.3.3.6 Características geométricas

- **Área da seção transversal**

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} = \frac{210000}{24150} = 8,7$$

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} = 0,86 \cdot 28000 = 24150 \text{ MPa}$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{25}{80} = 0,86$$

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} = 1,0 \cdot 5600 \cdot \sqrt{25} = 28000 \text{ MPa}$$

Dessa forma, determina-se a área transversal:

$$A_h = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h + A_s \cdot (\alpha_e - 1)$$

$$A_h = (38 - 8) \cdot 4 + 8 \cdot 14 + 0,48 \cdot (8,7 - 1) = 235,71 \text{ cm}^2$$

- **Centro de gravidade**

$$y_h = \frac{(b_f - b_w) \cdot \left(\frac{h_f^2}{2}\right) + b_w \cdot \left(\frac{h^2}{2}\right) + A_s \cdot (\alpha_e - 1) \cdot d}{A_h}$$

$$y_h = \frac{(38 - 8) \cdot \left(\frac{4^2}{2}\right) + 8 \cdot \left(\frac{14^2}{2}\right) + 0,48 \cdot (8,7 - 1) \cdot 12}{235,71} = 4,53 \text{ cm}$$

- **Momento de inércia**

Momento de inércia – Estádio I:

$$I_c = \frac{(b_f - b_w) \cdot h_f^3}{12} + \frac{b_w \cdot h^3}{12} + (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot \left(y_h - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w \cdot h \cdot \left(y_h - \frac{h}{2}\right)^2 + A_s \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (y_h - d)^2$$

$$I_c = \frac{(38 - 8) \cdot 4^3}{12} + \frac{8 \cdot 14^3}{12} + (38 - 8) \cdot 4 \cdot \left(4,53 - \frac{4}{2}\right)^2 + 8 \cdot 14 \cdot \left(4,53 - \frac{14}{2}\right)^2 + 0,48 \cdot (8,7 - 1) \cdot (4,53 - 10)^2 = 3648,03 \text{ cm}^4$$

Momento de inércia – Estádio II:

Considerando que $X_{II} < h_f$:

$A'_s = 0$, pois não possui armadura superior

$$a_1 = \frac{b_w}{2} = \frac{38}{2} = 19 \text{ cm}$$

$$a_2 = h_f \cdot (b_f - b_w) + (\alpha_e - 1) \cdot A'_s + \alpha_e \cdot A_s = 4 \cdot (38 - 8) + (8,7 - 1) \cdot 0 + 8,7 \cdot 0,48 = 124,20 \text{ cm}^2$$

$$a_3 = -d' \cdot (\alpha_e - 1) \cdot A'_s - d \cdot \alpha_e \cdot A_s - \frac{h_f^2}{2} \cdot (b_f - b_w) = -12,8 \cdot 0,48 - \frac{4^2}{2} \cdot (38 - 8) = -290,37 \text{ cm}^3$$

$$X_{II} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1} = \frac{-124,20 \pm \sqrt{124,20^2 - 4 \cdot 19 \cdot (-290,37)}}{2 \cdot 19} = 1,83 \text{ cm} < 4,0 \text{ cm}$$

$$I_{II} = \frac{b_f \cdot X_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s \cdot (X_{II} - d)^2 + (\alpha_e - 1) \cdot A'_s \cdot (X_{II} - d')^2$$

$$I_{II} = \frac{38 \cdot 1,83^3}{3} + 8,7 \cdot 0,48 \cdot (1,83 - 12)^2 = 511,65 \text{ cm}^4$$

4.3.3.7 Momento de fissuração

$$A_g = (b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot h = (38 - 8) \cdot 4 + 8 \cdot 14 = 232,00 \text{ cm}$$

$$y_{cg} = \frac{(b_f - b_w) \cdot \left(\frac{h_f^2}{2}\right) + b_w \cdot \frac{h^2}{2}}{A_g} = \frac{(38 - 8) \cdot \left(\frac{4^2}{2}\right) + 8 \cdot \frac{14^2}{2}}{232} = 4,41 \text{ cm}$$

$$y_t = h - y_{cg} = 14 - 4,41 = 9,59 \text{ cm} = 9,59 \times 10^{-2} \text{ m}$$

Segundo o item 17.3.1 da NBR 6118:2014, o valor de $\alpha = 1,2$ para seções T.

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} = 0,3 \cdot 25^{2/3} = 2,56 \text{ MPa}$$

$$M_R = \frac{\alpha \cdot f_{ct} \cdot I_c}{y_t} = \frac{1,2 \cdot (2,56 \times 10^3) \cdot (3648,03 \times 10^{-8})}{(9,59 \times 10^{-2})} = 1,17 \text{ kN.m}$$

Portanto, o $M_{nervura} > M_R$, assim a laje está atuando no estágio II.

4.3.3.8 Flechas

- **Flecha imediata**

Para a combinação quase permanente, tem-se que:

$$p = 1 \cdot g + 0,3 \cdot q = 1,2,19 + 0,3 \cdot 1,5 = 2,64 \text{ kN/m}^2$$

$$M_{at} = \frac{p \cdot l^2}{8} = \frac{2,64 \cdot 3,084^2}{8} = 3,1401 \text{ kN.m} = 314,01 \text{ kN.cm}$$

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} = 1,0 \cdot 5600 \cdot \sqrt{25} = 28000 \text{ MPa}$$

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{25}{80} = 0,86$$

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} = 0,86 \cdot 28000 = 24150 \text{ MPa}$$

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \cdot \left\{ \left(\frac{M_R}{M_{at}} \right)^3 \cdot I_c + \left[1 - \left(\frac{M_R}{M_{at}} \right)^3 \right] \cdot I_{II} \right\} < E_{cs} \cdot I_c$$

$$(EI)_{eq} = 24150 \times 10^{-1} \cdot \left\{ \left(\frac{1,17}{314,01} \right)^3 \cdot (3648,03) + \left[1 - \left(\frac{1,17}{314,01} \right)^3 \right] \cdot (511,65) \right\} \\ < 24150 \times 10^{-1} \cdot (3648,03)$$

$$(EI)_{eq} = 1235634,855 < 8809982,91$$

Portanto, a flecha imediata:

$$a_i = \frac{5 \cdot p \cdot b_f \cdot l^4}{384 \cdot (EI)_{eq}} = \frac{5 \cdot 2,64 \cdot 38 \cdot 3,084^4}{384 \cdot 1235634,855} = 0,96 \text{ cm}$$

