

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Fernando Gelain Veadrigo

**LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO E
ALVEOLARES PROTENDIDAS PRÉ-FABRICADAS:
ESTUDO COMPARATIVO EM FUNÇÃO
DOS VÃOS ENTRE APOIOS**

Porto Alegre
dezembro 2014

FERNANDO GELAIN VEADRIGO

**LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO E
ALLVEOLARES PROTENDIDAS PRÉ-FABRICADAS:
ESTUDO COMPARATIVO EM FUNÇÃO
DOS VÃOS ENTRE APOIOS**

Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Virgínia Maria Rosito D'Avila Bessa

Porto Alegre
dezembro 2014

FERNANDO GELAIN VEADRIGO

**LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO E
ALVEOLARES PROTENDIDAS PRÉ-FABRICADAS:
ESTUDO COMPARATIVO EM FUNÇÃO
DOS VÃOS ENTRE APOIOS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2014

Profa. Virgínia Maria Rosito D'Ávila Bessa
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientadora

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof./a Virgínia Maria Rosito D'Ávila Bessa (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Américo Campos Filho (UFRGS)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. João Ricardo Masuero (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, Elto e Silvane, com
todo amor e gratidão, sempre presentes durante esta
caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Professora Virgínia, por todo o auxílio a mim concedido e vasto conhecimento transmitido ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Professora Carin por todo o tempo dedicado na correção deste trabalho e enormes contribuições para a qualidade deste estudo.

Agradeço ao Eng. Éderson Goveia pela gentileza no fornecimento informações para o desenvolvimento deste estudo.

Agradeço aos colegas de trabalho e amigos da Dallasanta por todo o companheirismo e conhecimentos transmitidos ao longo deste período.

Agradeço a todos os grandes amigos, professores e pessoas que de alguma maneira participaram e contribuíram antes e durante o período acadêmico com sua companhia, pensamentos, ideias, conselhos e risadas.

Agradeço em especial aos meus pais Elto e Silvane, minha irmã Vicenza e avós Ângela e Rita, pelo enorme carinho e incentivo durante todo o período de graduação.

Tu escolhes, recolhes, eleges, atrais, buscas, expulsas,
modificas tudo aquilo que te rodeia a existência.
Teus pensamentos e vontades são a chave de teus atos
e atitudes... São as fontes de atração e repulsão na tua
jornada de vivência.

Chico Xavier

RESUMO

Os elementos pré-fabricados consolidaram-se no mercado da construção civil como alternativa frente aos reduzidos prazos de execução e a necessidade de melhoria na qualidade do produto. A execução de projetos estruturais com a utilização destes elementos, no entanto, acaba por ser adotada em sua maioria pelo benefício de prazo, sem verificações de viabilidade ou comparativos com outros modelos estruturais. Esta análise, frente aos custos executivos, pode permitir uma maior empregabilidade de elementos pré-fabricados em obras em que o custo é fator determinante para a definição do modelo construtivo. Este trabalho, portanto, busca comparar o modelo de laje maciça moldada *in loco*, utilizado em larga escala na construção, com o modelo de laje alveolar protendida pré-fabricada, sob determinados aspectos e condições de contorno, vão entre apoios e respectivos custos atrelados à execução. A partir de revisão bibliográfica são descritas as características de cada tipo de laje, destacando as especificidades, vantagens e desvantagem, bem como exigências normativas de projeto, que posteriormente serão utilizados no cálculo de espessuras das lajes maciças. Para as lajes alveolares, também são observadas as exigências de projeto e diferenciais estruturais. Após a determinação das espessuras para as lajes maciças moldadas *in loco*, através de método de cálculo, são estabelecidos os quantitativos utilizados de concreto, aço e madeiramento de formas, necessários para sua execução. Nas lajes alveolares, por sua vez, os valores de espessura são obtidos junto ao fabricante, com base em informações de projeto fornecidas. Em seguida, de posse dos quantitativos necessários para execução, são verificados os custos envolvidos, como mão de obra, material, transporte e montagem. A relação entre os custos e respectivos quantitativos resulta em valores unitários, possibilitando a comparação em termos de custos apropriados e em função dos vãos entre os apoios. Por fim, são feitas as considerações referentes aos prazos de execução juntamente a definição do vão entre apoios no qual o emprego de um tipo de laje é o mais indicado.

Palavras-chave: Lajes Alveolares Protendidas Pré-Fabricadas. Lajes Maciças de Concreto Armado Moldadas *in loco*. Comparativo de Vãos entre Apoios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama do delineamento da pesquisa.....	18
Figura 2 – Lajes de concreto.....	21
Figura 3 – Comportamento de lajes.....	22
Figura 4 – Laje maciça.....	23
Figura 5 – Seção genérica de uma laje alveolar.....	26
Figura 6 – Comparação de momentos fletores entre sucessão de tramos simplesmente apoiados e viga contínua.....	30
Figura 7 – Momentos e reações de apoios.....	45
Figura 8 – Comparativo de custo por metro quadrado e vão entre apoios para lajes maciças engastadas, apoiadas e lajes alveolares.....	59
Figura 9 – Comparativo de custo por metro quadrado e vão entre apoios para lajes maciças e lajes alveolares.....	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dados para pré-dimensionamento de painéis alveolares.....	31
Quadro 2 – Classes de agressividade ambiental.....	32
Quadro 3 – Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobertura nominal para $\Delta c = 10\text{mm}$	33
Quadro 4 – Valores dos coeficientes γ_c e γ_s	35
Quadro 5 – Limites para deslocamentos.....	37
Quadro 6 – Valores mínimos de cargas verticais.....	39
Quadro 7 – Taxas mínimas de armadura de flexão.....	40
Quadro 8 – Coeficientes para laje retangular simplesmente apoiada em seu contorno com carga uniformemente distribuída.....	42
Quadro 9 – Coeficientes para laje retangular engastada em seu contorno com carga uniformemente distribuída.....	43
Quadro 10 – Consumo de materiais para laje maciça apoiada.....	49
Quadro 11 – Consumo de materiais para laje maciça engastada.....	51
Quadro 12 – Espessura de lajes alveolares por vão entre apoios.....	53
Quadro 13 – Custos unitários de material para lajes maciças de concreto armado.....	54
Quadro 14 – Custos unitários de mão de obra para lajes maciças de concreto armado....	55
Quadro 15 – Custo por metro quadrado para lajes alveolares.....	55
Quadro 16 – Custo por peça para lajes alveolares.....	56
Quadro 17 – Custo com equipamentos e equipe de montagem.....	56
Quadro 18 – Custo por peça com frete incluso para lajes alveolares.....	57
Quadro 19 – Custo total por metro quadrado para lajes maciças apoiadas.....	57
Quadro 20 – Custo total por metro quadrado para lajes maciças engastadas.....	58

LISTA DE SIGLAS

ELS – Estado-Limite de Serviço

ELU – Estado-Limite Último

NBR – Norma Brasileira

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

l_x – menor dimensão da laje (m)

l_y – maior dimensão da laje (m)

D – rigidez à flexão da placa (N.m)

γ_c – coeficiente de ponderação da resistência do concreto (adimensional)

γ_s – coeficiente de ponderação da resistência do aço (adimensional)

E – módulo de elasticidade longitudinal do concreto (N/m²)

h – espessura total da laje (m)

b_w – largura da alma de uma viga (m)

ν – coeficiente de Poisson do concreto (valor considerado de 0,2)

p – carga uniforme total na laje (N/m²)

d – altura útil da laje (cm)

ρ_{\min} – taxa mínima de armadura de flexão (adimensional)

A_c – área da seção transversal de concreto (cm²)

A_s – área da seção transversal da armadura longitudinal de tração (cm²)

$A_{s'}$ – área da seção transversal da armadura longitudinal de compressão (cm²)

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto (kN/cm²)

ν – coeficiente de Poisson do concreto (valor considerado de 0,2)

ρ – taxa percentual de área de estribos referenciada à área de concreto (adimensional)

Δc – cobrimento nominal (mm)

x – altura da linha neutra (cm)

H – altura total da estrutura (cm);

W_c – flecha no centro da laje (m)

M_x – momento fletor na direção x (em torno do eixo y) (N.m);

M_y – momento fletor na direção y (em torno do eixo x) (N.m);

M_{xe} – momento fletor no engaste na direção x (em torno do eixo y) (N.m);

M_{ye} – momento fletor no engaste na direção y (em torno do eixo x) (N.m);

M_{xy} – momento torçor nos cantos simplesmente apoiados (N.m);

R_x – reação de apoio em apoio simples (eixo x) (N/m);

R_y – reação de apoio simples (eixo y) (N/m);

R_{xe} – reação de apoio no engaste (eixo x) (N/m);

R_{ye} – reação de apoio no engaste (eixo y) (N/m);

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	16
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA	16
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA	16
2.2.1 Objetivo Principal	16
2.2.2 Objetivo Secundário	16
2.3 PRESSUPOSTO	16
2.4 DELIMITAÇÕES	17
2.5 LIMITAÇÕES	17
2.6 DELINEAMENTO	17
3 LAJES	21
3.1 CARACTERÍSTICAS DAS LAJES MACIÇAS	23
3.2 CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS	24
3.2.1 Aspectos da pré-fabricação	25
3.2.2 Definição das lajes alveolares protendidas	25
4. CRITÉRIOS DE PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE LAJES	28
4.1 LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS	28
4.1.1 Características de projeto	28
4.1.2 Verificação da espessura	31
4.2 LAJES MACIÇAS	32
4.2.1 Classe de agressividade ambiental	32
4.2.2 Cobrimento nominal	32
4.2.3 Estados-limites	34
4.2.3.1 Estados-limites últimos	34
4.2.3.2 Estados-limites de serviço	34
4.2.4 Limites mínimos de espessura	35
4.2.5 Reações de apoio	36
4.2.6 Deslocamentos-limites	36
4.2.7 Cargas verticais mínimas	38
4.2.8 Armaduras longitudinais mínimas e máximas	39
4.2.9 Posição da linha neutra	40
5. MÉTODO DE CÁLCULO DE LAJE MACIÇA	41
5.1 TEORIA DA FLEXÃO DAS PLACAS	41

5.2 TABELA DE LAJE E DETERMINAÇÃO DE SOLICITAÇÕES	42
6. DETERMINAÇÃO DE ESPESSURA E CONSUMO DE MATERIAIS.....	46
6.1 LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO.....	46
6.1.1 Procedimento de Cálculo de Espessuras.....	46
6.1.2 Cálculo do Consumo de Materiais.....	48
6.1.2.1 Lajes Maciças Apoiadas.....	49
6.1.2.2 Lajes Maciças Engastadas.....	50
6.2 LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS.....	52
6.2.1 Considerações de Projeto.....	52
6.2.2 Verificação das Espessuras.....	52
7. CUSTOS DE EXECUÇÃO.....	54
7.1 REFERENCIAIS E CONSIDERAÇÕES EM CUSTOS.....	54
7.2 DETERMINAÇÃO DE CUSTOS.....	56
8. ANÁLISE E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
REFERÊNCIAS.....	62
APENDICE A	62

1 INTRODUÇÃO

A incorporação de novos materiais e técnicas construtivas tem como objetivo inerente propiciar um salto em qualidade, agilidade e redução nos custos de construção. Para a adoção de novas práticas, contudo, são necessários estudos que comprovem a viabilidade e a eficácia destes métodos. El Debs (2000, p. 3) lembra que a construção civil tem sido considerada uma indústria atrasada quando comparada a outros ramos industriais. A razão, segundo ele, está no fato de apresentar, de uma maneira geral, baixa produtividade, grande desperdício de materiais, morosidade e baixo controle de qualidade. Para mudar este panorama, Silva (2010, p. 12) destaca a necessidade de melhora da qualidade e do desempenho das construções, por exemplo, através de estudos comparativos entre diferentes tipos de estruturas.

A implementação de elementos pré-fabricados ou pré-moldados tem oferecido novas alternativas construtivas, oferecendo maior economia e racionalidade na utilização de matérias primas como o concreto e o aço. Por meio de equipamentos modernos e um processo produtivo eficiente, consegue-se atingir níveis elevados de qualidade dos elementos pré-fabricados, atribuindo confiabilidade ao produto e respeitando os requisitos exigidos em norma.

A utilização de lajes pré-fabricadas alveolares, sem dúvida oferece uma redução relevante nos tempos de execução, dispensando etapas como o recorte de formas, montagem dos painéis, concretagem, escoramento, etc. A redução no volume de concreto utilizado, devido à presença de alvéolos também é uma grande vantagem do modelo. Isso reflete em uma grande redução no peso próprio da laje, viabilizando a adoção de grandes peças e superando vãos de 4 a 20 metros.

As lajes maciças, contudo, têm mantido sua larga utilização principalmente no que se refere a edificações comerciais e residenciais com vãos de no máximo 5 metros. Considera-se que a confiabilidade no modelo estrutural, aliado aos conhecimentos já difundidos em sua execução são fatores que contribuem na escolha do projetista.

Portanto, este trabalho compara o modelo de laje maciça de concreto armado moldada *in loco*, com o modelo de laje alveolar protendida pré-fabricada, levando em consideração condições de contorno previamente estabelecidas, descritas ao longo do estudo.

A primeira etapa aborda uma revisão bibliográfica ampla sobre os dois modelos de lajes, a fim de destacar as características de cada uma, especificidades, vantagens e desvantagens, bem como exigências de projeto.

Em seguida, iniciando a etapa de pré-dimensionamento, são destacados os critérios exigidos em Norma, como o cobrimento nominal, estados-limite, deslocamentos-limite, que posteriormente são utilizados no cálculo de espessuras das lajes maciças. Para as lajes alveolares, também são observadas as exigências de projeto, diferenciais estruturais e método de verificação da espessura através das informações fornecidas pelo fabricante.

O método de determinação de solicitações atuantes sobre a laje maciça é descrito na etapa seguinte, detalhando as fórmulas utilizadas e tabelas para obtenção dos coeficientes. Após, inicia-se a etapa de verificação das espessuras aos deslocamentos máximos permitidos. Quando a espessura da laje maciça é verificada como dentro destes limites, podem-se calcular na sequência os quantitativos de concreto, aço e madeiramento de formas, necessários para sua execução. Nas lajes alveolares, os valores de espessura, necessários para o vencimento do vão proposto e obtidos junto ao fabricante são inseridos, juntamente a informações de referência. Com base em todos os quantitativos, o estudo segue para a verificação dos custos de execução que compõem cada modelo, como mão de obra, material, transporte e montagem. O produto entre os custos unitários e respectivos quantitativos resultou em valores que possibilitam a comparação em termos monetários e em função dos vãos entre os apoios.

Por fim, a conclusão destaca de maneira gráfica, qual o limite no qual o emprego de um tipo de laje é o mais indicado, para as condições de contorno estabelecidas e para os custos avaliados, observando-se outros fatores, não considerados neste estudo, que possam deslocar o ponto de equilíbrio.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para o desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual a alternativa construtiva mais vantajosa entre lajes maciças moldadas *in loco* e lajes alveolares protendidas pré-fabricadas, considerando determinados custos e condições de contorno, em função dos vãos entre apoios

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho é o estabelecimento de uma base comparativa de custos, em função dos vãos entre apoios, para adoção de laje maciça de concreto armado moldada *in loco* ou alveolares protendidas pré-fabricadas.

2.2.2 Objetivo secundário

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) verificação da espessura, em função do vão entre apoios, para as lajes maciças e alveolares em estudo;
- b) observações quanto aos tempos de execução dos dois tipos de lajes.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que:

- a) o cálculo pela Teoria da Flexão das Placas apresenta resultados confiáveis;
- b) os apoios são considerados indeslocáveis;
- c) os dados fornecidos pelo fabricante de lajes alveolares são confiáveis e apresentam a solução de menor custo para a sobrecarga considerada.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a:

- a) cálculo de lajes maciças de concreto armado de forma retangular e quadrada, armadas em duas direções, com bordos apoiados ou engastados, compatíveis com projeto destinado a escritórios e aplicação de somente divisórias leves sobre a laje;
- b) utilização de dados fornecidos por empresa fabricante de pré-moldados situada na região metropolitana de Porto Alegre.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

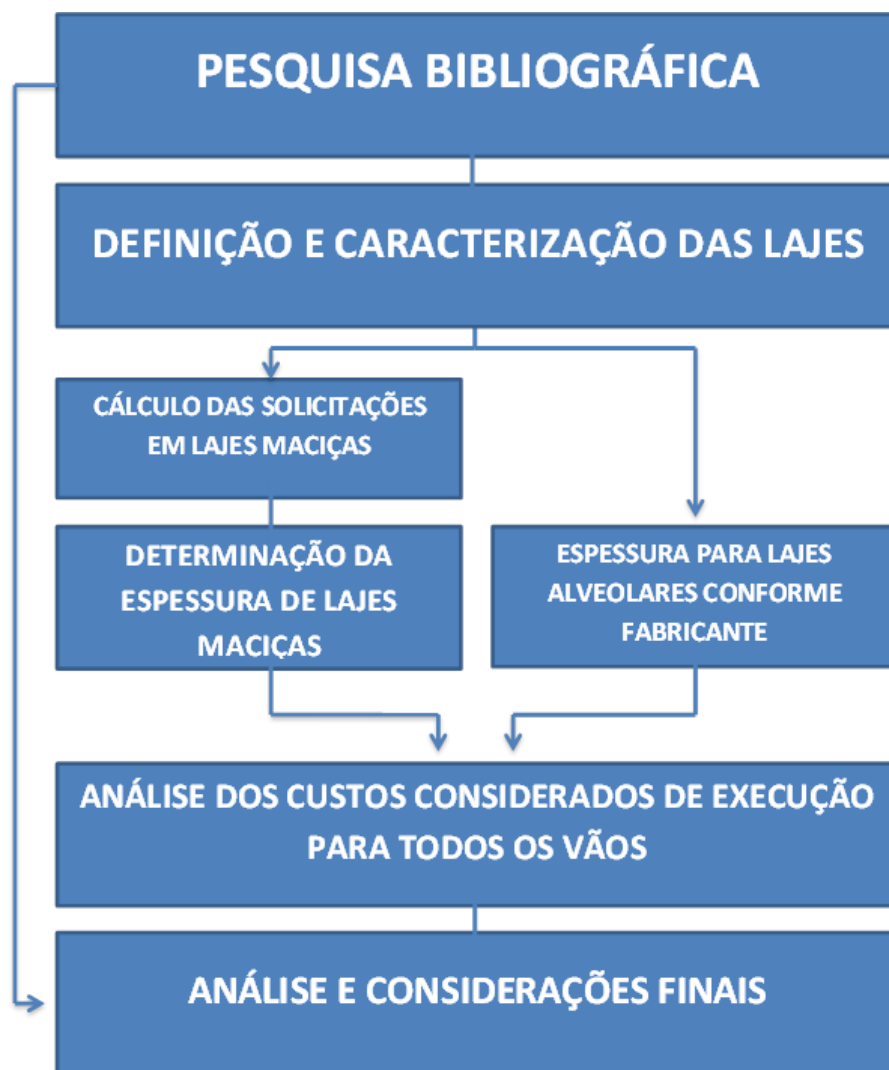
- a) para ambas as lajes,
 - não são considerados efeitos dinâmicos;
 - os carregamentos são compostos exclusivamente por cargas uniformemente distribuídas;
 - as dimensões dos vãos entre apoios são limitadas ao intervalo entre 2 e 12 metros;
 - é considerada a laje construída sobre pilares e vigas já edificadas, com pé direito de 3 metros.
- b) para as lajes alveolares,
 - são consideradas unidirecionais;
 - as configurações geométricas seguem as modulações fornecidas pelo fabricante;
 - são considerados custos relativos ao fornecimento, transporte e montagem das peças;
- f) para as lajes maciças,
 - são avaliadas somente lajes armadas de maneira bidirecional (armadas em duas direções);
 - são considerados custos relativos ao material e estimativa de mão de obra empregados na execução.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho é realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição e caracterização das lajes;
- c) cálculo de solicitações pela Teoria de Flexão das Placas;
- d) determinação da espessura de laje maciça;
- e) adoção das espessuras de laje alveolar conforme ábaco do fabricante;
- f) análise dos custos de execução para todos os vãos;
- g) análise dos dados e conclusões finais.

Figura 1 – Diagrama do delineamento da pesquisa



(fonte: elaborada pelo autor)

O primeiro passo no desenvolvimento do estudo é determinado pela **pesquisa bibliográfica**. Esta etapa é importante durante todo o processo de desenvolvimento do projeto de pesquisa, pois permite um embasamento técnico sobre os aspectos que a envolvem, seja a respeito de modelos de cálculo, normas técnicas e caracterização dos materiais. No diagrama da figura 1 pode-se visualizar que a pesquisa bibliográfica – desenvolvida a partir da consulta a livros, Normas, trabalhos acadêmicos e catálogo do fabricante – serve como base para as análises iniciais, procedimentos de cálculo, análise e considerações finais da pesquisa. O passo seguinte consiste na **definição e caracterização das lajes** que são analisadas e comparadas. Esta etapa descreve os modelos estruturais envolvidos, destacando suas especificidades. As informações definidas neste momento servem de aporte durante todo o desenvolvimento da pesquisa.

A próxima etapa trata do **cálculo das solicitações**. A obtenção dos valores dos esforços sobre a laje maciça se dá através da Teoria da Flexão das Placas. Ao considerar no cálculo os valores dos vãos entre apoios e as condições de contorno como o engastamento e apoio simples das bordas da laje, é possível extrair as respectivas solicitações de momentos fletores.

A partir dos valores de momentos fletores atuantes na estrutura, para cada condição de contorno, passa-se a **determinação da espessura de lajes maciças**, sendo considerada esta espessura a dimensão ideal para o consumo mínimo de materiais, respeitando os limites de deformação estabelecidos pela Norma. Juntamente as últimas duas etapas anteriormente descritas, a **espessura das lajes alveolares** pode ser verificada através das informações de modelos e dimensões fornecidas pelo fabricante. Estas informações relacionam os valores de sobrecarga, vão superado e respectiva espessura de laje alveolar capaz de atender a estas configurações, com a utilização mínima de materiais na produção destes elementos.

A **análise dos custos de execução para todos os vãos** analisados aparece na sequência. A partir das configurações dimensionais de vão, largura e espessura, é avaliado o custo do material e mão de obra para a construção da laje maciça, juntamente ao custo de fornecimento, transporte e montagem para o caso das lajes alveolares.

Os valores dos materiais de construção e mão de obra são extraídos com base em índices de construção e valores praticados no mercado regional. Para as lajes alveolares, os custos de fornecimento, transporte e montagem foram verificados junto ao fabricante.

Estas informações, mesmo não sendo inclusas no cálculo do custo de execução, tem um peso importante na decisão final do modelo de laje a ser adotado.

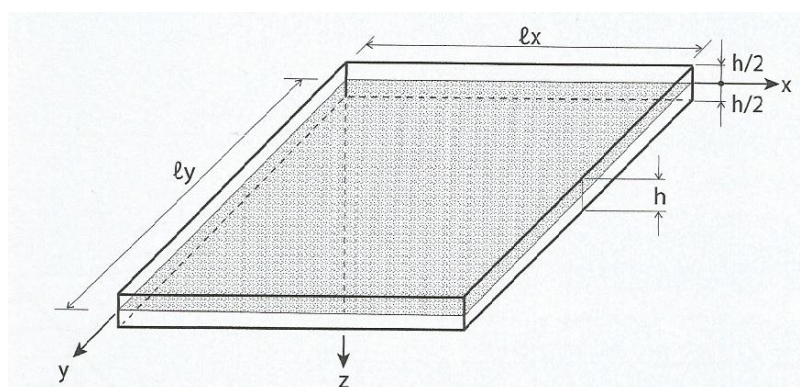
A etapa da **análise e considerações finais** reúne os dados descritos nos capítulos anteriores juntamente a pesquisa bibliográfica realizada e verifica através de gráficos, em termos de custo por metro quadrado e vão entre apoios, qual tipo de laje possui melhor viabilidade sob determinadas condições de contorno. São destacadas também nesta etapa, informações relativas aos de execução médios para cada tipo de laje analisada.

3 LAJES

Este capítulo destaca importantes definições e características referentes às lajes maciças de concreto armado e alveolares protendidas pré-fabricadas.

Segundo Fusco (2013, p. 241), as placas podem ser consideradas estruturas laminares com superfície média plana, solicitadas predominantemente para forças perpendiculares ao seu plano médio. Em estruturas de concreto, as placas usualmente ganham o nome de lajes (figura 2).

Figura 2 – Lajes de concreto



(fonte: FUSCO, 2013, p. 241)

Estas lajes ou placas, quando sob a ação de um determinado carregamento, sofrem deformações que resultam no deslocamento dos pontos que a compõem (FUSCO, 2013, p. 241). O comportamento de placa que a laje assume, está associado à flexão local devido ao carregamento diretamente aplicado à laje (FUSCO, 2013, p. 254).

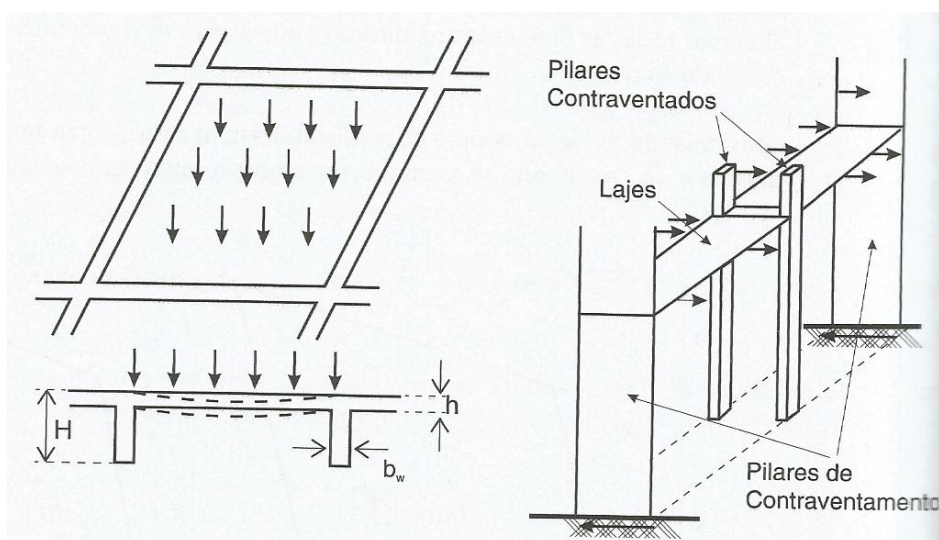
Araújo (2003, p. 1) considera as lajes como elemento básico às edificações, de características bidimensionais planas e que tem função de receber as cargas de utilização das edificações, aplicada nos pisos, e transmiti-las às vigas. As vigas por sua vez transmitem a carga aos pilares que a transferem por fim às fundações. As lajes podem ser apoiadas ao longo de seu contorno e para isto, a dimensão h deve ser bem inferior as outras duas dimensões (l_y e l_x).

Em relação ao cálculo dos esforços de lajes como placas, Fusco (2013, p. 255) observa que podem ser estruturalmente desligadas das vigas que as sustentam. As lajes são calculadas isoladamente das vigas, como se estivessem assentadas sobre apoios rígidos e isto

desconsidera qualquer influência de deformabilidade das vigas de apoio que transmitem o esforço da laje.

As lajes também podem assumir o comportamento de chapas e esta diferença é citada por Fusco (2013, p. 254). Quando está sob a ação de cargas que agem perpendicularmente a seu plano médio, as lajes assumem o comportamento de placa. Em contrapartida, sob a ação de cargas atuantes em seu próprio plano médio, assume comportamento de chapa, diretamente associado ao contraventamento da estrutura global tridimensional e também à transmissão das cargas horizontais, oriundas de esforços de vento, como ilustrado à direita na figura 3.

Figura 3 – Comportamento de lajes



(fonte: FUSCO, 2013, p. 254)

Aplicadas às edificações, as lajes podem assumir denominações diferenciadas conforme suas características geométricas e modo de fabricação, como descreve Araújo (2003, p. 2). Podem ser estas do tipo maciças, nervuradas, lajes cogumelo e pré-moldadas de diferentes modelos. A escolha do melhor modelo a ser adotado, segundo esse autor, passa por considerações econômicas, fatores de segurança e pelo projeto arquitetônico em avaliação. Em relação aos apoios, podem ser constituídos por vigas ou por alvenarias.

A seguir é definida cada uma das lajes estudadas no projeto, destacando aspectos singulares de cada modelo, importantes tanto no processo de cálculo, quanto na avaliação dos custos de produção intrínsecos. O conceito de pré-fabricação é abordado de maneira a destacar as

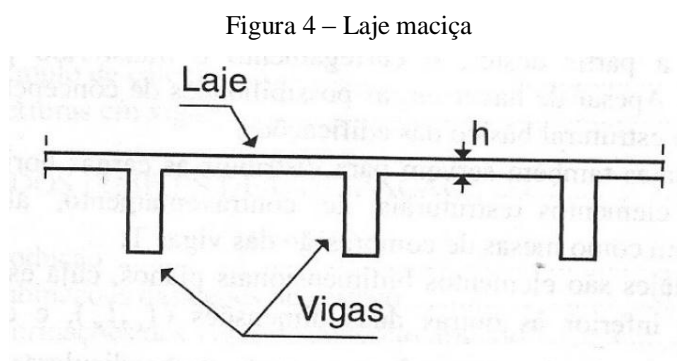
características que o diferenciam do processo de moldagem *in loco*, quais as implicações deste processo, seus potenciais benefícios na utilização e particularidades de projeto.

3.1 CARACTERÍSTICAS DAS LAJES MACIÇAS

Define-se laje maciça convencional como sendo uma placa plana de concreto armado, sem a presença de vazios, com armaduras longitudinais de flexão e eventualmente armaduras transversais. Tradicionalmente são construídas com espessuras uniformes podendo variar normalmente de 7 a 15 cm e apoiadas ao longo de seu contorno por vigas ou alvenaria, com aplicação destinada a edifícios de múltiplos pavimentos, residenciais ou comerciais (BASTOS, 2013, p. 1).

Araújo (2003, p. 2) também ressalta que este é o modelo de laje aplicado predominantemente em edifícios de modelo residencial, tendo em vista que os vãos são menores em relação a edificações comerciais ou industriais.

A figura 4 ilustra o corte de um piso de concreto armado constituído por laje maciça apoiada em vigas, com as indicações de suas posições.



(fonte: ARAÚJO, 2003, p. 2)

Devido ao peso próprio da laje maciça, é prática usual adotar-se como vão médio econômico entre seus apoios um valor entre 3,5 e 5 metros (ALBUQUERQUE, 1999, p. 21).

Albuquerque cita algumas desvantagens da utilização desta laje:

- a) elevado consumo de concreto, aço e formas;
- b) baixa produtividade de execução devido ao recorte de formas;

c) baixo reaproveitamento de formas.

E as vantagens, segundo o autor:

- a) maior rigidez da estrutura de contraventamento através da formação de pórticos pelas vigas;
- b) contribuição da área de mesa para o dimensionamento das vigas
- c) método de execução é bem conhecido e difundido pela mão de obra.

A caracterização das lajes alveolares protendidas é descrita nos itens a seguir.

3.2 CARACTERÍSTICAS DAS LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS

Tendo sua origem na Alemanha, os painéis alveolares possuem alta empregabilidade nas construções por todo o mundo. Hoje sua técnica de execução é bastante desenvolvida e empregada principalmente na América do Norte e Europa Ocidental. Este tipo de elemento alveolar pode ter sua utilização tanto em paredes quanto para execução de lajes. Neste último caso, pode ser aplicada sobre a superfície da laje uma camada adicional de concreto denominada de capeamento que forma uma seção composta entre os elementos (EL DEBS, 2000, p. 384).

Um importante aspecto nas lajes alveolares é a utilização da protensão, o que confere a peça, propriedades de resistência que tornam seu emprego viável. Elementos protendidos tendem a apresentar pesos menores que os correspondentes em concreto armado, além de melhores condições no que se refere aos estados limites de formação e de abertura de fissuras, e ao limite de deformações excessivas (EL DEBS, 2000, p. 74).

No subitem a seguir, são destacados aspectos singulares dos elementos pré-fabricados e a diferenciação do termo pré-moldagem.

3.2.1 Aspectos da pré-fabricação

A pré-fabricação de peças estruturais vem sendo amplamente adotada em razão dos grandes benefícios que estes elementos trazem as construções, principalmente na redução de custos de execução e prazos, o que tem impulsionado a adoção destes tipos de materiais. Os termos pré-fabricação e pré-moldagem, no entanto, ainda causam confusão em relação ao seu conceito.

El Debs (2000, p. 5) descreve o conceito de pré-moldagem como um processo de construção em que a obra, ou parte dela, é moldada fora de seu local de utilização definitivo. Frequentemente a pré-moldagem é relacionada a outros dois termos: a pré-fabricação e a industrialização da construção.

Em referência a industrialização, El Debs (2000, p. 11) acrescenta:

[...] a industrialização das construções, a pré-fabricação e a pré-moldagem são conceitos distintos, ainda que relacionados entre si. A grosso modo, pode-se dizer que a pré-moldagem aplicada à produção em grande escala resulta na pré-fabricação, que, por sua vez, é uma forma de buscar a industrialização da construção.

Duas diretrizes definem o termo pré-fabricação segundo El Debs (2000, p. 13). Em uma delas, a pré-moldagem é utilizada como forma de buscar a industrialização da construção, por meio da pré-fabricação. Na outra, a pré-moldagem é utilizada como uma forma de racionalizar a construção das estruturas de concreto.

O efeito direto da industrialização deste processo é a redução da variabilidade, incremento de qualidade e redução de custos, atingida efetivamente quando o processo apresentar viabilidade econômica, como coloca El Debs (2000, p. 13):

A industrialização apresenta viabilidade econômica quando o custo dos elementos, constituídos pela soma dos custos fixos e custos variáveis, resulta menor que o custo correspondente à produção com manufatura. Isso ocorre a partir de um determinado número de elementos [...] que caracterizaria uma produção mínima para viabilizar a produção industrial.

3.2.2 Definição das lajes alveolares protendidas

No atual mercado da construção civil brasileira, o sistema de lajes alveolares tem obtido um destaque mais expressivo em relação a outras soluções de pisos. A configuração das lajes alveolares é definida por uma seção transversal de concreto com alvéolos (núcleos vazios), que segundo Petrucelli (2009, p. 19), reduzem o peso da estrutura e em combinação com a protensão, são capazes de cobrir grandes vãos entre apoios. Os esforços são suportados pela armação em aço protendido no sentido longitudinal e pela resistência à tração no concreto no sentido transversal, já que não há armaduras nesta direção.