- **Flecha diferida no tempo**

$$\alpha_f = \frac{\Delta \xi}{1 + 50p'} = \frac{1,32}{1 + 0} = 1,32 \text{ cm}$$

Portanto, $p' = 0$, pois não existe armadura comprimida A_s' (armadura superior na área do centro da laje).

$$p' = \frac{A_s'}{bd} = 0$$

Considerando o tempo igual a 1 mês para desforma da laje após a execução:

$$\Delta \xi = \xi(t) - \xi(t_0) = 2 - 0,68 = 1,32$$

Adotando a contraflecha, tem-se:

$$a_0 = \frac{l}{250} = \frac{308,4}{250} = 1,23 \text{ cm}$$

Assim, a flecha total será igual:

$$a_t = a_i(1 + \alpha_f) - a_0 = 0,96(1 + 1,32) - 1,23 = 0,99 \text{ cm}$$

Calculando a flecha limite:

$$f_{lim} = \frac{l}{250} = \frac{308,4}{250} = 1,23 \text{ cm}$$

Portanto, a flecha total < flecha limite → OK!

4.3.4 Resultados obtidos nos exemplos

De acordo com o dimensionamento realizado para todos os exemplos dos métodos construtivos demonstrados, nas tabelas 01, 02 e 03, obtêm-se simplificadaamente os resultados obtidos para cada exemplo.

Tabela 01 – Resultados obtidos no dimensionamento de Lajes maciças

Exemplo	Vão (m)	Espessura (m)	Peso da laje (kN/m ²)	Momento Fletor (kN.m/m)	Momento de Fissuração (kN.m/m)	Flecha total (mm)	Área de aço (cm ² /m)
01	3	0,1	6,65	2,63	4,49	2,25	1,06
02	5	0,14	7,65	8,36	8,80	7,35	2,81
03	7	0,22	9,65	20,76	21,73	9,56	3,78

Fonte: Autores (2017).

Tabela 02 – Resultados obtidos no dimensionamento de Lajes nervuradas moldada *in loco*

Exemplo	Vão (m)	Peso da laje (kN/m ²)	Momento Fletor (kN.m/m)	Momento de Fissuração (kN.m/m)	Flecha total (cm)	Área de aço da nervura (cm ² /nerv)	Área de aço da mesa (cm ² /m)
04	3	6,04	2,41	0,71	0,61	0,53	0,6
05	5	7,05	7,80	1,82	1,39	1,01	0,6
06	7	8,02	17,32	3,44	2,58	1,77	0,6

Fonte: Autores (2017).

Tabela 03 – Resultados obtidos no dimensionamento de Lajes nervuradas pré-moldada

Exemplo	Vão (m)	Peso da laje (kN/m ²)	Momento Fletor (kN.m/m)	Momento de Fissuração (kN.m/m)	Flecha total (cm)	Área de aço da nervura (cm ² /nerv)	Área de aço da mesa (cm ² /m)
07	3	3,69	1,67	1,17	0,99	0,48	0,6
08	5	4,14	5,17	2,73	2,04	0,96	0,75
09	7	4,18	10,16	5,18	2,68	1,33	0,60

Fonte: Autores (2017).

5. RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO

5.1 CUSTO DOS MATERIAIS REFERENTE AOS MÉTODOS CONSTRUTIVOS

Na sequência apresentam-se os resultados encontrados a partir da contraposição entre as lajes: LNML, LMC e LNPM. Levando em consideração que as lajes estão simplesmente apoiadas, a carga acidental constante, variando a carga permanente e os vãos entre apoios. Para a definição do custo unitário dos materiais (aço, forma, concreto e EPS) foram utilizadas as tabelas de insumos e composições do SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil), pertinente ao estado do Espírito Santo, na data 11/10/17.

Considerando o valor do concreto $V_{concreto} = 286,57 \text{ R\$/m}^2$, valor do aço (CA-50) $V_{aço} = 3,96 \text{ R\$/Kg}$. Já o valor da forma foi aplicado de maneira diferente para cada método construtivo, como consta a seguir:

- Laje Maciça Convencional (LMC): Valor da forma $V_{forma} = 27,91 \text{ R\$/m}^2$;
- Laje Nervurada Moldada *In loco* (LNML): Nesse método foi considerado o valor do aluguel da cubeta por um mês $V_{cubeta} = 6,60 \text{ un/mês}$, devido o tempo médio para execução, e o valor da forma $V_{forma} = 27,91 \text{ R\$/m}^2$;
- Laje Nervurada Pré-Moldada (LNPM): Para esse método foi estabelecido o EPS (isopor) como parâmetro comparativo, levando em conta que não é utilizado forma de madeira para esse tipo de laje, sendo o valor $V_{EPS} = 142,94 \text{ R\$/m}^3$.

Para expor os códigos, descrições dos itens, valores e unidades de maneira a facilitar o entendimento foi elaborada a tabela 07.

Tabela 04 – Tabela de insumos referenciada do SINAPI (Sistema nacional de pesquisa de custo e índices da construção civil)

Material	Descrição do item	Unidade	Valor [R\$]
Concreto Exemplos 01 a 09 (Código do Item-1527)	Concreto usinado bombeável, classe de resistência C25, com brita 0 e 1, Slump=100 +/- 20 mm, inclui serviço de bombeamento (NBR 8953)	m³	286,57
Aço Exemplos 01 a 09 (Código do Item-34439)	Aço CA-50, 10,0 mm, dobrado e cortado	kg	3,96
Forma Exemplos 04, 05 e 06 (Código do Item-40290)	Locação de forma plástica para laje nervurada, dimensões *60*x*60*x*16* cm	un/mês	6,60
Forma Exemplos 01, 02 e 03 (Código do Item-92267)	Fabricação de fôrma para lajes, em chapa de madeira compensada resinada, e = 17 mm. AF_12/2015	m²	27,91
Enchimento Exemplos 07, 08 e 09 (Código do Item-39995)	Poliestireno expandido/EPS (isopor), tipo 2F, bloco	m³	142,94

Fonte: Autores (2017).