O processo de produção de lajes alveolares pode ser definido, de acordo com Petrucelli (2009, p. 20), como um processo linear de fabricação e envolve pistas de concretagem de

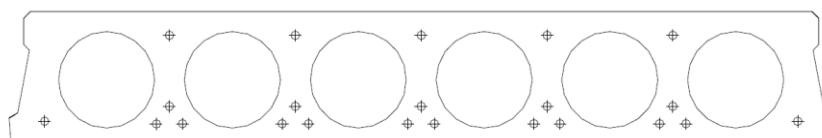
comprimentos variados, dependendo da capacidade de produção. As cordoalhas de protensão são alocadas ao longo da pista e pré-tensionada. O concreto utilizado pode ser usinado na própria fábrica ou fornecido por concreteiras. As lajes são produzidas através de extrusoras ou com a utilização de moldes de maneira contínua, com comprimentos que são estabelecidos no momento do corte da placa alveolar. Passados a cura e o corte, os elementos são estocados em pilhas e transportados posteriormente ao canteiro de obra.

A montagem das lajes é feita com a utilização de guindastes. Aspectos importantes de vinculação da estrutura e reforços, definidos previamente no projeto estrutural, devem ser observados e adotados. Após o posicionamento, as lajes são niveladas e grauteadas. Posteriormente os elementos recebem uma capa estrutural armada, com dimensão mínima de 5 cm (PETRUCCELLI, 2009, p. 20). Esta capa pode ser dispensada em alguns casos, de acordo com as concepções de projeto, contudo, sem dispensar a realização do nivelamento e grauteamento que garantem a planicidade e monolitismo do conjunto.

Observa, segundo El Debs (2000, p. 386), devido ao processo de execução, a colocação de armaduras adicionais e conectores metálicos para realização de ligações deve ser feita somente em casos especiais, de maneira a não prejudicar a racionalização do processo e consequente perda de agilidade na montagem.

A execução de furos nos painéis alveolares de laje é permitida para eventual passagem de tubulações hidráulicas ou elétricas, contudo não devem interromper as cordoalhas de protensão para o não comprometimento da capacidade de suporte (PETRUCCELLI, 2009, p. 32). Na figura 5 é apresentada a seção de uma laje alveolar com formato circular de alvéolos. Contudo, o vazamento dos elementos pode ser de formatos variados, como circular, oval, retangular, etc.

Figura 5 – Seção genérica de uma laje alveolar



(fonte: PETRUCCELLI, 2009, p. 19)

Analisando as características geométricas da laje alveolar, juntamente ao seu processo de fabricação e instalação, pode-se determinar um conjunto de aspectos positivos e negativos

inerentes ao sistema construtivo. Petrucelli (2009, p. 20) destaca vantagens na utilização do sistema:

[...] como vantagens pode-se destacar que esse tipo de laje apresenta:

- a) aplicações variáveis como pisos, forros e paredes;
- b) baixo custo de produção (alta produção com mão de obra reduzida);
- c) bom acabamento na face inferior (podem dispensar o uso de forros);
- d) peso próprio reduzido devido à geometria;
- e) bom isolamento térmico e acústico.

Contudo, a autora também cita aspectos que se colocam como impeditivos ao uso do sistema construtivo:

[...] as lajes alveolares também apresentam algumas desvantagens:

- a) inflexibilidade em certos casos de projeto, como largura padrão, recortes;
- b) resistência à flexão transversal limitada, devido à ausência de armadura nesse sentido;
- c) diferentes deformações;
- d) requer equipamentos especiais de produção e manuseamento.

O capítulo seguinte trata dos critérios que são utilizados para o dimensionamento das lajes maciças, destacando aspectos normativos e procedimentos de cálculo. Para as lajes alveolares são citados fatores importantes de projeto levados em consideração para o dimensionamento das peças e são apresentados exemplos de quadros para verificação da espessura necessária.

4 CRITÉRIOS DE PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE LAJES

As lajes maciças e alveolares quando comparadas, apresentam diferenças em relação aos critérios de projeto adotados e para o respectivo dimensionamento. Para o estudo das lajes protendidas alveolares, é importante analisar os aspectos singulares de projeto, juntamente à exemplificação do modo de obtenção das configurações geométricas através das informações fornecidas pelas empresas fabricantes. Para as lajes maciças, são destacadas as exigências em Norma para o dimensionamento como também o método do cálculo utilizado para a obtenção das espessuras.

4.1 LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS

Para o dimensionamento das lajes alveolares do estudo, é preciso observar aspectos relativos ao projeto para o correto dimensionamento da espessura e análise dos custos de produção. No item a seguir são descritas as características de projeto e posteriormente, as ferramentas necessárias para a verificação da espessura da laje.

4.1.1 Características de projeto

Os projetos de estruturas com aplicação de lajes alveolares tendem a demandar um detalhamento maior em relação a seus aspectos construtivos. Fato diretamente ligado a baixa experiência da mão de obra na execução destas obras e à importância da correta execução dos elementos de vinculação, estabelecidos em projeto estrutural.

El Debs (2000, p. 23) destaca as peculiaridades de projeto entre os dois sistemas de lajes analisados:

O projeto das estruturas de concreto pré-moldado diferencia-se do projeto das estruturas de concreto moldado no local quanto à análise estrutural, basicamente, pelas seguintes razões:

- a) necessidade de considerar outras situações de cálculo além da situação final da estrutura;
- b) necessidade de considerar as particularidades das ligações entre os elementos pré-moldados que formam a estrutura.

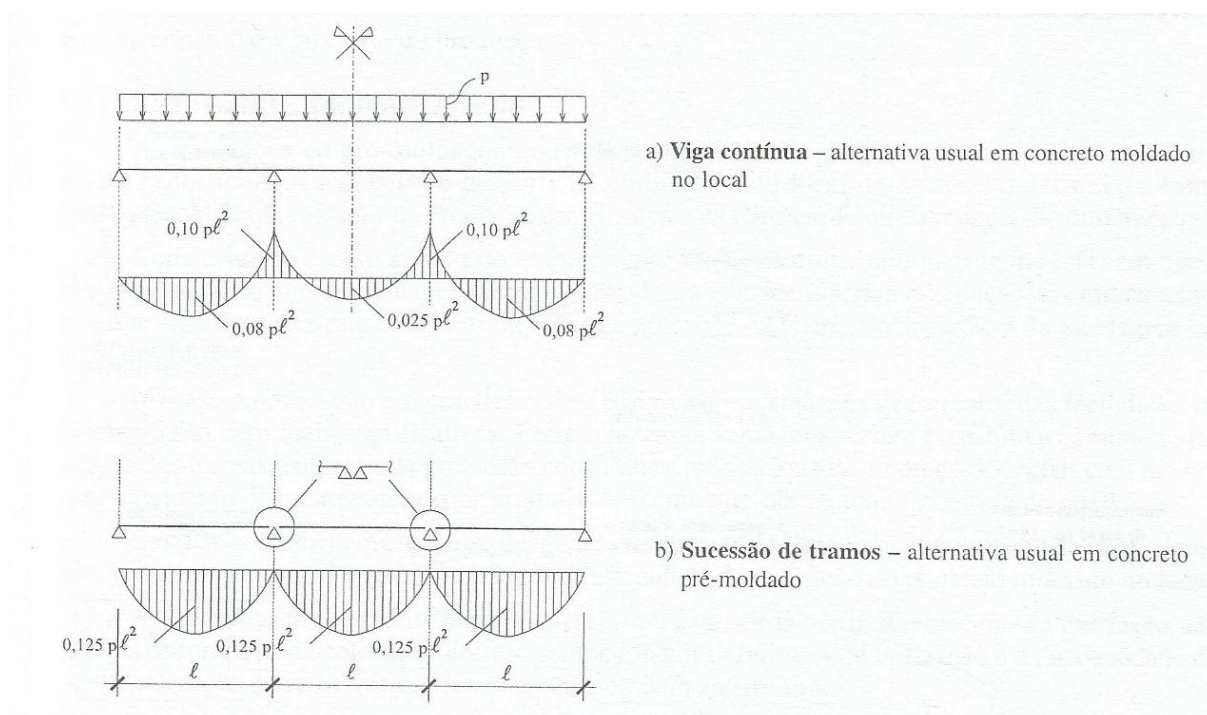
Ainda, segundo o autor, para o elemento pré-moldado devem ser consideradas situações transitórias que correspondem às fases de desmoldagem, transporte, armazenamento e montagem, podendo estas apresentar solicitações mais desfavoráveis que aquelas correspondentes à situação definitiva. No entanto, o quesito com maior relevância na diferenciação dos modelos está no projeto das ligações entre os elementos pré-moldados. O aspecto das vinculações das peças à estrutura demanda atenção tanto no período de projeto quanto na execução, já que implicam diretamente no comportamento estrutural.

As ligações mais simples, normalmente articulações, acarretam elementos mais solicitados à flexão comparados com similares de concreto amoldado no local, bem como estrutura com pouca capacidade de redistribuição de esforços. Já as ligações que possibilitam a transmissão de momentos fletores, chamadas de ligações rígidas, tendem a produzir estruturas com comportamento próximo ao das estruturas de concreto moldado no local. Elas são, via de regra, mais difíceis de executar, ou então mais caras, ou reduzem uma das principais vantagens da pré-moldagem que é a rapidez da construção.

Segundo El Debs (2000, p. 24), a consequência para a não observação destes aspectos é a adoção de modelos estruturais que não são os mais adequados para serem empregados nas estruturas de concreto pré-moldado. A figura 6 ilustra o caso de vigas contínuas normalmente empregadas nas estruturas de concreto moldado *in loco*. Em detrimento da facilidade de montagem dos elementos pré-fabricados, adota-se uma sucessão de tramos simplesmente apoiados, causando prejuízos em relação a distribuição de momentos fletores.

Em análise preliminar, pode-se pensar que a distribuição de momentos fletores da segunda alternativa da figura 6, acarreta em um maior consumo de materiais e, portanto, economicamente desfavorável. El Debs (2000, p. 25), no entanto, observa que esta conclusão não seria correta, pois não há correspondência direta entre a distribuição de momentos fletores e consumo de materiais pelo fato de existirem importantes diferenças entre as duas alternativas, como a resistência dos materiais e a forma da seção transversal. Juntamente, custos inerentes aos elementos pré-moldados como a montagem e transporte, podem ser amortizados se considerada a ausência de custo relativo às fôrmas e ao cimbramento.

Figura 6 – Comparação de momentos fletores entre sucessão de tramos simplesmente apoiados e viga contínua



(fonte: EL DEBS, 2000, p. 25)

Analisando estruturalmente os painéis alveolares, pode-se assumir que o comportamento destes elementos corresponde ao de uma laje armada em uma direção. Segundo El Debs (2000, p. 385), o projeto normalmente considera que a laje funciona como elemento simplesmente apoiado, em geral, não transferindo momentos negativos para os apoios.

4.1.2 Verificação da espessura

Grande parte das empresas de pré-fabricados disponibilizam em catálogos ou em seus *sites* na internet informações técnicas relativas as lajes alveolares produzidas. Devem ser utilizadas no estudo informações que relacionam os itens:

- a) vãos máximos atendidos;
- b) sobrecarga de projeto;
- c) espessura necessária da peça.

Podem ser citadas também informações referentes à espessura e peso-próprio do capeamento em caso de execução deste. O quadro 1 exemplifica um modelo de tabela fornecido pelo fabricante.

Quadro 1 – Dados para pré-dimensionamento de painéis alveolares

PA12	Sem Capa		Capa = 4cm				
	Vãos Máximos (cm)						
Armação	Classe 1		Classe 2		Classe 3		
Caapeamento	Sem Capa	Capa=4cm	Sem Capa	Capa=4cm	Sem Capa	Capa=4cm	
M.R.U. (KN.m/m)	19,7	29,3	25,8	38,0	29,7	43,6	
Sobrecargas (KN/m ²)	0,5	658	563	753	644	808	691
	1,0	603	563	690	644	740	691
	2,0	524	563	600	644	643	691
	3,0	470	526	538	599	577	642
	4,0	430	487	492	555	527	594
	5,0	398	456	456	519	489	556
	6,0	373	430	427	490	458	525
	7,0	352	408	403	465	432	498
	8,0	334	389	382	443	410	475
	9,0	318	373	364	425	391	455
10,0	305	358	349	408	375	437	
Dados Técnicos:							
Peso-próprio da laje (sem capa) = 2,10 KN/m ² - Peso-próprio da laje (com capa) = 3,05 KN/m ²							
Consumo de concreto (C30), brita 0, para rejunte das placas = 4,0 litros/m ² .							
Concreto de caapeamento C30.							

(fonte: TATU PRÉ-MOLDADOS LTDA, 2014, p. 1)

4.2 LAJES MACIÇAS

Os critérios de projeto e dimensionamento para lajes maciças de concreto armado são retirados diretamente da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). Os critérios necessários para o estudo são a classe de agressividade ambiental, o cobrimento nominal, os estados limites, deslocamentos limites, cargas verticais mínimas, taxa de armadura e posição da linha neutra.

4.2.1 Classe de agressividade ambiental

Em razão das diferentes condições ambientais de agressividade ligadas a ações físicas e químicas sobre o concreto armado, a NBR 6118 define diferentes classes descritas no quadro 2.

Quadro 2 – Classes de agressividade ambiental

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

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 17)

4.2.2 Cobrimento nominal

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 19) define no item 7.4.7.2 o cobrimento nominal como sendo o cobrimento mínimo, acrescido da tolerância de execução. O cobrimento mínimo, segundo a Norma, é o menor valor que deve ser respeitado ao longo de todo o elemento considerado. Estes valores dependem do tipo da estrutura e do ambiente a qual ela estará submetida. Estes cobrimentos nominais são estabelecidos no quadro 3.

Quadro 3 – 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 [quadro 1 neste trabalho]			
		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: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 20)

Quando houver um controle adequado da qualidade de execução, o item 7.4.7.4 da Norma cita que a tolerância de execução pode ser reduzida para o valor de $\Delta c = 5\text{ mm}$, exigindo, no entanto, o detalhamento deste controle em desenhos de projeto.

4.2.3 Estados-limites

Entende-se por estado-limite quando um dos elementos constitutivos de uma estrutura não satisfaz as exigências pela qual ela fora projetada. Os estados-limites a ser considerados no projeto de estruturas dividem-se em dois tipos: estado-limite último (ELU) e de serviço (ELS).

4.2.3.1 Estados-limites últimos

Em relação aos estados-limites últimos, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 54) define sob quais aspectos as estruturas de concreto devem ser verificadas:

- a) estado-limite último da perda do equilíbrio da estrutura, admitida como corpo rígido;
- b) estado-limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, devido às solicitações normais e tangenciais, admitindo-se a redistribuição de esforços internos, desde que seja respeitada a capacidade de adaptação plástica [...], e admitindo-se, em geral, as verificações separadas das solicitações normais e tangenciais; todavia, quando a interação entre elas for importante, ela estará explicitamente indicada nesta Norma;
- c) estado-limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando os efeitos de segunda ordem;
- d) estado-limite último provocado por solicitações dinâmicas [...];
- e) estado-limite último de colapso progressivo;
- f) estado-limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, no seu todo ou em parte, considerando exposição ao fogo [...];
- g) estado-limite último de esgotamento da capacidade resistente da estrutura, considerando ações sísmicas [...];
- h) outros estados-limites últimos que eventualmente possa ocorrer em casos especiais.

Observa-se que em comparação a Norma vigente anterior, NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007), foi acrescentada duas verificações relativas ao atendimento dos estados-limites da estrutura para situações de resistência ao fogo e ações sísmicas.

No estado-limite último, as resistências devem ser ponderadas segundo critérios estabelecidos no item 12.4.1 da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 71) e indicados no quadro 4.

Quadro 4 – Valores dos coeficientes γ_c e γ_s

Combinações	Concreto	Aço
	γ_c	γ_s
Normais	1,4	1,15
Especiais ou de construção	1,2	1,15
Excepcionais	1,2	1,0

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 71)

4.2.3.2 Estados-limites de serviço

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 55) coloca que os estados-limites de serviço estão relacionados à durabilidade da estrutura, bem como a aparência, conforto do usuário e à boa utilização funcional. Estes quesitos aplicam-se tanto em relação aos usuários como também aos equipamentos e máquinas utilizados.

4.2.4 Limites mínimos de espessura

A NBR 6118 especifica limites mínimos para a espessura de lajes maciças que devem ser respeitados.

Para o projeto de lajes maciças de concreto armado NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 74), estabelece espessuras mínimas que devem ser adotadas:

- 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 suportem 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 $\frac{\ell}{42}$ para lajes de piso biapoiadas e $\frac{\ell}{50}$ para lajes de piso contínuas;
- g) 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo, fora do capitel.

4.2.5 Reações de apoio

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 96), estabelece no item 14.7.6.1 condições de aproximação para o cálculo de reações de apoio das lajes maciças retangulares com carga uniforme:

- a) as reações em cada apoio são as correspondentes às cargas atuantes nos triângulos ou trapézios determinados através das charneiras plásticas correspondentes à análise efetivada com os critérios de 14.7.4, sendo que essas reações podem ser, de maneira aproximada, consideradas uniformemente distribuídas sobre os elementos estruturais que lhes servem de apoio;
- b) quando a análise plástica não for efetuada, as charneiras podem ser aproximadas por retas inclinadas, a partir dos vértices com os seguintes ângulos:
 - 45° entre dois apoios do mesmo tipo;
 - 60° a partir do apoio considerado engastado, se o outro for considerado simplesmente apoiado;
 - 90° a partir do apoio, quando a borda vizinha for livre.

4.2.6 Deslocamentos-limites

Os deslocamentos-limites descritos na NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 76), presentes na tabela 13.2 da Norma (quadro 5 deste trabalho), são valores práticos utilizados para verificação em serviço do estado-limite de deformações excessivas das estruturas. Estes limites definem um critério numérico para aceitação do dimensionamento da estrutura e são classificados em quatro grupos básicos:

- a) aceitabilidade sensorial: o limite é caracterizado por vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável. [...];
- b) efeitos específicos: os deslocamentos podem impedir a utilização adequada da construção;
- c) efeitos em elementos não estruturais: deslocamentos estruturais podem ocasionar o mau funcionamento de elementos que, apesar de não fazerem parte da estrutura, estão a ela ligados.
- d) efeitos em elementos estruturais: os deslocamentos podem afetar o comportamento do elemento estrutural, provocando afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas. Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-as ao modelo adotado.

Quadro 5 – Limites para deslocamentos

Tipo de efeito	Razão da ilimitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$l/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	$l/350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$l/250^a$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásio e pistas de boliche	Total	$l/350 + \text{contraflecha}^b$
			Ocorrido após a construção do piso	$l/600$
Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento	
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$l/500^c$ e 10 mm e $\theta = 0,0017 \text{ rad}^d$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$l/250^c$ e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente ($\psi = 0,30$)	$H/1700$ e $H_i/850^e$ entre pavimentos ^f
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$l/400^g$ e 15 mm
Efeitos em elementos não estruturais	Forros	Movimentos térmicos horizontais	Provocado por diferença de temperatura	$H_i/500$
		Revestimentos colados	Ocorrido após a construção do forro	$l/350$
		Revestimentos pendurados ou com juntas	Deslocamento ocorrido após a construção do forro	$l/175$
	Pontes rolantes	Desalinhamento de trilhos	Deslocamento provocado pelas ações decorrentes da frenagem	$H/400$

continua

continuação

Tipo de efeito	Razão da ilimitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Efeitos em elementos estruturais	Afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas	Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-os ao modelo estrutural adotado.		
<p>^a As superfícies devem ser suficientemente inclinadas ou o deslocamento previsto compensado por contraflechas, de modo a não se ter acúmulo de água.</p> <p>^b Os deslocamentos podem ser parcialmente compensados pela especificação de contraflechas. Entretanto, a atuação isolada da contraflecha não pode ocasionar um desvio do plano maior que $l/350$.</p> <p>^c O vão l deve ser tomado na direção na qual a parede ou a divisória se desenvolve.</p> <p>^d Rotação nos elementos que suportam paredes.</p> <p>^e H é a altura total do edifício e H_i o desnível entre dois pavimentos vizinhos.</p> <p>^f Esse limite aplica-se ao deslocamento lateral entre dois pavimentos consecutivos, devido à atuação de ações horizontais. Não podem ser incluídos os deslocamentos devidos a deformações axiais nos pilares. O limite também se aplica ao deslocamento vertical relativo das extremidades de lintéis conectados a duas paredes de contraventamento, quando H_i representa o comprimento do lintel.</p> <p>^g O valor l refere-se à distância entre o pilar externo e o primeiro pilar interno.</p>				
NOTAS				
1 Todos os valores-limites de deslocamentos supõem elementos de vão l suportados em ambas as extremidades por apoios que não se movem. Quando se tratar de balanços, o vão equivalente a ser considerado deve ser o dobro do comprimento do balanço.				
2 Para o caso de elementos de superfície, os limites prescritos consideram que o valor l é o menor vão, exceto em casos de verificação de paredes e divisórias, onde interessa a direção na qual a parede ou divisória se desenvolve, limitando-se esse valor a duas vezes o vão menor.				
3 O deslocamento total deve ser obtido a partir da combinação das ações características ponderadas pelos coeficientes definidos na Seção 11.				
4 Deslocamentos excessivos podem ser parcialmente compensados por contraflechas.				

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 77-78)

4.2.7 Cargas verticais mínimas

Pode-se dividir as cargas que atuam sobre uma laje em cargas permanentes e acidentais. Segundo Araújo (2003, p. 20), as cargas permanentes possuem valores constantes ou que se alteram muito pouco durante a vida útil da construção. As cargas acidentais, no entanto, sofrem variações significativas durante o tempo de vida da construção. O autor estabelece os seguintes parâmetros na caracterização das cargas incidentes sobre a laje:

As cargas permanentes são constituídas pelo peso próprio da estrutura e pelas sobrecargas fixas, como o peso dos revestimentos de alvenaria e enchimentos. As cargas acidentais atuam nas lajes em função da finalidade da edificação e incluem o peso de pessoas, móveis, materiais diversos, veículos, etc.

Os valores das cargas permanentes podem ser retirados a partir dos pesos específicos dos materiais de construção empregados. Os utilizados mais frequentemente são fornecidos pela NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980, p. 1). Também podem ser retirados desta Norma os valores de cargas acidentais.

A NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980, p. 1) define valores para cargas mínimas a serem consideradas no projeto de estruturas de edificações. Para tanto, podem ser divididas entre cargas permanentes e acidentais. As cargas permanentes consideram o peso próprio do elemento, juntamente aos elementos fixos a este e instalações permanentes. As cargas acidentais são atribuídas conforme o uso da estrutura. Araújo (2003, p. 26), descreve que as cargas verticais atuantes sobre a laje são oriundas do peso de pessoas, móveis, utensílios e veículos, além de cargas que são aplicáveis em caráter especial. Estas cargas são consideradas uniformemente distribuídas sobre o elemento.

Alguns dos valores mínimos exigíveis em Norma e aplicáveis no presente estudo são apresentados no quadro 6.

Quadro 6 – Valores mínimos de cargas verticais

Local		Carga (KN/m ²)
Biblioteca	depósito de livros	4
Escritório	salas de uso geral e banheiro	2

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980, p. 3)

4.2.8 Armaduras longitudinais mínimas e máximas

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 130), determina as **taxas de armaduras mínimas** que devem ser respeitadas segundo o quadro 7, para variações de f_{ck} de 20 à 90 MPa.

Quadro 7 – Taxas mínimas de armadura de flexão

Forma da seção	Valores de ρ_{\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 ρ_{\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, ρ_{\min} deve ser recalculado.

(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 130)

Em relação à **taxa máxima de armaduras** na seção transversal da peça, a Norma coloca no item 17.3.5.2.4, que a soma das armaduras de tração e de compressão representadas por ($A_s + A_s'$), não podem ter um valor maior que 4 % A_c , calculada na região fora da zona de emendas.

4.2.9 Posição da linha neutra

Deve ser garantido o adequado comportamento dúctil em lajes, explicitado no item 14.7.4 da Norma. A posição da linha neutra no ELU deve obedecer aos seguintes limites:

- a) $x/d \leq 0,25$, para concretos com $f_{ck} \leq 50$ MPa;
- b) $x/d \leq 0,15$, para concretos com $f_{ck} > 50$ MPa.

5 MÉTODO DE CÁLCULO DE SOLICITAÇÕES EM LAJE MACIÇA

Araújo (2003, p 31-32) descreve métodos diferenciados para o dimensionamento de lajes. Neste estudo foi adotado o dimensionamento pela Teoria de Flexão das Placas, contudo, podem ser utilizados para o cálculo o Método de Marcus, Teoria das Linhas de Ruptura, Método dos Elementos Finitos e o Método das Diferenças Finitas. Todos estes são métodos para o cálculo e dimensionamento de lajes armadas em duas direções, também chamadas de lajes bidirecionais. Para estas, o cálculo deve levar em conta sua flexão biaxial, o que, segundo o autor, aumenta consideravelmente a complexidade do problema.

Para o cálculo das solicitações neste estudo, utiliza-se a Teoria de Flexão das Placas. Esta teoria determina que sobre as equações diferenciais de equilíbrio da placa, aplicam-se condições de contorno que prescrevem valores para os deslocamentos e as rotações no contorno. As condições de contorno, segundo Araújo (2003, p. 45) podem ser geométricas, mecânicas ou mistas. Como exemplo de condição de contorno geométrica, o autor cita que em uma placa, definindo-se o bordo engastado, tanto a flecha quanto a rotação tem seus valores nulos. Condições de contorno mecânicas, no entanto correspondem a valores prescritos dos esforços solicitantes. Condições de contorno mistas devem incluir os dois tipos.

A partir da integração das equações diferenciais, sendo aplicadas as condições de contorno, é possível gerar as Tabelas de Lajes, com valores que possibilitam a determinação de valores de flecha, momentos fletores e reações de apoio a partir da relação entre os vãos.

5.1 TEORIA DA FLEXÃO DAS PLACAS

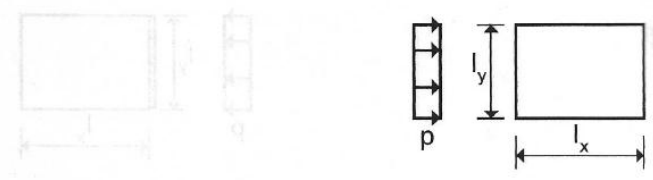
Admitindo-se que o material assumo um comportamento elástico linear, como coloca Araújo (2003, p. 31), a solução do problema se dá através da resolução da equação diferencial de quarta ordem, aplicando-se as condições de contorno. A equação diferencial da placa é obtida ao analisar o equilíbrio sobre um elemento infinitesimal de posição genérica na placa. As tabelas geradas posteriormente ao método de integração são utilizadas neste estudo a fim de estabelecer as dimensões da peça, sem dar ênfase ao desenvolvimento das equações que levam aos resultados encontrados nas tabelas.

5.2 TABELAS DE LAJE E DETERMINAÇÃO DE SOLICITAÇÕES

Seguindo o método e as tabelas utilizadas por Araújo (2003, p. 285-290), adotam-se as reproduções de tabelas de Kalmanok¹ (1961 apud ARAÚJO, 2003). Contudo, para adaptar as recomendações da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 25), o valor do coeficiente de Poisson que originalmente é adotado como igual a zero, adapta-se para o valor de 0,2. Outra alteração que difere das tabelas originais torna as reações de apoio uniformemente distribuídas ao longo do apoio correspondente.

As tabelas utilizadas no estudo correspondem a lajes retangulares, apoiadas ao longo de todo contorno em diferentes configurações (bordo engastado ou livre), submetidas a uma carga p uniformemente distribuída. Conforme descreve Araújo (2003, p. 282), as tabelas fornecem coeficientes que permitem calcular a flecha no centro da laje, os momentos fletores positivos nos vãos, os momentos negativos nos bordos engastados e as reações de apoio. A relação entre os lados da laje é um parâmetro de entrada na tabela (l_x/l_y ou l_y/l_x), onde a maior dimensão é colocada no denominador. Os quadros 8 e 9 detalham os parâmetros de entrada nas tabelas e os coeficientes relacionados.

Quadro 8 – Coeficientes para laje retangular simplesmente apoiada em seu contorno com carga uniformemente distribuída

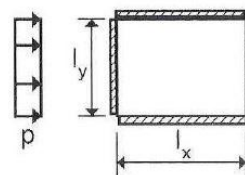


l_x/l_y	w_c	m_x	m_y	m_{xy}	r_x	r_y
0,50	10,13	100,0	36,7	52,8	269	366
0,55	9,38	93,4	38,8	51,8	268	353
0,60	8,65	86,9	40,7	50,6	267	340
0,65	7,94	80,5	42,3	49,4	266	326
0,70	7,26	74,3	43,5	47,9	265	315
0,75	6,62	68,3	44,2	46,3	263	303
0,80	6,03	62,7	44,6	44,6	261	291
0,85	5,48	57,6	44,9	42,8	259	281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

(fonte: adaptado de ARAÚJO, 2003, p. 285)

¹ KALMANOK, A. S. **Manual para Cálculo de Placas**. Montevideo: Interciência, 1961.

Quadro 9 – Coeficientes para laje engastada em seu contorno com carga uniformemente distribuída



l_y/l_x	w_c	m_{xe}	m_{ye}	m_x	m_y	r_x	r_y
1,00	1,27	-51,1	-51,1	21,1	21,1	250	250
0,95	1,42	-52,7	-54,3	21,3	23,3	262	251
0,90	1,56	-54,0	-58,0	21,1	25,5	275	251
0,85	1,70	-55,0	-62,0	20,5	27,7	286	251
0,80	1,84	-55,8	-66,1	19,7	30,0	299	251
0,75	1,97	-56,4	-69,8	18,8	32,3	313	250
0,70	2,09	-56,8	-73,1	17,8	34,5	326	249
0,65	2,22	-56,5	-75,9	16,5	36,5	339	247
0,60	2,35	-56,2	-78,4	14,9	38,2	353	244
0,55	2,45	-56,1	-80,6	13,2	39,6	367	242
0,50	2,51	-56,0	-82,6	11,8	40,9	380	241

(fonte: adaptado de ARAÚJO, 2003, p. 290)

Estes coeficientes obtidos através das tabelas devem posteriormente ser aplicados às fórmulas 1 a 7:

$$W_c = 0,001w_c \frac{pl_y^4}{D} \quad (\text{fórmula 1})$$

$$M_x = 0,001m_x pl_y^2; M_y = 0,001m_y pl_y^2 \quad (\text{fórmula 2})$$

$$M_{xe} = 0,001m_{xe} pl_y^2; M_{ye} = 0,001m_{ye} pl_y^2 \quad (\text{fórmula 3})$$

$$R_x = 0,001r_x pl_y; R_y = 0,001r_y pl_y \quad (\text{fórmula 4})$$

$$R_{xe} = 0,001r_{xe}pl_y ; R_{ye} = 0,001r_{ye}pl_y \quad (\text{fórmula 5})$$

$$M_{xy} = 0,001m_{xy} pl_y \quad (\text{fórmula 6})$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (\text{fórmula 7})$$

Onde:

W_c = flecha no centro da laje (m);

M_x, M_y = momentos positivos no centro da laje nas direções l_x e l_y , respectivamente (N.m);

M_{xe}, M_{ye} = momentos negativos nos engastes nas direções dos vãos l_x e l_y , respectivamente (N.m);

M_{xy} = momento torçor nos cantos simplesmente apoiados (N.m);

R_x = reação de apoio por unidade de comprimento no lado l_x , quando este lado for um apoio simples (N/m);

R_{xe} = reação de apoio por unidade de comprimento no lado l_x , quando este lado for um engaste (N/m);

R_{ye} = reação de apoio por unidade de comprimento no lado l_y quando este lado for um engaste (N/m);

R_y = reação de apoio por unidade de comprimento no lado l_y , quando este lado for um engaste (N/m);

D = rigidez à flexão da placa (N.m);

E = módulo de elasticidade longitudinal (N/m²);

l_y = comprimento da menor dimensão entre apoios (m);

h = espessura da laje (m);

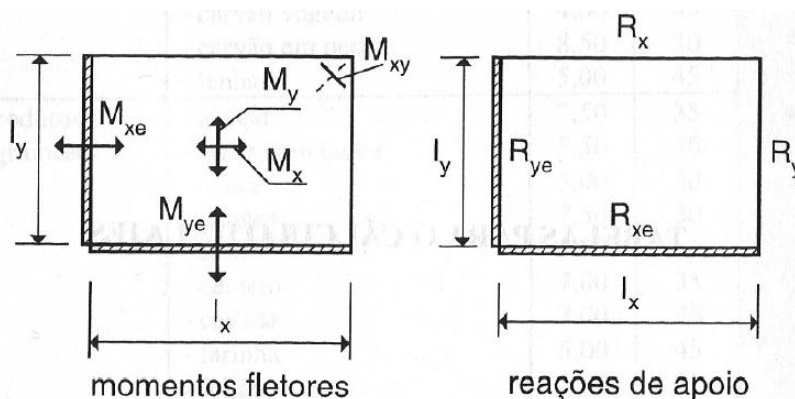
ν = coeficiente de Poisson (adimensional);

p = carga uniformemente distribuída (N/m²);

$w_c, m_x, m_{xe}, m_y, m_{ye}, r_x, r_{xe}, r_y, r_{ye}$ = coeficientes retirados das tabelas de lajes (adimensionais).

Na figura 7 são indicadas as grandezas obtidas através dos cálculos. Observa-se que quando não houver necessidade de distinguir R_x e R_{xe} , as duas reações são denotadas por R_x . O mesmo é válido para R_y e R_{ye} .

Figura 7 – Momentos e reações de apoios



(fonte: ARAÚJO, 2003, p. 282)

Após a determinação das solicitações sobre as lajes maciças, o próximo passo é utilizar os valores de momentos fletores positivos e negativos na verificação da área de aço necessária para a armadura. Este valor é aplicável posteriormente para o cálculo do consumo de aço e determinações de custos por fim.

6 DETERMINAÇÃO DE ESPESSURA E CONSUMO DE MATERIAIS

O procedimento de quantificação de custos para as lajes maciças e alveolares é feito de forma independente, visto o diferencial dos modelos no modo de aquisição e execução, a fim de obter resultados confiáveis e próximos aos praticados no mercado da construção. O início do processo de cálculo requer a determinação prévia de características de projeto, sendo estas necessárias e utilizadas ao longo do dimensionamento dos elementos estruturais. Para as lajes alveolares, no entanto, esta mesma avaliação não se torna prática, considerando que o produto em questão é industrializado e carrega consigo custos relativos à estrutura física da fábrica, além de impostos sobre produtos de tal origem. Neste caso, adotam-se modelos de lajes determinados pelos fabricantes de forma a atender as especificações de projeto.