Para o cálculo do volume de concreto, peso do aço, forma de madeira e volume do EPS de cada método construtivo foi utilizada a modelagem física e cálculo manual para o levantamento quantitativo dos materiais e assim adicionando os resultados nas tabelas 05, 06 e 07 onde consta os valores unitários e o total para cada material. Finalizando com a tabela 08, onde engloba todos os custos e o valor total para cada exemplo.

Tabela 05 – Custo do concreto referente aos métodos construtivos

Método construtivo	Volume de concreto 25 MPa [m³]	Valor do aço CA-50 [R\$/Kg]	Total Concreto [R\$]
Exemplo 1 – LM	0,90	286,57	257,91
Exemplo 4 – LNML	0,55	286,57	158,19
Exemplo 7 - LNPM	0,55	286,57	158,19
Exemplo 2 – LM	3,50	286,57	1003,00
Exemplo 5 – LNML	1,96	286,57	561,68
Exemplo 8 - LNPM	4,83	286,57	1384,71
Exemplo 3 – LM	10,78	286,57	3089,22
Exemplo 6 – LNML	4,76	286,57	1364,07
Exemplo 9 - LNPM	14,91	286,57	4272,76

Fonte: Autores (2017).

Ao analisar a tabela de custos de concreto (Tabela 05) podemos observar que para os vãos de pequeno porte as LNML e LNPM tiveram o mesmo volume de concreto e a LM teve o volume de concreto superior aos outros e consequentemente o seu custo também.

Para vãos de médio porte o cenário se modifica, sendo que o custo da LNPM excede aos outros métodos, entretanto a LNML continua sendo o método menos oneroso.

Quando é analisado o vão de grande porte, segue a análise do item anterior, entretanto os valores se distanciam, deixando a LNML duas vezes mais barata que a LM e passando 3 vezes mais barata que a LNPM.

Tabela 06 – Custo do aço referente aos métodos construtivos

Método construtivo	Quantidade de aço CA-50 [Kg]	Valor concreto 25MPa [R\$/m³]	Total Aço [R\$]
Exemplo 1 – LM	22,34	3,96	88,48
Exemplo 4 – LNML	30,00	3,96	118,80
Exemplo 7 – LNPM	27,00	3,96	106,92
Exemplo 2 – LM	68,27	3,96	270,34
Exemplo 5 – LNML	141,00	3,96	558,36
Exemplo 8 – LNPM	51,00	3,96	201,96
Exemplo 3 – LM	179,34	3,96	710,19
Exemplo 6 – LNML	318,00	3,96	1259,28
Exemplo 9 – LNPM	256,00	3,96	1013,76

Fonte: Autores (2017).

Tendo como o material a ser estudado o aço CA – 50, observa-se na Tabela 06 que para os vãos de pequeno e grande porte, o valor do aço para a LM é módico em relação aos outros dois métodos analisados. Para vãos de médio porte o Exemplo 5 é o menos dispendioso.

Ao somarmos os valores totais, para vãos de pequeno, médio e grande porte conclui-se que a LM tem o menor custo, chegando a R\$1069,01, logo após a LNPM com custo total de R\$1322,64 e por fim a LNPM, com o valor de R\$1936,44. Podendo relacionar esse valor ao consumo de material e ao peso da laje sucessivamente.

Tabela 07 – Custo da forma referente aos métodos construtivos

Método construtivo	Área da forma [m²]	Valor da forma [R\$/m²]	Total Forma [R\$]	Volume de enchimento EPS [m³]	Valor do enchimento EPS [R\$/m³]	Total Enchimento EPS [R\$]
Exemplo 1 – LM	9,00	27,91	251,19	-	-	-
Exemplo 4 – LNML	6,00	17,60	105,60	-	-	-
Exemplo 7 - LNPM	-	-	-	0,77	142,94	110,64
Exemplo 2 – LM	25,00	27,91	697,75	-	-	-
Exemplo 5 – LNML	16,00	20,21	323,40	-	-	-
Exemplo 8 - LNPM	-	-	-	3,38	142,94	483,60
Exemplo 3 – LM	49,00	27,91	1367,59	-	-	-
Exemplo 6 – LNML	33,00	13,47	444,49	-	-	-
Exemplo 9 - LNPM	-	-	-	10,87	142,94	1554,15

Fonte: Autores (2017).

Para a análise de formas dos métodos construtivos, foi levado em consideração que a laje maciça possui formas de madeira, a laje nervurada moldada *in loco* emprega o uso de cubetas como forma e a laje nervurada pré-moldada não possui formas de maneira tradicional, assim utilizando-se o enchimento da laje como molde.

Após serem feitas as devidas considerações, é constatado que a LNML tem o menor custo para os três vãos analisados, em seguida a LNPM e com o custo mais oneroso a LM.

Tabela 08 – Custos dos materiais referentes aos métodos construtivos

Método construtivo	Total Concreto [R\$]	Total Aço [R\$]	Total Forma [R\$]	Total Enchimento EPS [R\$]	Valor Total [R\$]	Valor Total [R\$/m²]
Exemplo 1 – LM	257,91	88,48	251,19	-	597,59	66,40
Exemplo 4 – LNML	158,19	118,80	105,60	-	382,59	42,51
Exemplo 7 - LNPM	158,19	106,92	-	110,64	375,74	41,75
Exemplo 2 – LM	1003,00	270,34	697,75	-	1971,08	78,84
Exemplo 5 – LNML	561,68	558,36	323,40	-	1443,44	57,74
Exemplo 8 - LNPM	1384,71	201,96	-	483,60	2070,27	82,81
Exemplo 3 – LM	3089,22	710,19	1367,59	-	5167,00	105,45
Exemplo 6 – LNML	1364,07	1259,28	444,49	-	3067,84	62,61
Exemplo 9 - LNPM	4272,76	1013,76	-	1554,15	6840,67	139,61

Fonte: Autores (2017).