Os capítulos a seguir, divididos por cada modelo de laje comparado, detalham o processo de obtenção das dimensões mínimas necessárias para atendimento das solicitações.

6.1 LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO

A partir das informações descritas nos capítulos 4.2 e 5 deste trabalho, inicia-se a etapa de determinação dos parâmetros de projeto, posteriormente utilizados no cálculo das espessuras de lajes maciças. Este capítulo descreve, portanto, quais foram estes parâmetros determinados e de que forma são utilizados no processo de cálculo. Por fim, através dos métodos de cálculo, são determinados todos os valores de espessura e quantitativo de materiais para todas as combinações dimensionais de lajes maciças, conforme condições de contorno.

6.1.1 Procedimento de Cálculo de Espessuras

Os critérios tomados para a realização do cálculo das espessuras das lajes maciças para este projeto consideram:

- a) classe de agressividade ambiental II, com cobrimento igual a 25 mm;
- b) sobrecarga de 2,0 kN/m², característica à edificação destinada a escritórios;
- c) acréscimo de 1,0 kN/m², relativo ao revestimento aplicado à laje;
- d) concreto C25

- e) aço CA-50;
- f) deformação limite (flecha máxima) de 25 mm e $\ell/250$, considerando que haverá somente divisórias leves instaladas sobre a laje;
- g) coeficiente de Poisson igual a 0,2;
- h) coeficiente de ponderação para estado-limite de serviço $\gamma_f = \psi_2 = 0,4$.

Para a análise, são avaliadas duas condições de contorno para as lajes maciças de concreto armado moldadas *in loco*. A primeira hipótese considera a laje apoiada em seus quatro lados e a segunda, considera a laje engastada nestes mesmos lados. O modelo de laje bidirecional avaliado, em comparação ao modelo unidirecional, oferece resultados melhores do ponto de vista econômico, exigindo menores espessuras e área de aço. As combinações de geometria das peças consideram vãos que variam de 2 até 12 metros de comprimento e larguras que tornam necessário o dimensionamento da armadura em duas direções, obedecendo ao critério de que a dimensão maior da peça, neste estudo definida como ℓ_y , não ultrapasse mais do que duas vezes o tamanho do menor lado, ℓ_x .

Para o caso das lajes maciças, a determinação de ℓ_x ou ℓ_y como o vão entre apoio avaliado, não apresenta variação no resultado, sendo utilizado no dimensionamento estrutural o menor dos lados da laje.

Estabelecidos os critérios, submete-se a laje à carga de serviço, correspondente a combinação quase permanente. O cálculo inicia com a verificação da espessura da laje aos parâmetros determinados de deformação limite. A flecha de curta e de longa duração é avaliada de forma que os valores correspondentes não superem o limite máximo, definido nos tópicos citados anteriormente.

De posse das espessuras mínimas, prossegue-se para o cálculo das solicitações pela Teoria da Flexão das Placas, descrito no capítulo 5.2. As solicitações necessárias para o estabelecimento das dimensões mínimas da laje correspondem aos momentos envolvidos para as duas hipóteses de contorno. Para o caso da laje apoiada, são utilizados os momentos centrais da peça (M_x e M_y). Na laje engastada, além dos momentos centrais, são calculados os momentos negativos (M_{xe} , M_{ye}), situados nas bordas engastadas.

O posicionamento da linha neutra, a partir dos valores de momento e das espessuras, é calculado através da fórmula 8. Os valores resultantes são comparados com os limites dos

domínios 2 e 3, calculados nas fórmulas 9 e 10, respectivamente. Com a definição da posição da linha, são calculadas no capítulo seguinte as áreas de aço necessárias à laje.

$$x = 1,25 \cdot d \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{Md}{0,425 \cdot d^2 \cdot f_{cd} \cdot b_w}} \right] \quad (\text{fórmula 8})$$

$$x_{23} = 0,259 \cdot d \quad (\text{fórmula 9})$$

$$x_{dutil} = 0,45 \cdot d \quad (\text{fórmula 10})$$

6.1.2 Cálculo do Consumo de Materiais

Os valores encontrados de posição de linha neutra, para cada uma das combinações geométricas de lajes, são utilizados diretamente para o cálculo da área de aço (fórmula 11), necessária para atender a resistência aos momentos fletores aplicados.

$$A_s = \frac{0,68 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot x}{f_{yd}} \quad (\text{fórmula 11})$$

A área de aço encontrada deve respeitar a taxa mínima correspondente a 0,15% da secção transversal da peça e a taxa máxima de armadura igual a 4%. Os espaçamentos entre as barras de armadura apresentam valores de no máximo o dobro da espessura da laje ou 20 cm, prevalecendo o menor desses dois valores. O comprimento das armaduras positivas abrange a dimensão total de ℓ_x ou ℓ_y , prolongadas de 4 cm para cada lado, além do eixo teórico de apoio. O comprimento das armaduras negativas corresponde à 1/4 do menor vão da laje, neste estudo determinado pelo ℓ_x . Os valores de aço calculados para cada combinação de laje e condição

de contorno estão descritos nos quadros 10 e 11, juntamente ao volume de concreto e área de forma utilizada, calculados através dos valores dimensionais das peças. Observa-se que a forma considera a soma das áreas correspondentes à base da laje e a área das faces laterais.

6.1.2.1 LAJES MACIÇAS APOIADAS

Esta condição de contorno considera a laje simplesmente apoiada em seus quatro lados e gera solicitações de momentos fletores positivos, com valores máximos localizados no centro de cada eixo considerado. As armaduras, portanto, são dimensionadas para resistir a estes esforços. Os momentos nos bordos são nulos. O quadro 10 discrimina estes valores para todas as combinações analisadas.

Quadro 10 – Consumo de materiais para laje maciça apoiada

LAJES RETANGULARES E QUADRADAS MACIÇAS - APOIADAS									
ly (m)	lx (m)	h(cm)	Asx(cm ² /m)	Aço x (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y (vão)	Concreto (m ³)	Aço total (kg)	Forma (m ²)
2	2	8	0,58	Ø 6,3 c/16	0,58	Ø 6,3 c/ 16	0,32	12,74	4,64
3	2	8	1,04	Ø 6,3 c/16	0,62	Ø 6,3 c/ 16	0,48	15,93	6,80
3	3	8	1,33	Ø 6,3 c/16	1,33	Ø 6,3 c/ 16	0,72	27,93	9,96
4	2	8	1,34	Ø 6,3 c/16	0,53	Ø 6,3 c/ 16	0,64	19,11	8,96
4	3	8	2,11	Ø 6,3 c/14	1,49	Ø 6,3 c/ 16	0,96	34,79	13,12
4	4	8	2,45	Ø 6,3 c/12	2,45	Ø 6,3 c/ 12	1,28	66,64	17,28
5	3	8	2,73	Ø 6,3 c/11	1,37	Ø 6,3 c/ 16	1,20	43,86	16,28
5	4	8	3,60	Ø 8,0 c/13	2,80	Ø 6,3 c/ 11	1,60	94,43	21,44
5	5	9	3,39	Ø 8,0 c/14	3,39	Ø 8,0 c/ 14	2,25	142,56	26,80
6	3	8	3,19	Ø 8,0 c/15	1,23	Ø 6,3 c/ 16	1,44	51,69	19,44
6	4	9	3,90	Ø 8,0 c/12	2,23	Ø 6,3 c/ 14	2,16	88,57	25,80
6	5	10	4,09	Ø 8,0 c/12	3,29	Ø 8,0 c/ 15	3,00	163,94	32,20
6	6	11	3,96	Ø 8,0 c/12	3,96	Ø 8,0 c/ 12	3,96	237,60	38,64
7	4	10	3,99	Ø 8,0 c/12	1,80	Ø 6,3 c/ 17	2,80	95,02	30,20
7	5	11	4,57	Ø 8,0 c/11	2,85	Ø 6,3 c/ 10	3,85	176,83	37,64
7	6	12	4,76	Ø 8,0 c/10	3,94	Ø 8,0 c/ 12	5,04	281,16	45,12
7	7	14	4,37	Ø 8,0 c/11	4,37	Ø 8,0 c/ 11	6,86	354,82	52,92
8	4	11	3,99	Ø 8,0 c/12	1,49	Ø 6,3 c/ 20	3,52	93,06	34,64
8	5	12	4,87	Ø 8,0 c/10	2,46	Ø 6,3 c/ 12	4,80	181,32	43,12
8	6	13	5,36	Ø 10,0 c/ 14	3,56	Ø 8,0 c/ 14	6,24	295,41	51,64
8	7	15	5,22	Ø 10,0 c/ 15	4,40	Ø 8,0 c/ 11	8,40	405,75	60,50
8	8	17	4,97	Ø 8,0 c/10	4,97	Ø 8,0 c/ 10	10,88	506,88	69,44

Continua

continuação

ly (m)	lx (m)	h(cm)	Asx(cm ² /m)	Aço x (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y (vão)	Concreto (m ³)	Aço total (kg)	Forma (m ²)
9	5	12	5,45	Ø 10,0 c/ 14	2,31	Ø 6,3 c/ 13	5,40	197,06	48,36
9	6	14	5,81	Ø 10,0 c/ 13	3,20	Ø 8,0 c/ 15	7,56	316,55	58,20
9	7	16	5,93	Ø 10,0 c/ 13	4,12	Ø 8,0 c/ 12	10,08	443,50	68,12
9	8	19	5,66	Ø 10,0 c/ 13	4,85	Ø 8,0 c/ 10	13,68	591,15	78,46
9	9	21	5,53	Ø 10,0 c/ 14	5,53	Ø 10,0 c/ 14	17,01	721,89	88,56
10	5	13	5,46	Ø 10,0 c/ 14	2,00	Ø 6,3 c/ 15	6,50	194,36	53,90
10	6	15	6,11	Ø 10,0 c/ 12	2,87	Ø 6,3 c/ 10	9,00	332,10	64,80
10	7	17	6,50	Ø 10,0 c/ 12	3,84	Ø 8,0 c/ 13	11,90	468,66	75,78
10	8	20	6,43	Ø 10,0 c/ 12	4,64	Ø 8,0 c/ 10	16,00	647,51	87,20
10	9	23	6,31	Ø 10,0 c/ 12	5,49	Ø 10,0 c/ 14	20,70	817,53	98,74
10	10	25	6,24	Ø 10,0 c/ 12	6,24	Ø 10,0 c/ 12	25,00	1036,56	110,00
11	6	15	6,66	Ø 10,0 c/ 11	2,72	Ø 6,3 c/ 11	9,90	351,84	71,10
11	7	18	6,95	Ø 10,0 c/ 11	3,54	Ø 8,0 c/ 14	13,86	494,22	83,48
11	8	21	7,11	Ø 10,0 c/ 11	4,42	Ø 8,0 c/ 11	18,48	678,32	95,98
11	9	24	7,15	Ø 10,0 c/ 11	5,32	Ø 10,0 c/ 14	23,76	896,50	108,60
11	10	27	7,10	Ø 10,0 c/ 11	6,24	Ø 10,0 c/ 12	29,70	1131,58	121,34
11	11	30	6,95	Ø 10,0 c/ 11	6,95	Ø 10,0 c/ 11	36,30	1357,40	134,20
12	6	16	6,74	Ø 10,0 c/ 11	2,45	Ø 6,3 c/ 12	11,52	350,61	77,76
12	7	19	7,28	Ø 10,0 c/ 10	3,26	Ø 8,0 c/ 15	15,96	525,67	91,22
12	8	22	7,67	Ø 10,0 c/ 10	4,18	Ø 8,0 c/ 12	21,12	713,26	104,80
12	9	26	7,73	Ø 10,0 c/ 10	5,03	Ø 8,0 c/ 10	28,08	927,45	118,92
12	10	29	7,87	Ø 12,5 c/ 15	6,00	Ø 10,0 c/ 13	34,80	1215,32	132,76
12	11	32	7,89	Ø 12,5 c/ 16	7,00	Ø 10,0 c/ 11	42,24	1471,32	146,72
12	12	35	7,80	Ø 10,0 c/ 10	7,80	Ø 12,5 c/ 15	50,40	1812,96	160,80

(fonte: elaborado pelo autor)

6.1.2.2 LAJES MACIÇAS ENGASTADAS

Esta condição de contorno considera a laje engastada em seus quatro lados e gera solicitações de momentos fletores positivos, com valores máximos localizados no centro de cada eixo considerado e momentos fletores negativos, com valor máximo localizado nos bordos da laje. As armaduras são dimensionadas para resistir a estes esforços. O quadro 11 discrimina estes valores para todas as combinações analisadas.

Quadro 11 – Consumo de materiais para laje maciça engastada

LAJES RETANGULARES E QUADRADAS MACIÇAS - ENGASTADAS													
ly (m)	lx (m)	h(cm)	Asx (cm ² /m)	Aço x (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y (vão)	Asx' (cm ² /m)	Aço x (eng)	Asy' (cm ² /m)	Aço y (eng)	Concreto (m ³)	Aço Total (kg)	Forma (m ²)
2	2	8	0,27	Ø 6,3 c/16	0,27	Ø 6,3 c/16	0,56	Ø 6,3 c/16	0,56	Ø 6,3 c/16	0,32	25,50	4,64
3	2	8	0,47	Ø 6,3 c/16	0,24	Ø 6,3 c/16	0,82	Ø 6,3 c/16	0,62	Ø 6,3 c/16	0,48	40,67	6,80
3	3	8	0,62	Ø 6,3 c/16	0,62	Ø 6,3 c/16	1,27	Ø 6,3 c/16	1,27	Ø 6,3 c/16	0,72	55,86	9,96
4	2	8	0,53	Ø 6,3 c/16	0,17	Ø 6,3 c/16	0,91	Ø 6,3 c/16	0,61	Ø 6,3 c/16	0,64	61,74	8,96
4	3	8	0,96	Ø 6,3 c/16	0,62	Ø 6,3 c/16	1,76	Ø 6,3 c/16	1,41	Ø 6,3 c/16	0,96	76,93	13,12
4	4	8	1,12	Ø 6,3 c/16	1,12	Ø 6,3 c/16	2,32	Ø 6,3 c/13	2,32	Ø 6,3 c/13	1,28	109,76	17,28
5	3	9	0,99	Ø 6,3 c/18	0,42	Ø 6,3 c/18	1,77	Ø 6,3 c/17	1,25	Ø 6,3 c/18	1,20	94,33	16,44
5	4	8	1,62	Ø 6,3 c/16	1,17	Ø 6,3 c/16	3,06	Ø 6,3 c/10	2,55	Ø 6,3 c/12	1,60	154,35	21,44
5	5	8	1,79	Ø 6,3 c/16	1,79	Ø 6,3 c/17	3,77	Ø 8,0 c/13	3,77	Ø 8,0 c/13	2,25	230,39	26,60
6	3	12	0,80	Ø 6,3 c/20	0,24	Ø 6,3 c/20	1,47	Ø 6,3 c/20	0,99	Ø 6,3 c/20	1,44	110,25	20,16
6	4	10	1,50	Ø 6,3 c/20	0,75	Ø 6,3 c/20	2,80	Ø 6,3 c/11	2,08	Ø 6,3 c/14	2,16	163,17	26,00
6	5	8	2,47	Ø 6,3 c/12	1,60	Ø 6,3 c/16	4,80	Ø 8,0 c/10	4,11	Ø 8,0 c/12	3,00	325,11	31,76
6	6	9	2,26	Ø 6,3 c/13	2,26	Ø 6,3 c/13	4,94	Ø 8,0 c/10	4,94	Ø 8,0 c/10	3,96	423,30	38,16
7	4	13	1,28	Ø 6,3 c/14	0,48	Ø 6,3 c/14	2,41	Ø 6,3 c/12	1,68	Ø 6,3 c/18	2,80	188,65	30,86
7	5	11	2,03	Ø 6,3 c/15	1,14	Ø 6,3 c/20	3,96	Ø 8,0 c/12	3,06	Ø 6,3 c/10	3,85	304,89	37,64
7	6	10	2,64	Ø 6,3 c/11	2,12	Ø 6,3 c/14	5,42	Ø 10 c/14	4,78	Ø 8,0 c/10	5,04	519,83	44,60
7	7	11	2,51	Ø 6,3 c/12	2,51	Ø 6,3 c/12	5,66	Ø 10 c/13	5,66	Ø 10 c/13	6,86	668,82	52,08
8	4	17	1,10	Ø 6,3 c/20	0,33	Ø 6,3 c/20	2,10	Ø 6,3 c/14	1,41	Ø 6,3 c/20	3,52	204,82	36,08
8	5	15	1,73	Ø 6,3 c/18	0,75	Ø 6,3 c/20	3,35	Ø 8,0 c/15	2,42	Ø 6,3 c/12	4,80	311,34	43,90
8	6	13	2,42	Ø 6,3 c/12	1,47	Ø 6,3 c/20	4,91	Ø 8,0 c/10	3,91	Ø 8,0 c/12	6,24	506,72	51,64
8	7	12	2,94	Ø 6,3 c/10	2,41	Ø 6,3 c/12	6,24	Ø 10 c/12	5,61	Ø 10 c/13	8,40	812,22	59,60
8	8	12	3,05	Ø 6,3 c/10	3,05	Ø 6,3 c/10	7,03	Ø 10 c/11	7,03	Ø 10 c/11	10,88	1034,26	67,84