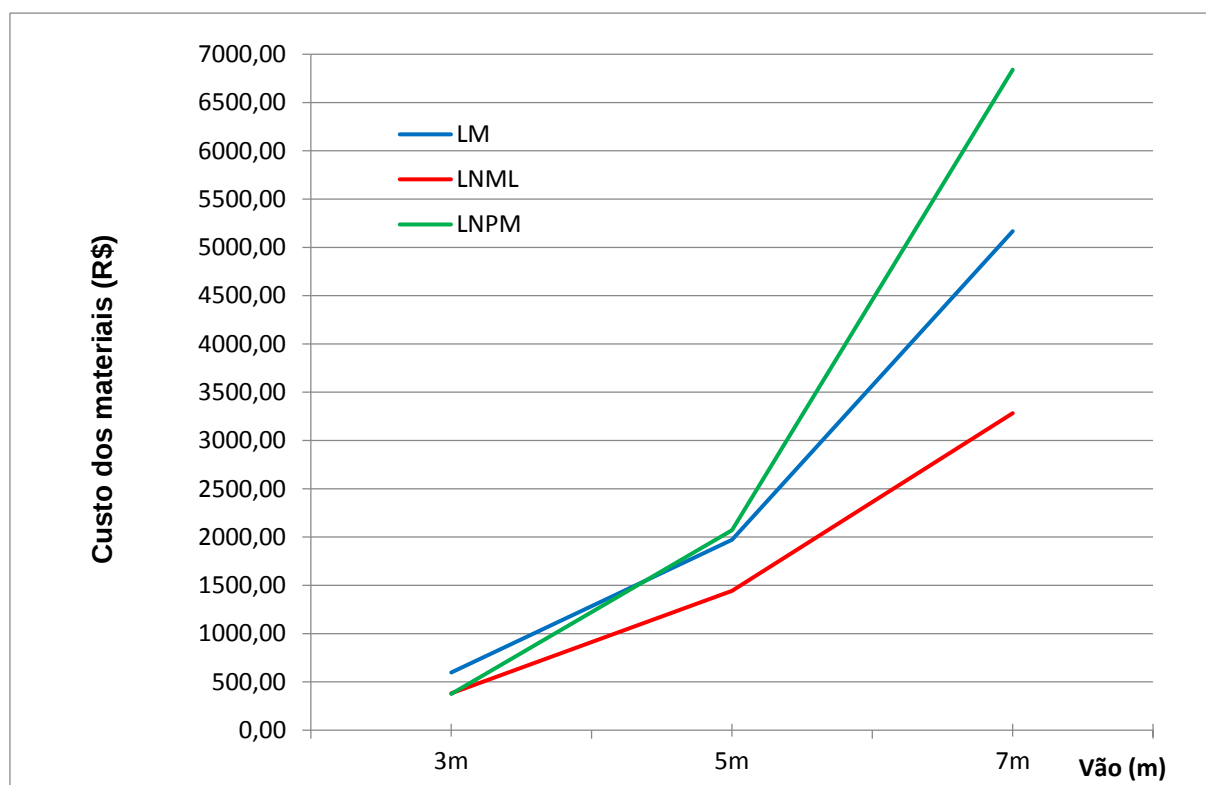
Após a análise de cada item a ser custeado, foram organizados todos os valores obtidos de forma a melhorar a visualização, na Tabela 08, onde consta o valor total para cada exemplo.

Para vãos de pequeno porte a LNPM obteve o menor custo, seguindo da LNML e após a LM. Nos vãos de médio porte a LNML reduz o seu valor em comparação as outras, depois a LM tem o segundo menor custo e em seguida a LNPM. Para grande porte mantém a ordem dos custos dos vãos de médio porte.

5.2 ANÁLISE GRÁFICA DOS CUSTOS

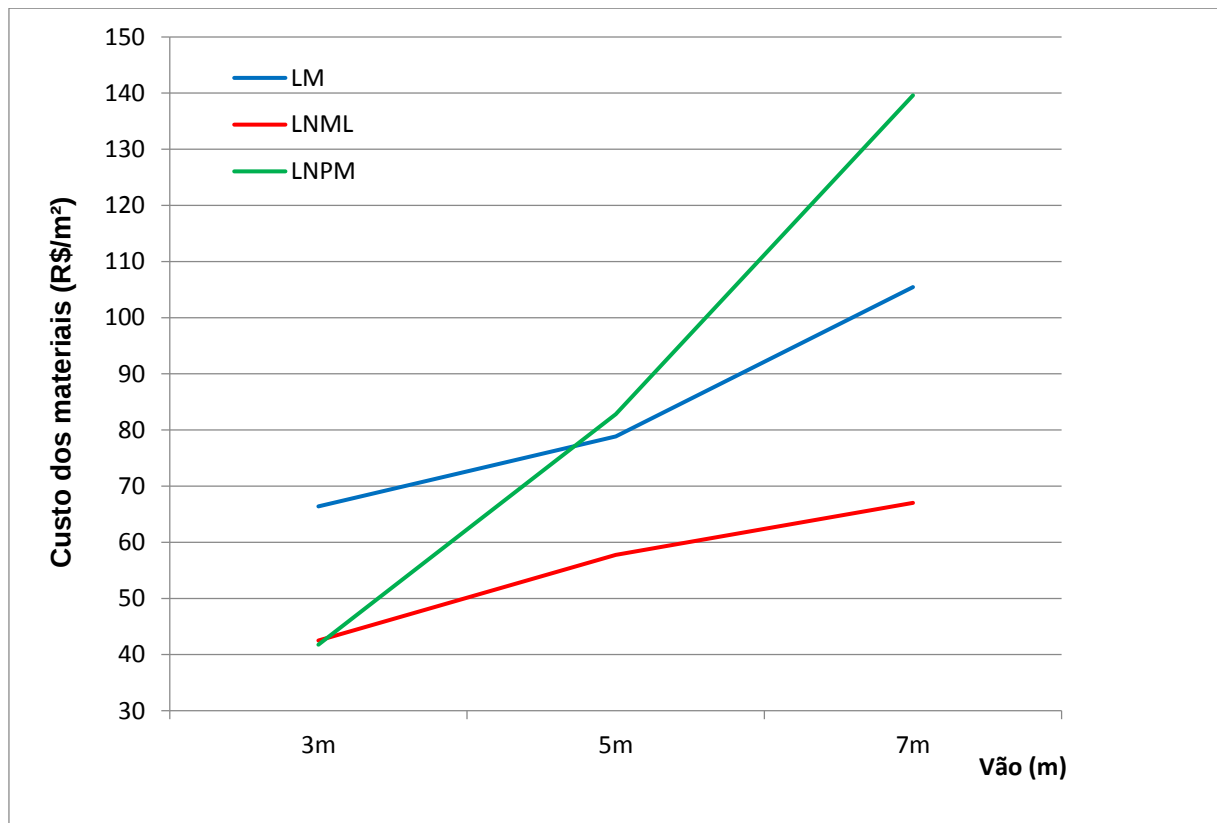
Após os cálculos e a coleta dos dados vindos da tabela 11 foi elaborado um gráfico relacionando o custo dos materiais (R\$) com a variação dos vãos (m), assim facilitando e esmerando a análise dos resultados.