continua

continuação

ly (m)	lx (m)	h(cm)	Asx (cm ² /m)	Aço x (vão)	Asy (cm ² /m)	Aço y (vão)	Asx' (cm ² /m)	Aço x (eng)	Asy' (cm ² /m)	Aço y (eng)	Concreto (m ³)	Aço Total (kg)	Forma (m ²)
9	5	18	1,61	Ø 6,3 c/19	0,56	Ø 6,3 c/20	3,12	Ø 8,0 c/16	2,16	Ø 6,3 c/14	5,40	338,99	50,04
9	6	16	2,29	Ø 6,3 c/13	1,11	Ø 6,3 c/20	4,56	Ø 8,0 c/11	3,40	Ø 8,0 c/14	7,56	530,66	58,80
9	7	15	2,85	Ø 6,3 c/10	1,83	Ø 6,3 c/17	5,94	Ø 10 c/13	4,85	Ø 8,0 c/10	10,08	790,90	67,80
9	8	14	3,31	Ø 8,0 c/15	2,78	Ø 6,3 c/11	7,19	Ø 10 c/10	6,57	Ø 10 c/11	13,68	1202,11	76,76
9	9	14	3,40	Ø 8,0 c/14	3,40	Ø 8,0 c/14	7,98	Ø 12,5 c/15	7,98	Ø 12,5 c/15	17,01	1503,36	86,04
10	5	23	1,46	Ø 6,3 c/20	0,43	Ø 6,3 c/20	2,82	Ø 6,3 c/11	1,90	Ø 6,3 c/16	6,50	363,83	56,90
10	6	20	2,12	Ø 6,3 c/14	0,84	Ø 6,3 c/20	4,18	Ø 8,0 c/12	2,97	Ø 6,3 c/10	9,00	549,51	66,40
10	7	19	2,70	Ø 6,3 c/11	1,42	Ø 6,3 c/20	5,51	Ø 10 c/14	4,24	Ø 8,0 c/11	11,90	808,57	76,46
10	8	18	3,19	Ø 8,0 c/15	2,15	Ø 6,3 c/14	6,80	Ø 10 c/11	5,68	Ø 10 c/13	16,00	1182,89	86,48
10	9	16	3,73	Ø 8,0 c/13	3,20	Ø 8,0 c/15	8,26	Ø 12,5 c/14	7,64	Ø 10 c/10	20,70	1695,16	96,08
10	10	16	3,82	Ø 8,0 c/13	3,82	Ø 8,0 c/13	9,07	Ø 12,5 c/13	9,07	Ø 12,5 c/13	25,00	2092,86	106,40
11	6	24	2,00	Ø 6,3 c/15	0,67	Ø 6,3 c/20	3,93	Ø 8,0 c/12	2,71	Ø 6,3 c/11	9,90	595,33	74,16
11	7	23	2,60	Ø 6,3 c/11	1,15	Ø 6,3 c/20	5,22	Ø 10 c/15	3,81	Ø 8,0 c/13	13,86	831,24	85,28
11	8	22	3,14	Ø 8,0 c/15	1,76	Ø 6,3 c/17	6,55	Ø 10 c/11	5,15	Ø 10 c/15	18,48	1208,81	96,36
11	9	21	3,59	Ø 8,0 c/13	2,51	Ø 6,3 c/12	7,77	Ø 10 c/10	6,62	Ø 10 c/11	23,76	1675,89	107,40
11	10	19	4,06	Ø 8,0 c/12	3,52	Ø 8,0 c/14	9,12	Ø 12,5 c/13	8,50	Ø 12,5 c/14	29,70	2255,12	117,98
11	11	18	4,29	Ø 8,0 c/11	4,29	Ø 8,0 c/11	10,28	Ø 12,5 c/11	10,28	Ø 12,5 c/11	36,30	2989,80	128,92
12	6	29	1,89	Ø 6,3 c/16	0,55	Ø 6,3 c/20	3,71	Ø 8,0 c/13	2,50	Ø 6,3 c/12	11,52	637,93	82,44
12	7	25	2,61	Ø 6,3 c/11	0,98	Ø 6,3 c/20	5,19	Ø 10 c/15	3,65	Ø 8,0 c/13	15,96	931,09	93,50
12	8	26	3,11	Ø 6,3 c/10	1,49	Ø 6,3 c/20	6,36	Ø 10 c/12	4,75	Ø 8,0 c/10	21,12	1234,15	106,40
12	9	25	3,63	Ø 8,0 c/13	2,14	Ø 6,3 c/14	7,69	Ø 10 c/10	6,15	Ø 10 c/12	28,08	1742,49	118,50
12	10	24	4,04	Ø 8,0 c/12	2,92	Ø 6,3 c/10	8,86	Ø 12,5 c/13	7,66	Ø 10 c/10	34,80	2315,43	130,56
12	11	22	4,47	Ø 8,0 c/11	3,91	Ø 8,0 c/12	10,14	Ø 12,5 c/12	9,52	Ø 12,5 c/12	42,24	3040,96	142,12
12	12	21	4,66	Ø 8,0 c/10	4,66	Ø 8,0 c/10	11,24	Ø 12,5 c/10	11,24	Ø 12,5 c/10	50,40	3913,92	154,08

(fonte: elaborado pelo autor)

6.2 LAJES ALVEOLARES PROTENDIDAS

Neste capítulo, primeiramente, são definidas todas as exigências de projeto e informações essenciais a serem concedidas ao fabricante para atendimento das necessidades de projeto e fornecimento correto das lajes alveolares. De posse destas configurações, tal qual informada pelo fabricante, os valores são tabelados e avaliados.

6.2.1 Considerações de Projeto

Os critérios definidos para solicitação de laje alveolar ao fabricante são:

- a) sobrecarga de 2,0 kN/m², característica à edificação destinada a escritórios;
- b) acréscimo de 1,0 kN/m², relativo ao revestimento aplicado à laje;
- c) capeamento das lajes alveolares de espessura equivalente a 5 cm.

Considera-se também que sobre a laje alveolar, do mesmo modo que a laje maciça, não se construa nenhum tipo de parede de alvenaria, utilizando-se exclusivamente de divisórias leves. Exigências de deformações máximas devem ser atendidas pelo fabricante, conforme previsto na NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). Ainda, segundo a fabricante de lajes alveolares, as peças fornecidas seguem modulação específica referente à sua largura. Este valor corresponde a 1,25 metros, que pode ser reduzido através de corte da peça.

A disposição utilizada para as peças alveolares na composição da área total de laje, através da repetição de peças lado a lado, difere da utilizada nas lajes maciças. Para esta situação, é sempre considerado o vão entre apoios o menor valor entre l_x e l_y . Esta combinação apresenta melhor aproveitamento da peça e consequente redução no valor final da laje.

6.2.2 Verificação de Espessuras

Conforme fornecido pelo fabricante, os modelos das lajes que atendem aos parâmetros de projeto, citados no capítulo anterior, possuem espessuras conforme o quadro 12.

Quadro 12 – Espessura de lajes alveolares por vão entre apoios

Vão (m)	Espessura (cm)	Modelo
2	16	LP16
3	16	LP16
4	16	LP16
5	16	LP16
6	16	LP16
7	16	LP16
8	16	LP16
9	21	LP21
10	21	LP21
11	21	LP21
12	21	LP21

(fonte: elaborado pelo autor)

7 CUSTOS DE EXECUÇÃO

Neste capítulo, são definidos quais os custos considerados para cada tipo de laje comparada e de que forma estão relacionados. Também são informados quais foram os índices utilizados de custo unitário, baseados em valores médios praticados no setor da construção civil no estado do Rio Grande do Sul e utilizados por empresas na elaboração de orçamentos.

7.1 REFERENCIAIS E CONSIDERAÇÕES EM CUSTOS

Cada modelo de laje será analisado de maneira diferente em relação aos seus custos. Na situação de laje maciça, os valores dos materiais utilizados são facilmente obtidos utilizando cotações médias, obtidas junto às empresas fornecedoras e orçamentistas. Dentro destes valores pressupõe-se que o custo do frete já esteja embutido, juntamente aos impostos. É importante observar que os referenciais de custos unitários utilizados correspondem aos obtidos no período de realização do estudo e podem, portanto ser reajustados posteriormente com resultados adaptados conforme as variações que porventura ocorram no mercado. Para o caso do cálculo de mão de obra, pode-se apresentar uma maior variabilidade no valor utilizado, atribuída a fatores como região, grau de especialização da equipe, número de trabalhadores, etc. Utiliza-se neste estudo, valores adotados por empresas atuantes no setor de orçamentação e construção. Encargos sociais e demais custos indiretos estão considerados no valor utilizado.

Os referenciais unitários utilizados no cálculo das lajes maciças de concreto armado podem ser vistos no quadro 13 e 14.

Quadro 13 – Custos unitários de material para lajes maciças de concreto armado

Material	Unidade	Custo (R\$/unidade)
Concreto C25 - bombeado	m ³	R\$ 300,00
Aço CA-50	kg	R\$ 3,45
Forma de madeira compensada plastificada resinada 12mm	m ²	R\$ 21,79

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 14 – Custos unitários de mão de obra para lajes maciças de concreto armado

Mão de Obra	Unidade	Custo (R\$/unidade)
Execução de estrutura em concreto armado	m ³	R\$ 530,00

(fonte: elaborado pelo autor)

Tratando-se de lajes alveolares protendidas e por este ser um produto industrializado, o custo do fornecimento, utilizado no cálculo, é determinado diretamente pelo fabricante. São acrescidos a este valor, o transporte das peças, equipamentos para a montagem no local e equipe de montadores. Tais valores seguem a índices informados pela empresa fornecedora das peças e também obtidos junto à empresa de orçamentação. Observa-se que a variância nestes índices pode ser grande conforme a distância da obra ao fornecedor ou conforme as proporções do projeto. Neste estudo, considera-se a execução da estrutura na cidade de Porto Alegre e soma-se ao custo um acréscimo de 10% do valor de fornecimento da peça.

No quadro 15, constam os valores de fornecimento de laje alveolar informados pelo fabricante, com capeamento de 5 cm incluso no valor.

Quadro 15 – Custo por metro quadrado para lajes alveolares

Modelo	Espessura (cm)	R\$/m ²
LP16	16	R\$ 110,00
LP16	16	R\$ 110,00
LP16	16	R\$ 110,00
LP16	16	R\$ 110,00
LP16	16	R\$ 110,00
LP16	16	R\$ 110,00
LP16	16	R\$ 110,00
LP21	21	R\$ 140,00
LP21	21	R\$ 140,00
LP21	21	R\$ 140,00
LP21	21	R\$ 140,00

(fonte: elaborado pelo autor)

Considerando que são adquiridas placas de padrão modular, os valores no quadro 16 representam o custo por peça, incrementado na última coluna do valor de frete.

Quadro 16 – Custo por peça com frete incluso para lajes alveolares

Vão (m)	Largura (m)	R\$/peça	R\$/peça - Incluso frete
2	1,25	R\$ 275,00	R\$ 302,50
3	1,25	R\$ 412,50	R\$ 453,75
4	1,25	R\$ 550,00	R\$ 605,00
5	1,25	R\$ 687,50	R\$ 756,25
6	1,25	R\$ 825,00	R\$ 907,50
7	1,25	R\$ 962,50	R\$ 1.058,75
8	1,25	R\$ 1.100,00	R\$ 1.210,00
9	1,25	R\$ 1.575,00	R\$ 1.732,50
10	1,25	R\$ 1.750,00	R\$ 1.925,00
11	1,25	R\$ 1.925,00	R\$ 2.117,50
12	1,25	R\$ 2.100,00	R\$ 2.310,00

(fonte: elaborado pelo autor)

Para a montagem da estrutura é adotado um valor médio, descrito no quadro 17, que considera o custo dos equipamentos envolvidos na elevação das peças e equipe treinada de montadores. Neste processo, segundo o fabricante, pode-se atingir um rendimento diário de 400 m² de laje executada.

Quadro 17 – Custo com equipamentos e equipe de montagem

Custo (R\$)	Rendimento (m ²)	R\$/m ²
R\$ 4.000,00	400	R\$ 10,00

(fonte: elaborado pelo autor)

7.2 DETERMINAÇÃO DE CUSTOS

Feitas as considerações de custos envolvidos, seguido da multiplicação dos quantitativos aos índices estabelecidos anteriormente, tem-se por fim, representado nos quadros 18, 19, e 20, os custos médios unitários atrelados a todos os vãos.

Em relação aos quantitativos calculados no capítulo 6.1.2, observa-se que para as quantidades em kg de aço, volume de concreto e área de forma, nas lajes maciças moldadas *in loco*, é calculado e considerado o valor médio entre as combinações de largura para um mesmo vão entre apoios.

Quadro 18 – Custo total por metro quadrado para lajes maciças apoiadas

LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO - APOIADAS										
Vão (m)	Aço (kg)	Forma (m ²)	Concreto (m ³)	Custo Aço (R\$)	Custo Forma (R\$)	Custo de Concreto (R\$)	Custo de Material (R\$)	Custo de Mão de Obra (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo Total (R\$/m ²)
2	12,74	4,64	0,32	43,95	101,11	96,00	241,06	169,60	410,66	102,66
3	21,93	8,38	0,60	75,65	182,60	180,00	438,25	318,00	756,25	100,74
4	40,18	13,12	0,96	138,62	285,88	288,00	712,51	508,80	1221,31	101,19
5	93,61	21,51	1,68	322,97	468,63	505,00	1296,60	892,17	2188,77	107,97
6	135,45	29,02	2,64	467,30	632,35	792,00	1891,65	1399,20	3290,85	118,35
7	226,96	41,47	4,64	783,00	903,63	1391,25	3077,88	2457,88	5535,75	140,30
8	296,48	51,87	6,77	1022,86	1130,20	2030,40	4183,47	3587,04	7770,51	156,27
9	454,03	68,34	10,75	1566,41	1489,13	3223,80	6279,33	5695,38	11974,71	183,46
10	582,79	81,74	14,85	2010,61	1781,04	4455,00	8246,65	7870,50	16117,15	205,13
11	818,31	102,45	22,00	2823,16	2232,39	6600,00	11655,55	11660,00	23315,55	239,34
12	1002,37	119,00	29,16	3458,18	2592,95	8748,00	14799,13	15454,80	30253,93	266,26

(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 19 – Custo total por metro quadrado para lajes maciças engastadas

LAJES MACIÇAS DE CONCRETO ARMADO - ENGASTADAS										
Vão (m)	Aço (kg)	Forma (m ²)	Concreto (m ³)	Custo Aço (R\$)	Custo Forma (R\$)	Custo de Concreto (R\$)	Custo de Material (R\$)	Custo de Mão de Obra (R\$)	Custo Total (R\$)	Custo Total (R\$/m ²)
2	25,50	4,64	0,32	87,97	101,11	96,00	285,08	169,60	454,68	113,67
3	48,27	8,38	0,60	166,51	182,60	180,00	529,11	318,00	847,11	113,20
4	82,81	13,12	0,96	285,69	285,88	288,00	859,58	508,80	1368,38	114,46
5	159,69	21,49	1,65	550,92	468,34	495,00	1514,26	874,50	2388,76	119,35
6	255,46	29,02	2,55	881,33	632,35	765,00	2278,67	1351,50	3630,17	135,10
7	420,55	41,30	4,27	1450,88	899,82	1281,00	3631,70	2263,10	5894,80	152,58
8	573,87	51,81	6,42	1979,85	1128,98	1924,80	5033,64	3400,48	8434,12	176,41
9	873,20	67,89	9,52	3012,55	1479,28	2856,60	7348,43	5046,66	12395,09	196,34
10	1115,47	81,45	13,60	3848,37	1774,87	4080,00	9703,23	7208,00	16911,23	226,18
11	1592,70	101,68	19,40	5494,81	2215,68	5819,00	13529,49	10280,23	23809,72	254,49
12	1973,71	118,23	25,99	6809,30	2576,20	7796,57	17182,07	13773,94	30956,01	286,28

(fonte: elaborado pelo autor)

Utilizando o custo de cada peça de laje alveolar, acrescidos os valores de frete e montagem, podemos retirar valores de custo médio por metragem quadrada de laje conforme detalhado no quadro 20. Estes valores, como citado no caso das lajes maciças, considerando o valor médio entre as combinações de larguras para um mesmo vão entre apoios.

Quadro 20 – Custo total por metro quadrado para lajes maciças apoiadas

Vão (m)	Custo Total - R\$/m ²
2	R\$ 161,25
3	R\$ 161,25
4	R\$ 142,34
5	R\$ 140,99
6	R\$ 137,84
7	R\$ 136,04
8	R\$ 136,04
9	R\$ 170,42
10	R\$ 170,42
11	R\$ 170,42
12	R\$ 170,42

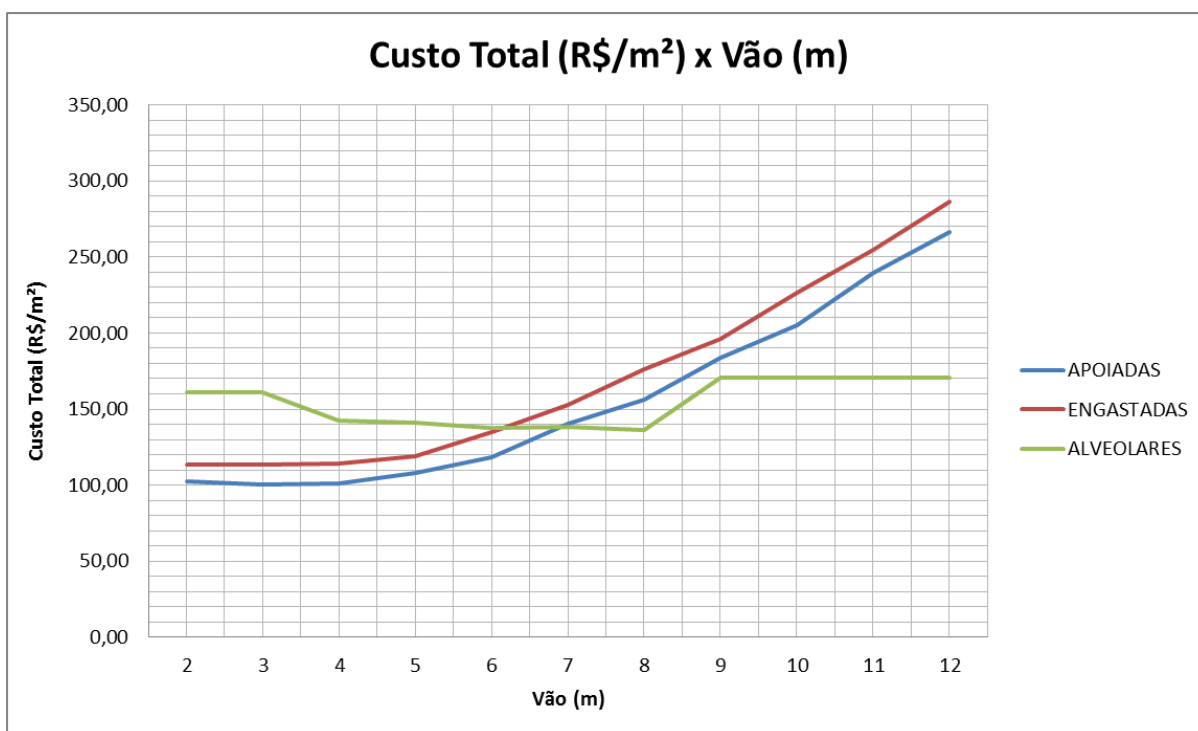
(fonte: elaborado pelo autor)

Os valores apresentados no quadro 20 diferenciam-se dos valores iniciais ao m² de laje alveolar, pois contabilizam o custo integral para peças que devem ser cortadas nos casos em que a largura não possui valor múltiplo de 1,25 metros.

8 ANÁLISE E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Combinando os dados descritos nos quadros 18, 19 e 20, das colunas correspondentes ao vão entre apoios e do custo total, gera-se o gráfico da figura 9, que combina os valores obtidos para as lajes alveolares, relacionados com os valores resultantes das lajes maciças para ambas condições de contorno analisadas.

Figura 8 – Comparativo de custo por metro quadrado e vão entre apoios para lajes maciças engastadas, apoiadas e lajes alveolares



(fonte: elaborado pelo autor)

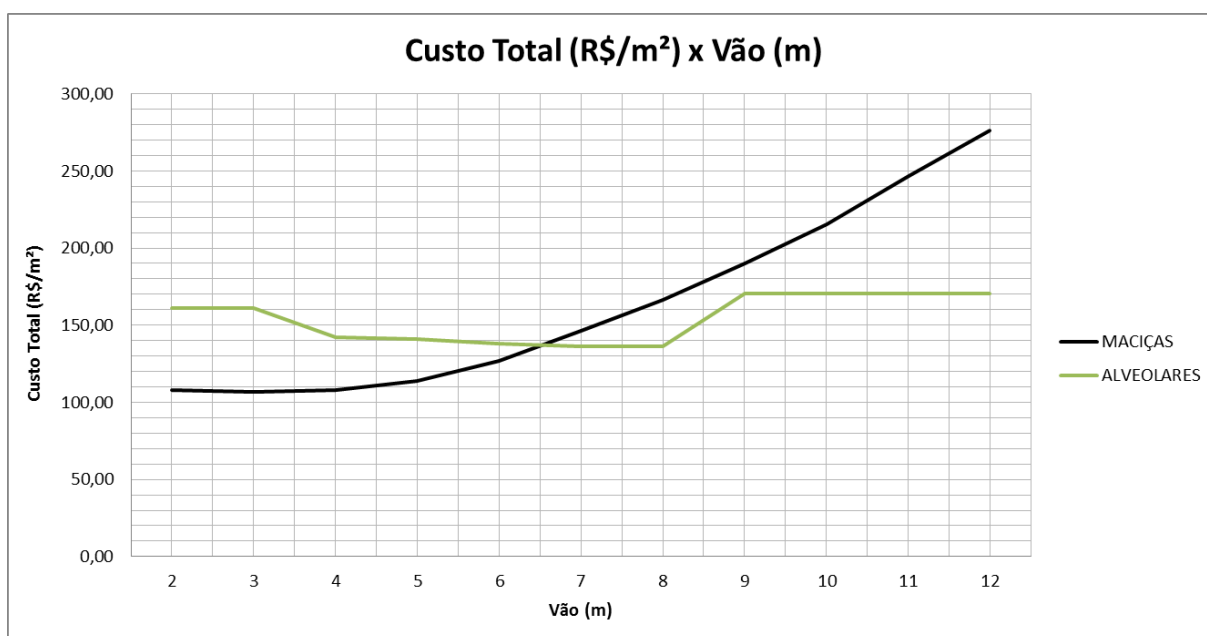
Pode-se visualizar no gráfico gerado, que existem dois pontos de interseção entre os valores obtidos. No primeiro, entre as linhas representando as lajes alveolares e lajes maciças engastadas, pode-se observar um vão entre apoios no valor de 6,2 metros. O segundo ponto de interseção relaciona lajes alveolares com lajes maciças apoiadas, com um valor de vão entre apoio correspondente a aproximadamente 6,8 metros.

A diferença observada entre o custo por metro quadrado para as diferentes condições de contorno das lajes maciças moldadas *in loco*, é justificado em função da maior quantidade de

aço dimensionado para atender as solicitações de momentos negativos nos bordos engastados, apesar dos valores reduzidos de volume de concreto e área de forma para este mesmo caso.

Em seguida, é estabelecida uma linha intermediária entre os resultados obtidos com as lajes maciças apoiadas e engastadas, como visto na figura 10.

Figura 9 – Comparativo de custo por metro quadrado e vão entre apoios para lajes maciças e lajes alveolares



(fonte: elaborado pelo autor)

Visualiza-se a partir do gráfico um ponto de interseção médio, correspondente ao valor de aproximadamente 6,5 metros, representando o limite de vão no qual a aplicação da laje alveolar protendida pré-fabricada é mais viável em relação às lajes maciças moldadas *in loco*.

Para vãos menores que 6,5 metros, as lajes maciças possuem boa redução de custo comparativamente, visto que a quantidade utilizada de aço é reduzida e as espessuras permanecem em torno de 10 cm ou menores. Nesta faixa também, os custos de fornecimento da laje alveolar superam a execução *in loco*.

Superado o valor de 6,5 metros, é observado que o peso próprio da laje maciça, elevando-se em função do aumento das espessuras, exige a utilização maior de aço a fim de superar os momentos fletores atuantes e limitar as deformações. As lajes alveolares por sua vez,

conseguem demonstrar um desempenho superior, apresentando um peso próprio por metro quadrado reduzido e melhor aproveitamento da função estrutural do concreto.

Em relação aos tempos de execução dos modelos, verifica-se que o rendimento médio de execução para as lajes maciças moldadas *in loco*, contabilizando o corte de formas e armaduras, montagem e concretagem, pode girar em torno de 50 m² ao dia, enquanto o rendimento na montagem de lajes alveolares consegue alcançar 400 m² ao dia. Esta redução no prazo de execução é substancial e muito importante como fator de escolha do modelo de laje a ser executado.

Sugere-se o desenvolvimento de um estudo complementar a fim de quantificar com maiores detalhes a diferença nos tempo de execução e qual o impacto nos custos de execução.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. T. de **Análise de alternativas estruturais para edifícios em concreto armado**. 1999. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

ARAÚJO, J. M. **Curso de concreto armado**. 2.ed. Rio Grande: Dunas, 2003. v. 2.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

_____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BASTOS, P. S. dos S. **Lajes de concreto**. Bauru: Universidade Estadual Paulista, 2013.

Notas de aula da disciplina Estruturas de Concreto I. Disponível em:

<<http://www.pbastos.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Lajes.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2014.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado**: fundamentos e aplicações. 1. ed. (3. reimpressão) São Carlos: EESC-USP, 2000.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 2 ed. rev. e ampl. São Paulo: Pini, 2013.

PETRUCELLI, N. S. **Considerações sobre projeto e fabricação de lajes alveolares protendidas**. 2009. 106 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

SILVA, L. P. **Estudo comparativo entre lajes nervuradas e maciças em função dos vãos entre apoios**. 2010. 98 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

TATU PRÉ-MOLDADOS LTDA. Laje alveolar protendida. [S. l.], 2014. Disponível em: <http://www.tatu.com.br/pdf_novo/Tabela_de_Painel-Dimensionamento.pdf>. Acesso em 16 jun. 2014.

APENDICE A – Planilhas de cálculo de armaduras de lajes maciças e detalhamento do cálculo de custos de lajes alveolares

MACIÇAS APOIADAS											
dimensões (m x m)		FLECHA $f(t=∞)$	MOMENTO POSITIVO		Espessura (cm)	d (cm)	X		Y	Asx (cm ² /m)	Asy (cm ² /m)
ly	lx	wc (cm)	mx(KN.m/m)	my(KN.m/m)			x (cm)	x23 (cm)	y (cm)		
2	2	0,06	0,88	0,88	8	5	0,21	1,30		0,58	0,58
3	2	0,11	1,57	0,85	8	5	0,37	1,30	0,22	1,04	0,62
3	3	0,28	1,99	1,99	8	5	0,48	1,30		1,33	1,33
4	2	0,14	2,00	0,73	8	5	0,48	1,30	0,19	1,34	0,53
4	3	0,46	3,07	1,99	8	5	0,75	1,30	0,54	2,11	1,49
4	4	0,89	3,54	3,54	8	5	0,88	1,30	0,88	2,45	2,45
5	3	0,60	3,91	1,83	8	5	0,98	1,30	0,49	2,73	1,37
5	4	1,31	5,02	3,57	8	5	1,29	1,30	1,00	3,60	2,80
5	5	1,62	5,80	5,80	9	6	1,21	1,55		3,39	3,39
6	3	0,70	4,50	1,65	8	5	1,14	1,30	0,44	3,19	1,23
6	4	1,26	6,59	3,59	9	6	1,40	1,55	0,80	3,90	2,23
6	5	1,74	8,15	6,16	10	7	1,47	1,81	1,18	4,09	3,29
6	6	2,07	9,15	9,15	11	8	1,42	2,07		3,96	3,96
7	4	1,15	7,97	3,49	10	7	1,43	1,81	0,64	3,99	1,80
7	5	1,73	10,43	6,28	11	8	1,64	2,07	1,02	4,57	2,85
7	6	2,22	12,29	9,70	12	9	1,70	2,33	1,41	4,76	3,94
7	7	2,17	14,08	14,08	14	11	1,56	2,85		4,37	4,37
8	4	1,01	9,20	3,38	11	8	1,43	2,07	0,53	3,99	1,49
8	5	1,66	12,56	6,23	12	9	1,74	2,33	0,88	4,87	2,46
8	6	2,27	15,37	9,95	13	10	1,92	2,59	1,28	5,36	3,56
8	7	2,34	18,26	14,87	15	12	1,87	3,11	1,58	5,22	4,40
8	8	2,36	20,51	20,51	17	14	1,78	3,63		4,97	4,97
9	5	1,85	13,90	5,85	12	9	1,95	2,33	0,83	5,45	2,31
9	6	2,22	18,35	9,99	14	11	2,08	2,85	1,15	5,81	3,20
9	7	2,45	22,36	15,24	16	13	2,12	3,37	1,47	5,93	4,12
9	8	2,25	26,72	22,31	19	16	2,03	4,14	1,74	5,66	4,85
9	9	2,34	29,54	29,54	21	18	1,98	4,66		5,53	5,53
10	5	1,66	15,63	5,73	13	10	1,95	2,59	0,72	5,46	2,00
10	6	2,12	21,12	9,89	15	12	2,19	3,11	1,03	6,11	2,87
10	7	2,46	26,40	15,45	17	14	2,33	3,63	1,38	6,50	3,84
10	8	2,40	32,10	22,84	20	17	2,30	4,40	1,66	6,43	4,64
10	9	2,29	37,42	31,89	23	20	2,26	5,18	1,96	6,31	5,49
10	10	2,41	40,89	40,89	25	22	2,23	5,70		6,24	6,24
11	6	2,31	22,84	9,38	15	12	2,38	3,11	0,97	6,66	2,72
11	7	2,42	30,23	15,38	18	15	2,49	3,89	1,27	6,95	3,54
11	8	2,47	37,50	23,17	21	18	2,55	4,66	1,58	7,11	4,42
11	9	2,47	44,36	32,59	24	21	2,56	5,44	1,90	7,15	5,32
11	10	2,40	50,68	43,82	27	24	2,54	6,22	2,23	7,10	6,24
11	11	2,36	56,16	56,16	30	27	2,49	6,99		6,95	6,95
12	6	2,13	25,20	9,25	16	13	2,41	3,37	0,88	6,74	2,45
12	7	2,43	33,82	15,22	19	16	2,61	4,14	1,17	7,28	3,26
12	8	2,49	42,67	23,23	22	19	2,75	4,92	1,50	7,67	4,18
12	9	2,36	52,56	34,01	26	23	2,77	5,96	1,80	7,73	5,03
12	10	2,40	60,78	45,92	29	26	2,82	6,73	2,15	7,87	6,00
12	11	2,39	68,28	59,76	32	29	2,82	7,51	2,51	7,89	7,00
12	12	2,39	74,79	74,79	35	32	2,79	8,29		7,80	7,80

MACIÇAS ENGASTADAS						
dimensões (mxm)		FLECHA $f(t=00)$	MOMENTOS NEGATIVOS		MOMENTOS POSITIVOS	
ly	lx	wc (cm)	mxe (KN.m/m)	mye (KN.m/m)	mx(KN.m/m)	my(KN.m/m)
2	2	0,02	-1,02	-1,02	0,42	0,42
3	2	0,15	-1,50	-1,13	0,72	0,34
3	3	0,09	-2,30	-2,30	0,95	0,95
4	2	0,56	-1,65	-1,12	0,82	0,24
4	3	0,43	-3,14	-2,54	1,45	0,85
4	4	0,29	-4,09	-4,09	1,69	1,69
5	3	0,93	-3,70	-2,66	1,80	0,70
5	4	0,98	-5,29	-4,46	2,40	1,58
5	5	0,71	-6,39	-6,39	2,64	2,64
6	3	1,05	-4,46	-3,02	2,21	0,64
6	4	1,41	-6,60	-4,98	3,15	1,49
6	5	1,91	-7,92	-6,91	3,56	2,12
6	6	1,09	-9,66	-9,66	3,99	3,99
7	4	1,52	-7,97	-5,61	3,90	1,39
7	5	1,98	-10,37	-8,15	4,87	2,60
7	6	1,97	-12,16	-10,86	5,42	4,08
7	7	1,25	-14,40	-14,40	5,94	5,94
8	4	1,48	-9,58	-6,50	4,74	1,37
8	5	1,77	-13,02	-9,51	6,30	2,65
8	6	2,15	-15,71	-12,69	7,27	4,23
8	7	2,10	-17,64	-16,02	7,82	6,12
8	8	1,73	-19,62	-19,62	8,10	8,10
9	5	1,98	-15,07	-10,52	7,40	2,51
9	6	2,35	-18,89	-14,26	9,03	4,27
9	7	2,36	-22,41	-18,54	10,26	6,38
9	8	2,27	-24,50	-22,56	10,81	8,72
9	9	1,93	-26,90	-26,90	11,11	11,11
10	5	1,81	-18,07	-12,25	8,95	2,58
10	6	2,29	-22,58	-16,19	11,00	4,29
10	7	2,35	-27,76	-21,57	13,10	6,76
10	8	2,27	-31,73	-26,78	14,40	9,46
10	9	2,48	-32,89	-30,62	14,46	11,96
10	10	2,15	-35,77	-35,77	14,77	14,77
11	6	2,33	-26,17	-18,17	12,87	4,24
11	7	2,37	-32,83	-24,19	15,85	6,89
11	8	2,37	-38,79	-30,78	18,12	9,98
11	9	2,28	-43,18	-37,09	19,49	13,36
11	10	2,42	-44,43	-41,67	19,45	16,38
11	11	2,41	-46,37	-46,37	19,15	19,15
12	6	2,25	-30,48	-20,66	15,09	4,35
12	7	2,28	-35,87	-25,46	17,53	6,50
12	8	2,48	-45,58	-34,41	21,79	10,30
12	9	2,44	-52,30	-42,26	24,20	14,09
12	10	2,33	-57,03	-49,74	25,62	18,21
12	11	2,44	-58,38	-55,09	25,47	21,77
12	12	2,40	-60,71	-60,71	25,07	25,07

Lajes maciças de concreto armado e alveolares protendidas pré-fabricadas: estudo comparativo em função dos vãos entre apoios