Gráfico 01 – Análise gráfica dos custos dos materiais



Fonte: Autores (2017).

Um segundo gráfico foi elaborado relacionando os custos dos exemplos em relação a área construída, para assim ter uma análise mais detalhada graficamente e uma aplicação direta para orçamentos e análises relacionados a área construída.

Gráfico 02 – Análise gráfica dos custos dos materiais em R\$/m²

Fonte: Autores (2017).

Após o estudo dos gráficos podemos apontar cinco pontos principais, tendo como base a variação dos vãos, são eles:

- Vãos menores que 3m: Levando em conta a tendência dos gráficos, observa-se que a LNPM terá o menor custo;
- Vão de 3m: Os custos da LNPM e LNML são praticamente os mesmos e a LM chega próximo a 3/2 do custo das outras ;
- Vão de 5m: A LNML reduz o valor, sendo com a menor custo e a LNPM passa a ser a com o maior custo;
- Vão de 7m: Com a estrutura de grande porte fica clara a diferença entre os métodos construtivos, explicitando que a LNPM tem o maior custo, a LNML o menor e a LM fica intermediando as duas;
- Vãos acima de 7m: A partir daí, aplicando a tendência do gráfico, fica clara a inviabilidade da LNPM o alto custo da LM e a viabilidade da LNML.

6. CONCLUSÃO

As lajes são estruturas responsáveis pelo consumo elevado do volume total de concreto utilizado na construção de edificações. Também, as lajes desempenham importantes funções nas estruturas do edifício. Com isso, a escolha do sistema estrutural adequado para o pavimento da edificação deve ser sempre feita analisando-se aspectos econômicos, de funcionamento, de execução, e os relacionados à interação com os demais subsistemas construtivos da edificação.

Com as análises realizadas, percebeu-se que os custos do concreto para a execução da laje nervurada pré-moldada foram os mais onerosos para os três vãos estudados. Em contrapartida, os custos do concreto para a execução da laje nervurada moldada *in loco* foram os mais econômicos para os três vãos.

Em relação aos custos do aço, verificou-se que a execução da laje maciça apresentou valores mais econômicos em relação aos outros tipos de estrutura estudados. Ainda, foi percebido que a execução da laje nervurada moldada *in loco* apresentou-se mais custosa ao ser comparada à execução dos outros sistemas.

Ao se comparar os valores de forma para as lajes maciça e nervurada pré-moldada e os valores de volume de EPS para a laje nervurada moldada *in loco*, pode-se observar que o sistema construtivo composto por laje nervurada pré-moldada apresentou os valores mais altos para a execução do vão de 7 metros. Para o sistema construtivo executado com laje maciça aponta os custos mais caros para os vãos de 3 e 5 metros. Em contrapartida, o sistema composto por laje nervurada moldada *in loco* demonstra os custos mais econômicos para os três comprimentos de vão.

Ao se tratar do custo total dos serviços utilizados na execução dos sistemas construtivos analisados no projeto de pesquisa, volume de concreto, consumo de aço e de forma, conclui-se que a laje maciça não ganhou vantagem para nenhum tipo de vão. Porém a laje nervurada pré-moldada ficou mais vantajosa para vãos de pequeno porte e por fim a laje nervurada moldada *in loco* obteve benefício para vãos de médio e grande porte.

Assim, o presente trabalho teve a intenção de apresentar parâmetros que possam ajudar na escolha de tipologia estrutural adequada, em função dos vãos adotados.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentro do que foi analisado e concluído nesse trabalho, as sugestões para trabalhos futuros são:

- a) Análise do tempo de execução de cada tipo de sistema;
- b) Comparar o peso total da estrutura para cada tipo de sistema;
- c) Quantificação da mão-de-obra no canteiro de obras para verificar os rendimentos próximos a realidade;
- d) Quantificação de escoramentos e outros materiais, como por exemplo tábuas, pregos, desmoldante, que compõem a estrutura das lajes;
- e) Inclusão de outros sistemas estruturais, como laje protendida e laje alveolar;
- f) Análise construtiva para diferentes tipos de edificações.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado** / José Milton de Araújo. – Rio Grande: Dunas, 2014. v.1, 4.ed.
- ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado** / José Milton de Araújo. – Rio Grande: Dunas, 2014. v.2, 4.ed.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, p. 238. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Carga para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, p. 05. 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, p. 15. 2003.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Histórico e principais elementos estruturais de concreto armado**. Bauru, 2006.
- BOCCHI JR, Carlos Fernando. **Lajes nervuradas de concreto armado: projeto e execução**. São Carlos, 1995.
- CARVALHO, Roberto Chust. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:20014 / Roberto Chust Carvalho, Jasson Rodrigues de Figueiredo Filho. 4.ed. São Carlos: EduFSCar, 2014. 415 p.
- CONCRETO ARMADO: ESTADOS LIMITES DE UTILIZAÇÃO. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/estados-limites-de-servico.pdf>>. Acesso em:
- DORNELES, Douglas Medeiros. **Lajes na construção civil brasileira: estudo de caso de edifício residencial em Santa Maria-RS**. Santa Maria, 2014.
- ESTRUTURAS DE CONCRETO – CAPÍTULO 14. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/ec702/EESC/ELS.pdf>>. Acesso em:
- FLEXÃO NOIRMAL SIMPLES – VIGAS. Disponível em: <<http://www.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/FlexaoSimples.pdf>>. Acesso em:
- LAJES NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/4342325/lajes-nervuradas-de-concreto-armado>>. Acesso em:
- SILVA, Marcos Alberto Ferreira da. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. São Carlos, 2005.
- SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTO E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL – SINAPI. Catálogo Composições Analíticas. Espírito Santo, p. 147, 2017.

SOUZA, Caroline Golçalves Silva e. LOPES, Rayane Campo. **Estudo comparativo entre laje maciça convencional e lajes nervuradas**. Goiânia, 2016.

VIGAS DE CONCRETO ARMADO. Disponível em:
<<http://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto2/Vigas.pdf>>. Acesso em:

ANEXOS

TABELA A-1

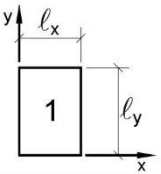
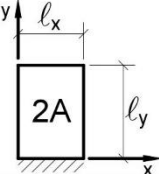
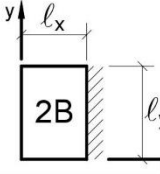
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA UNIFORME									
Tipo									Tipo
$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	μ_x	μ_y	μ_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ'_x	μ_y	$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$
1,00	4,23	4,23	2,91	3,54	8,40	3,54	8,40	2,91	1,00
1,05	4,62	4,25	3,26	3,64	8,79	3,77	8,79	2,84	1,05
1,10	5,00	4,27	3,61	3,74	9,18	3,99	9,17	2,76	1,10
1,15	5,38	4,25	3,98	3,80	9,53	4,19	9,49	2,68	1,15
1,20	5,75	4,22	4,35	3,86	9,88	4,38	9,80	2,59	1,20
1,25	6,10	4,17	4,72	3,89	10,16	4,55	10,06	2,51	1,25
1,30	6,44	4,12	5,09	3,92	10,41	4,71	10,32	2,42	1,30
1,35	6,77	4,06	5,44	3,93	10,64	4,86	10,54	2,34	1,35
1,40	7,10	4,00	5,79	3,94	10,86	5,00	10,75	2,25	1,40
1,45	7,41	3,95	6,12	3,91	11,05	5,12	10,92	2,19	1,45
1,50	7,72	3,89	6,45	3,88	11,23	5,24	11,09	2,12	1,50
1,55	7,99	3,82	6,76	3,85	11,39	5,34	11,23	2,04	1,55
1,60	8,26	3,74	7,07	3,81	11,55	5,44	11,36	1,95	1,60
1,65	8,50	3,66	7,28	3,78	11,67	5,53	11,48	1,87	1,65
1,70	8,74	3,58	7,49	3,74	11,79	5,61	11,60	1,79	1,70
1,75	8,95	3,53	7,53	3,69	11,88	5,68	11,72	1,74	1,75
1,80	9,16	3,47	7,56	3,63	11,96	5,75	11,84	1,68	1,80
1,85	9,35	3,38	8,10	3,58	12,05	5,81	11,94	1,67	1,85
1,90	9,54	3,29	8,63	3,53	12,14	5,86	12,03	1,59	1,90
1,95	9,73	3,23	8,86	3,45	12,17	5,90	12,08	1,54	1,95
2,00	9,91	3,16	9,08	3,36	12,20	5,94	12,13	1,48	2,00
> 2,00	12,50	3,16	12,50	3,36	12,20	7,03	12,50	1,48	> 2,00
Valores extraídos de BARES (1972) e adaptados por L.M. Pinheiro.									
$m = \mu \frac{p \ell_x^2}{100}$			p = carga uniforme			ℓ_x = menor vão			

TABELA A-2

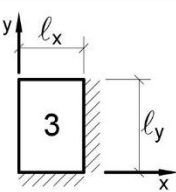
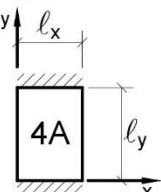
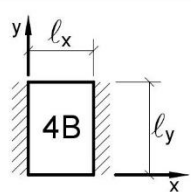
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA UNIFORME											
Tipo											Tipo
$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ'_x	μ_y	$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$
1,00	2,69	6,99	2,69	6,99	2,01	3,09	6,99	3,09	6,99	2,01	1,00
1,05	2,94	7,43	2,68	7,18	2,32	3,23	7,43	3,22	7,20	1,92	1,05
1,10	3,19	7,87	2,67	7,36	2,63	3,36	7,87	3,35	7,41	1,83	1,10
1,15	3,42	8,28	2,65	7,50	2,93	3,46	8,26	3,46	7,56	1,73	1,15
1,20	3,65	8,69	2,62	7,63	3,22	3,56	8,65	3,57	7,70	1,63	1,20
1,25	3,86	9,03	2,56	7,72	3,63	3,64	9,03	3,66	7,82	1,56	1,25
1,30	4,06	9,37	2,50	7,81	3,99	3,72	9,33	3,74	7,93	1,49	1,30
1,35	4,24	9,65	2,45	7,88	4,34	3,77	9,69	3,80	8,02	1,41	1,35
1,40	4,42	9,93	2,39	7,94	4,69	3,82	10,00	3,86	8,11	1,33	1,40
1,45	4,58	10,17	2,32	8,00	5,03	3,86	10,25	3,91	8,13	1,26	1,45
1,50	4,73	10,41	2,25	8,06	5,37	3,90	10,49	3,96	8,15	1,19	1,50
1,55	4,86	10,62	2,16	8,09	5,70	3,90	10,70	4,00	8,20	1,14	1,55
1,60	4,99	10,82	2,07	8,12	6,03	3,89	10,91	4,04	8,25	1,08	1,60
1,65	5,10	10,99	1,99	8,14	6,35	3,85	11,08	4,07	8,28	1,03	1,65
1,70	5,21	11,16	1,91	8,15	6,67	3,81	11,24	4,10	8,30	0,98	1,70
1,75	5,31	11,30	1,85	8,16	6,97	3,79	11,39	4,12	8,31	0,95	1,75
1,80	5,40	11,43	1,78	8,17	7,27	3,76	11,53	4,14	8,32	0,91	1,80
1,85	5,48	11,55	1,72	8,17	7,55	3,72	11,65	4,15	8,33	0,87	1,85
1,90	5,56	11,67	1,66	8,18	7,82	3,67	11,77	4,16	8,33	0,83	1,90
1,95	5,63	11,78	1,63	8,19	8,09	3,60	11,83	4,16	8,33	0,80	1,95
2,00	5,70	11,89	1,60	8,20	8,35	3,52	11,88	4,17	8,33	0,76	2,00
> 2,00	7,03	12,50	1,60	8,20	12,50	3,52	11,88	4,17	8,33	0,76	> 2,00
Valores extraídos de BARES (1972) e adaptados por L.M. Pinheiro.											
$m = \mu \frac{p \ell_x^2}{100}$				p = carga uniforme				ℓ_x = menor vão			