MACIÇAS ENGASTADAS									
ARMADURAS POSITIVAS									
dimensões (mxm)		espessura (cm)	dx (cm)	dy (cm)	X		Y	Asx (cm ² /m)	Asy (cm ² /m)
ly	lx				x (cm)	X23 (cm)	y (cm)		
2	2	8	5		0,10	1,30		0,27	0,27
3	2	8	5	4,5	0,17	1,30	0,09	0,47	0,24
3	3	8	5		0,22	1,30		0,62	0,62
4	2	8	5	4,5	0,19	1,30	0,06	0,53	0,17
4	3	8	5	4,5	0,34	1,30	0,22	0,96	0,62
4	4	8	5		0,40	1,30		1,12	1,12
5	3	9	6	5,5	0,36	1,55	0,15	0,99	0,42
5	4	8	5	4,5	0,58	1,30	0,42	1,62	1,17
5	5	8	5		0,64	1,30		1,79	1,79
6	3	12	9	8,5	0,29	2,33	0,09	0,80	0,24
6	4	10	7	6,5	0,54	1,81	0,27	1,50	0,75
6	5	8	5	4,5	0,88	1,30	0,57	2,47	1,60
6	6	9	6		0,81	1,55		2,26	2,26
7	4	13	10	9,5	0,46	2,59	0,17	1,28	0,48
7	5	11	8	7,5	0,73	2,07	0,41	2,03	1,14
7	6	10	7	6,5	0,94	1,81	0,76	2,64	2,12
7	7	11	8		0,90	2,07		2,51	2,51
8	4	17	14	13,5	0,40	3,63	0,12	1,10	0,33
8	5	15	12	11,5	0,62	3,11	0,27	1,73	0,75
8	6	13	10	9,5	0,87	2,59	0,52	2,42	1,47
8	7	12	9	8,5	1,05	2,33	0,86	2,94	2,41
8	8	12	9		1,09	2,33		3,05	3,05
9	5	18	15	14,5	0,58	3,89	0,20	1,61	0,56
9	6	16	13	12,5	0,82	3,37	0,40	2,29	1,11
9	7	15	12	11,5	1,02	3,11	0,65	2,85	1,83
9	8	14	11	10,5	1,18	2,85	1,00	3,31	2,78
9	9	14	11		1,22	2,85		3,40	3,40
10	5	23	20	19,5	0,52	5,18	0,15	1,46	0,43
10	6	20	17	16,5	0,76	4,40	0,30	2,12	0,84
10	7	19	16	15,5	0,97	4,14	0,51	2,70	1,42
10	8	18	15	14,5	1,14	3,89	0,77	3,19	2,15
10	9	16	13	12,5	1,34	3,37	1,15	3,73	3,20
10	10	16	13		1,37	3,37		3,82	3,82
11	6	24	21	20,5	0,72	5,44	0,24	2,00	0,67
11	7	23	20	19,5	0,93	5,18	0,41	2,60	1,15
11	8	22	19	18,5	1,13	4,92	0,63	3,14	1,76
11	9	21	18	17,5	1,28	4,66	0,90	3,59	2,51
11	10	19	16	15,5	1,45	4,14	1,26	4,06	3,52
11	11	18	15		1,53	3,89		4,29	4,29
12	6	29	26	25,5	0,68	6,73	0,20	1,89	0,55
12	7	25	22	21,5	0,93	5,70	0,35	2,61	0,98
12	8	26	23	22,5	1,11	5,96	0,53	3,11	1,49
12	9	25	22	21,5	1,30	5,70	0,77	3,63	2,14
12	10	24	21	20,5	1,45	5,44	1,05	4,04	2,92
12	11	22	19	18,5	1,60	4,92	1,40	4,47	3,91
12	12	21	18		1,67	4,66		4,66	4,66

MACIÇAS ENGASTADAS									
ARMADURAS NEGATIVAS									
dimensões (mxm)		espessura (cm)	d (cm)	X		Y		Asx' (cm ² /m)	Asy' (cm ² /m)
ly	lx			x (cm)	x23 (cm)	y (cm)	y23		
2	2	8	6,0	0,20	1,55	0,20	1,55	0,56	0,56
3	2	8	6,0	0,29	1,55	0,22	1,55	0,82	0,62
3	3	8	6,0	0,46	1,55	0,46	1,55	1,27	1,27
4	2	8	6,0	0,32	1,55	0,22	1,55	0,91	0,61
4	3	8	6,0	0,63	1,55	0,50	1,55	1,76	1,41
4	4	8	6,0	0,83	1,55	0,83	1,55	2,32	2,32
5	3	9	7,0	0,63	1,81	0,45	1,81	1,77	1,25
5	4	8	6,0	1,10	1,55	0,91	1,55	3,06	2,55
5	5	8	6,0	1,35	1,55	1,35	1,55	3,77	3,77
6	3	12	10,0	0,53	2,59	0,35	2,59	1,47	0,99
6	4	10	8,0	1,00	2,07	0,75	2,07	2,80	2,08
6	5	8	6,0	1,72	1,55	1,47	1,55	4,80	4,11
6	6	9	7,0	1,77	1,81	1,77	1,81	4,94	4,94
7	4	13	11,0	0,86	2,85	0,60	2,85	2,41	1,68
7	5	11	9,0	1,42	2,33	1,10	2,33	3,96	3,06
7	6	10	8,0	1,94	2,07	1,71	2,07	5,42	4,78
7	7	11	9,0	2,03	2,33	2,03	2,33	5,66	5,66
8	4	17	15,0	0,75	3,89	0,51	3,89	2,10	1,41
8	5	15	13,0	1,20	3,37	0,87	3,37	3,35	2,42
8	6	13	11,0	1,76	2,85	1,40	2,85	4,91	3,91
8	7	12	10,0	2,23	2,59	2,01	2,59	6,24	5,61
8	8	12	10,0	2,52	2,59	2,52	2,59	7,03	7,03
9	5	18	16,0	1,12	4,14	0,77	4,14	3,12	2,16
9	6	16	14,0	1,63	3,63	1,22	3,63	4,56	3,40
9	7	15	13,0	2,13	3,37	1,74	3,37	5,94	4,85
9	8	14	12,0	2,57	3,11	2,35	3,11	7,19	6,57
9	9	14	12,0	2,86	3,11	2,86	3,11	7,98	7,98
10	5	23	21,0	1,01	5,44	0,68	5,44	2,82	1,90
10	6	20	18,0	1,50	4,66	1,06	4,66	4,18	2,97
10	7	19	17,0	1,97	4,40	1,52	4,40	5,51	4,24
10	8	18	16,0	2,43	4,14	2,03	4,14	6,80	5,68
10	9	16	14,0	2,96	3,63	2,74	3,63	8,26	7,64
10	10	16	14,0	3,25	3,63	3,25	3,63	9,07	9,07
11	6	24	22,0	1,41	5,70	0,97	5,70	3,93	2,71
11	7	23	21,0	1,87	5,44	1,36	5,44	5,22	3,81
11	8	22	20,0	2,35	5,18	1,84	5,18	6,55	5,15
11	9	21	19,0	2,78	4,92	2,37	4,92	7,77	6,62
11	10	19	17,0	3,26	4,40	3,04	4,40	9,12	8,50
11	11	18	16,0	3,68	4,14	3,68	4,14	10,28	10,28
12	6	29	27,0	1,33	6,99	0,89	6,99	3,71	2,50
12	7	25	23,0	1,86	5,96	1,31	5,96	5,19	3,65
12	8	26	24,0	2,28	6,22	1,70	6,22	6,36	4,75
12	9	25	23,0	2,75	5,96	2,20	5,96	7,69	6,15
12	10	24	22,0	3,17	5,70	2,74	5,70	8,86	7,66
12	11	22	20,0	3,63	5,18	3,41	5,18	10,14	9,52
12	12	21	19,0	4,02	4,92	4,02	4,92	11,24	11,24

LAJES ALVEOLARES				
ly (m)	lx (m)	Área (m ²)	R\$/m ²	R\$/peça
2,0	1,25	2,50	R\$ 110,00	R\$ 275,00
3,0	1,25	3,75	R\$ 110,00	R\$ 412,50
4,0	1,25	5,00	R\$ 110,00	R\$ 550,00
5,0	1,25	6,25	R\$ 110,00	R\$ 687,50
6,0	1,25	7,50	R\$ 100,00	R\$ 825,00
7,0	1,25	8,75	R\$ 100,00	R\$ 962,50
8,0	1,25	10,00	R\$ 110,00	R\$ 1.100,00
9,0	1,25	11,25	R\$ 140,00	R\$ 1.575,00
10,0	1,25	12,50	R\$ 140,00	R\$ 1.750,00
11,0	1,25	13,75	R\$ 140,00	R\$ 1.925,00
12,0	1,25	15,00	R\$ 140,00	R\$ 2.100,00

LAJES ALVEOLARES							R\$/m ² - Média p/ cada intervalo de vão	
ly (m)	lx (m)	Nº Peças	Custo (R\$)	R\$/m ²	Acrescimo Frete 10%	Acrescimo Montagem/Equip.		
2	2	2	R\$ 550,00	R\$ 137,50	R\$ 151,25	R\$ 161,25	R\$ 161,25	
2	3	3	R\$ 825,00	R\$ 137,50	R\$ 151,25	R\$ 161,25		
2	4	4	R\$ 1.100,00	R\$ 137,50	R\$ 151,25	R\$ 161,25		
3	2	2	R\$ 825,00	R\$ 137,50	R\$ 151,25	R\$ 161,25	R\$ 161,25	
3	3	3	R\$ 1.237,50	R\$ 137,50	R\$ 151,25	R\$ 161,25		
3	4	4	R\$ 1.650,00	R\$ 137,50	R\$ 151,25	R\$ 161,25		
3	5	4	R\$ 1.650,00	R\$ 110,00	R\$ 121,00	R\$ 131,00		
3	6	5	R\$ 2.062,50	R\$ 114,58	R\$ 126,04	R\$ 136,04		
4	2	2	R\$ 1.100,00	R\$ 137,50	R\$ 151,25	R\$ 161,25	R\$ 142,34	
4	3	3	R\$ 1.650,00	R\$ 137,50	R\$ 151,25	R\$ 161,25		
4	4	4	R\$ 2.200,00	R\$ 137,50	R\$ 151,25	R\$ 161,25		
4	5	4	R\$ 2.200,00	R\$ 110,00	R\$ 121,00	R\$ 131,00		
4	6	5	R\$ 2.750,00	R\$ 114,58	R\$ 126,04	R\$ 136,04		
4	7	6	R\$ 3.300,00	R\$ 117,86	R\$ 129,64	R\$ 139,64		
4	8	7	R\$ 3.850,00	R\$ 120,31	R\$ 132,34	R\$ 142,34		
5	3	3	R\$ 2.062,50	R\$ 137,50	R\$ 151,25	R\$ 161,25	R\$ 140,99	
5	4	4	R\$ 2.750,00	R\$ 137,50	R\$ 151,25	R\$ 161,25		
5	5	4	R\$ 2.750,00	R\$ 110,00	R\$ 121,00	R\$ 131,00		
5	6	5	R\$ 3.437,50	R\$ 114,58	R\$ 126,04	R\$ 136,04		
5	7	6	R\$ 4.125,00	R\$ 117,86	R\$ 129,64	R\$ 139,64		
5	8	7	R\$ 4.812,50	R\$ 120,31	R\$ 132,34	R\$ 142,34		
5	9	8	R\$ 5.500,00	R\$ 122,22	R\$ 134,44	R\$ 144,44		
5	10	8	R\$ 5.500,00	R\$ 110,00	R\$ 121,00	R\$ 131,00		
6	3	3	R\$ 2.475,00	R\$ 137,50	R\$ 151,25	R\$ 161,25	R\$ 137,84	
6	4	4	R\$ 3.300,00	R\$ 137,50	R\$ 151,25	R\$ 161,25		
6	5	4	R\$ 3.300,00	R\$ 110,00	R\$ 121,00	R\$ 131,00		
6	6	5	R\$ 4.125,00	R\$ 114,58	R\$ 126,04	R\$ 136,04		
6	7	6	R\$ 4.950,00	R\$ 117,86	R\$ 129,64	R\$ 139,64		
6	8	7	R\$ 5.775,00	R\$ 120,31	R\$ 132,34	R\$ 142,34		
6	9	8	R\$ 6.600,00	R\$ 122,22	R\$ 134,44	R\$ 144,44		
6	10	8	R\$ 6.600,00	R\$ 110,00	R\$ 121,00	R\$ 131,00		
6	11	9	R\$ 7.425,00	R\$ 112,50	R\$ 123,75	R\$ 133,75		
6	12	10	R\$ 8.250,00	R\$ 114,58	R\$ 126,04	R\$ 136,04		
7	4	4	R\$ 3.850,00	R\$ 137,50	R\$ 151,25	R\$ 161,25		R\$ 136,04
7	5	4	R\$ 3.850,00	R\$ 110,00	R\$ 121,00	R\$ 131,00		
7	6	5	R\$ 4.812,50	R\$ 114,58	R\$ 126,04	R\$ 136,04		
7	7	6	R\$ 5.775,00	R\$ 117,86	R\$ 129,64	R\$ 139,64		
7	8	7	R\$ 6.737,50	R\$ 120,31	R\$ 132,34	R\$ 142,34		
7	9	8	R\$ 7.700,00	R\$ 122,22	R\$ 134,44	R\$ 144,44		
7	10	8	R\$ 7.700,00	R\$ 110,00	R\$ 121,00	R\$ 131,00		
7	11	9	R\$ 8.662,50	R\$ 112,50	R\$ 123,75	R\$ 133,75		
7	12	10	R\$ 9.625,00	R\$ 114,58	R\$ 126,04	R\$ 136,04		
8	4	4	R\$ 4.400,00	R\$ 137,50	R\$ 151,25	R\$ 161,25	R\$ 136,04	
8	5	4	R\$ 4.400,00	R\$ 110,00	R\$ 121,00	R\$ 131,00		
8	6	5	R\$ 5.500,00	R\$ 114,58	R\$ 126,04	R\$ 136,04		
8	7	6	R\$ 6.600,00	R\$ 117,86	R\$ 129,64	R\$ 139,64		
8	8	7	R\$ 7.700,00	R\$ 120,31	R\$ 132,34	R\$ 142,34		
8	9	8	R\$ 8.800,00	R\$ 122,22	R\$ 134,44	R\$ 144,44		
8	10	8	R\$ 8.800,00	R\$ 110,00	R\$ 121,00	R\$ 131,00		
8	11	9	R\$ 9.900,00	R\$ 112,50	R\$ 123,75	R\$ 133,75		
8	12	10	R\$ 11.000,00	R\$ 114,58	R\$ 126,04	R\$ 136,04		

9	5	4	R\$ 6.300,00	R\$ 140,00	R\$ 154,00	R\$ 164,00	R\$ 170,42
9	6	5	R\$ 7.875,00	R\$ 145,83	R\$ 160,42	R\$ 170,42	
9	7	6	R\$ 9.450,00	R\$ 150,00	R\$ 165,00	R\$ 175,00	
9	8	7	R\$ 11.025,00	R\$ 153,13	R\$ 168,44	R\$ 178,44	
9	9	8	R\$ 12.600,00	R\$ 155,56	R\$ 171,11	R\$ 181,11	
9	10	8	R\$ 12.600,00	R\$ 140,00	R\$ 154,00	R\$ 164,00	
9	11	9	R\$ 14.175,00	R\$ 143,18	R\$ 157,50	R\$ 167,50	
9	12	10	R\$ 15.750,00	R\$ 145,83	R\$ 160,42	R\$ 170,42	
10	5	4	R\$ 7.000,00	R\$ 140,00	R\$ 154,00	R\$ 164,00	
10	6	5	R\$ 8.750,00	R\$ 145,83	R\$ 160,42	R\$ 170,42	
10	7	6	R\$ 10.500,00	R\$ 150,00	R\$ 165,00	R\$ 175,00	
10	8	7	R\$ 12.250,00	R\$ 153,13	R\$ 168,44	R\$ 178,44	
10	9	8	R\$ 14.000,00	R\$ 155,56	R\$ 171,11	R\$ 181,11	
10	10	8	R\$ 14.000,00	R\$ 140,00	R\$ 154,00	R\$ 164,00	
10	11	9	R\$ 15.750,00	R\$ 143,18	R\$ 157,50	R\$ 167,50	
10	12	10	R\$ 17.500,00	R\$ 145,83	R\$ 160,42	R\$ 170,42	
11	6	5	R\$ 9.625,00	R\$ 145,83	R\$ 160,42	R\$ 170,42	
11	7	6	R\$ 11.550,00	R\$ 150,00	R\$ 165,00	R\$ 175,00	
11	8	7	R\$ 13.475,00	R\$ 153,13	R\$ 168,44	R\$ 178,44	
11	9	8	R\$ 15.400,00	R\$ 155,56	R\$ 171,11	R\$ 181,11	
11	10	8	R\$ 15.400,00	R\$ 140,00	R\$ 154,00	R\$ 164,00	
11	11	9	R\$ 17.325,00	R\$ 143,18	R\$ 157,50	R\$ 167,50	
11	12	10	R\$ 19.250,00	R\$ 145,83	R\$ 160,42	R\$ 170,42	
12	6	5	R\$ 10.500,00	R\$ 145,83	R\$ 160,42	R\$ 170,42	
12	7	6	R\$ 12.600,00	R\$ 150,00	R\$ 165,00	R\$ 175,00	
12	8	7	R\$ 14.700,00	R\$ 153,13	R\$ 168,44	R\$ 178,44	
12	9	8	R\$ 16.800,00	R\$ 155,56	R\$ 171,11	R\$ 181,11	
12	10	8	R\$ 16.800,00	R\$ 140,00	R\$ 154,00	R\$ 164,00	
12	11	9	R\$ 18.900,00	R\$ 143,18	R\$ 157,50	R\$ 167,50	
12	12	10	R\$ 21.000,00	R\$ 145,83	R\$ 160,42	R\$ 170,42	