TABELA A-3

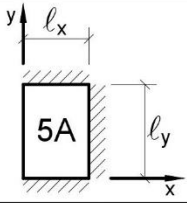
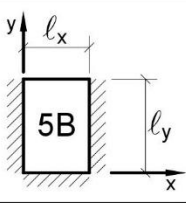
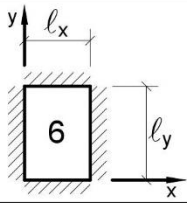
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA UNIFORME													
Tipo													Tipo
$\lambda = \frac{\ell_y}{\ell_x}$	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	$\lambda = \frac{\ell_y}{\ell_x}$
1,00	2,02	5,46	2,52	6,17	2,52	6,17	2,02	5,46	2,02	5,15	2,02	5,15	1,00
1,05	2,27	5,98	2,56	6,46	2,70	6,47	1,97	5,56	2,22	5,50	2,00	5,29	1,05
1,10	2,52	6,50	2,60	6,75	2,87	6,76	1,91	5,65	2,42	5,85	1,98	5,43	1,10
1,15	2,76	7,11	2,63	6,97	3,02	6,99	1,84	5,70	2,65	6,14	1,94	5,51	1,15
1,20	3,00	7,72	2,65	7,19	3,16	7,22	1,77	5,75	2,87	6,43	1,89	5,59	1,20
1,25	3,23	8,31	2,64	7,36	3,28	7,40	1,70	5,75	2,97	6,67	1,83	5,64	1,25
1,30	3,45	8,59	2,61	7,51	3,40	7,57	1,62	5,76	3,06	6,90	1,77	5,68	1,30
1,35	3,66	8,74	2,57	7,63	3,50	7,70	1,55	5,75	3,19	7,09	1,71	5,69	1,35
1,40	3,86	8,88	2,53	7,74	3,59	7,82	1,47	5,74	3,32	7,28	1,65	5,70	1,40
1,45	4,05	9,16	2,48	7,83	3,67	7,91	1,41	5,73	3,43	7,43	1,57	5,71	1,45
1,50	4,23	9,44	2,43	7,91	3,74	8,00	1,35	5,72	3,53	7,57	1,49	5,72	1,50
1,55	4,39	9,68	2,39	7,98	3,80	8,07	1,29	5,69	3,61	7,68	1,43	5,72	1,55
1,60	4,55	9,91	2,34	8,02	3,86	8,14	1,23	5,66	3,69	7,79	1,36	5,72	1,60
1,65	4,70	10,13	2,28	8,03	3,91	8,20	1,18	5,62	3,76	7,88	1,29	5,72	1,65
1,70	4,84	10,34	2,22	8,10	3,95	8,25	1,13	5,58	3,83	7,97	1,21	5,72	1,70
1,75	4,97	10,53	2,15	8,13	3,99	8,30	1,07	5,56	3,88	8,05	1,17	5,72	1,75
1,80	5,10	10,71	2,08	8,17	4,02	8,34	1,00	5,54	3,92	8,12	1,13	5,72	1,80
1,85	5,20	10,88	2,02	8,16	4,05	8,38	0,97	5,55	3,96	8,18	1,07	5,72	1,85
1,90	5,30	11,04	1,96	8,14	4,08	8,42	0,94	5,56	3,99	8,24	1,01	5,72	1,90
1,95	5,40	11,20	1,88	8,13	4,10	8,45	0,91	5,60	4,02	8,29	0,99	5,72	1,95
2,00	5,50	11,35	1,80	8,12	4,12	8,47	0,88	5,64	4,05	8,33	0,96	5,72	2,00
> 2,00	7,03	12,50	1,80	8,12	4,17	8,33	0,88	5,64	4,17	8,33	0,96	5,72	> 2,00
Valores extraídos de BARES (1972) e adaptados por L.M. Pinheiro.													
$m = \mu \frac{p \ell_x^2}{100}$				$p = \text{carga uniforme}$				$\ell_x = \text{menor vão}$					

TABELA A-8

FLEXÃO SIMPLES EM SEÇÃO RETANGULAR - ARMADURA SIMPLES										
$\beta_x = \frac{x}{d}$	K _c (cm ² /kN)								K _s (cm ² /kN)	Dom.
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	CA-50	
0,01	137,8	103,4	82,7	68,9	59,1	51,7	45,9	41,3	0,023	2
0,02	69,2	51,9	41,5	34,6	29,6	25,9	23,1	20,8	0,023	
0,03	46,3	34,7	27,8	23,2	19,8	17,4	15,4	13,9	0,023	
0,04	34,9	26,2	20,9	17,4	14,9	13,1	11,6	10,5	0,023	
0,05	28,0	21,0	16,8	14,0	12,0	10,5	9,3	8,4	0,023	
0,06	23,4	17,6	14,1	11,7	10,0	8,8	7,8	7,0	0,024	
0,07	20,2	15,1	12,1	10,1	8,6	7,6	6,7	6,1	0,024	
0,08	17,7	13,3	10,6	8,9	7,6	6,6	5,9	5,3	0,024	
0,09	15,8	11,9	9,5	7,9	6,8	5,9	5,3	4,7	0,024	
0,10	14,3	10,7	8,6	7,1	6,1	5,4	4,8	4,3	0,024	
0,11	13,1	9,8	7,8	6,5	5,6	4,9	4,4	3,9	0,024	
0,12	12,0	9,0	7,2	6,0	5,1	4,5	4,0	3,6	0,024	
0,13	11,1	8,4	6,7	5,6	4,8	4,2	3,7	3,3	0,024	
0,14	10,4	7,8	6,2	5,2	4,5	3,9	3,5	3,1	0,024	
0,15	9,7	7,3	5,8	4,9	4,2	3,7	3,2	2,9	0,024	
0,16	9,2	6,9	5,5	4,6	3,9	3,4	3,1	2,7	0,025	
0,17	8,7	6,5	5,2	4,3	3,7	3,2	2,9	2,6	0,025	
0,18	8,2	6,2	4,9	4,1	3,5	3,1	2,7	2,5	0,025	
0,19	7,8	5,9	4,7	3,9	3,4	2,9	2,6	2,3	0,025	
0,20	7,5	5,6	4,5	3,7	3,2	2,8	2,5	2,2	0,025	
0,21	7,1	5,4	4,3	3,6	3,1	2,7	2,4	2,1	0,025	
0,22	6,8	5,1	4,1	3,4	2,9	2,6	2,3	2,1	0,025	
0,23	6,6	4,9	3,9	3,3	2,8	2,5	2,2	2,0	0,025	
0,24	6,3	4,7	3,8	3,2	2,7	2,4	2,1	1,9	0,025	
0,25	6,1	4,6	3,7	3,1	2,6	2,3	2,0	1,8	0,026	
0,26	5,9	4,4	3,5	2,9	2,5	2,2	2,0	1,8	0,026	
0,27	5,7	4,3	3,4	2,8	2,4	2,1	1,9	1,7	0,026	3
0,28	5,5	4,1	3,3	2,8	2,4	2,1	1,8	1,7	0,026	
0,29	5,4	4,0	3,2	2,7	2,3	2,0	1,8	1,6	0,026	
0,30	5,2	3,9	3,1	2,6	2,2	1,9	1,7	1,6	0,026	
0,31	5,1	3,8	3,0	2,5	2,2	1,9	1,7	1,5	0,026	
0,32	4,9	3,7	3,0	2,5	2,1	1,8	1,6	1,5	0,026	
0,33	4,8	3,6	2,9	2,4	2,1	1,8	1,6	1,4	0,026	
0,34	4,7	3,5	2,8	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	0,027	
0,35	4,6	3,4	2,7	2,3	2,0	1,7	1,5	1,4	0,027	
0,36	4,5	3,3	2,7	2,2	1,9	1,7	1,5	1,3	0,027	
0,37	4,4	3,3	2,6	2,2	1,9	1,6	1,5	1,3	0,027	
0,38	4,3	3,2	2,6	2,1	1,8	1,6	1,4	1,3	0,027	
0,40	4,1	3,1	2,5	2,0	1,8	1,5	1,4	1,2	0,027	
0,42	3,9	2,9	2,4	2,0	1,7	1,5	1,3	1,2	0,028	
0,44	3,8	2,8	2,3	1,9	1,6	1,4	1,3	1,1	0,028	
0,45	3,7	2,8	2,2	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1	0,028	
0,46	3,7	2,7	2,2	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1	0,028	
0,48	3,5	2,7	2,1	1,8	1,5	1,3	1,2	1,1	0,028	
0,50	3,4	2,6	2,1	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	0,029	
0,52	3,3	2,5	2,0	1,7	1,4	1,2	1,1	1,0	0,029	
0,54	3,2	2,4	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	0,029	
0,56	3,2	2,4	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1	0,9	0,030	
0,58	3,1	2,3	1,8	1,5	1,3	1,2	1,0	0,9	0,030	
0,60	3,0	2,3	1,8	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,030	
0,62	2,9	2,2	1,8	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,031	
0,63	2,9	2,2	1,7	1,5	1,2	1,1	1,0	0,9	0,031	

TABELA A-11

TABELA DE DIMENSIONAMENTO DE SEÇÃO RETANGULAR COM DIAGRAMA RETANGULAR DE ACORDO COM A NBR-6118 (CONTINUAÇÃO)										
KMD	Kx	Kz	□	□	Ks			DOMÍNIO		
					CA25	CA50	CA60			
0,250	0,448	0,821	3,50	4,32	17,85	35,69		DOMÍNIO 3 - CA25	DOMÍNIO 3 - CA50	DOMÍNIO 4 - CA60
0,255	0,459	0,816	3,50	4,12	17,74	35,49				
0,260	0,471	0,812	3,50	3,93	17,64	35,29				
0,265	0,483	0,807	3,50	3,75	17,54	35,08				
0,270	0,495	0,802	3,50	3,57	17,43	34,87				
0,275	0,507	0,797	3,50	3,40	17,33	34,66				
0,280	0,520	0,792	3,50	3,23	17,22	34,44				
0,285	0,532	0,787	3,50	3,07	17,11	34,22				
0,290	0,545	0,782	3,50	2,92	17,00	33,99				
0,295	0,559	0,777	3,50	2,77	16,88	33,76				
0,300	0,572	0,771	3,50	2,62	16,76	33,53				
0,305	0,586	0,766	3,50	2,48	16,65	33,29				
0,310	0,600	0,760	3,50	2,34	16,52	33,05				
0,315	0,614	0,754	3,50	2,20	16,40	32,80				
0,320	0,629	0,749	3,50	2,07	16,27	32,55				
0,325	0,644	0,743	3,50	1,94	16,14					
0,330	0,659	0,736	3,50	1,81	16,01					
0,335	0,675	0,730	3,50	1,69	15,87					
0,340	0,691	0,724	3,50	1,57	15,73					
0,345	0,708	0,717	3,50	1,45	15,59					
0,350	0,725	0,710	3,50	1,33	15,44					
0,355	0,743	0,703	3,50	1,21	15,28					
0,360	0,761	0,696	3,50	1,10	15,12					
0,362	0,769	0,692	3,50	1,05	15,05					
0,365	0,780	0,688	3,50	0,99				DOMÍNIO 4 - CA25	DOMÍNIO 4 - CA50	
0,370	0,800	0,680	3,50	0,87						
0,375	0,821	0,671	3,50	0,76						
0,380	0,843	0,663	3,50	0,65						
0,385	0,866	0,653	3,50	0,54						
0,390	0,891	0,643	3,50	0,43						
0,395	0,918	0,633	3,50	0,31						
0,400	0,947	0,621	3,50	0,20						
0,405	0,978	0,608	3,50	0,08						
0,408	1,000	0,600	3,50	0,00						