

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

Francisco Dall’Agnol

**ESTUDO COMPARATIVO QUANTO AO CONSUMO DE
MATERIAIS ENTRE SOLUÇÕES COM LAJES MACIÇAS E
NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO**

Porto Alegre
Julho 2018

FRANCISCO DALL'AGNOL

**ESTUDO COMPARATIVO QUANTO AO CONSUMO DE
MATERIAIS ENTRE SOLUÇÕES COM LAJES MACIÇAS E
NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Diplomação apresentado à Comissão de Graduação do
Curso 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

Orientador: Roberto Domingo Rios
Coorientador: João Ricardo Masuero

Porto Alegre
Julho 2018

FRANCISCO DALL'AGNOL

**ESTUDO COMPARATIVO QUANTO AO CONSUMO DE
MATERIAIS ENTRE SOLUÇÕES COM LAJES MACIÇAS E
NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelos Professores Orientadores e pela Comissão de Graduação (COMGRAD) de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2018

Prof. Roberto Domingo Rios
Dr. pela UFRGS
Orientador

Prof. João Ricardo Masuero
Dr. pela UFRGS
Coorientador

Profa. Paula Manica Lazzari
Dra. pela UFRGS
Relatora

BANCA EXAMINADORA

**Prof. Roberto Domingo Rios
(UFRGS)**
Dr. pela UFRGS

**Prof. João Ricardo Masuero
(UFRGS)**
Dr. pela UFRGS

Profa. Paula Manica Lazzari (UFRGS)
Dra. pela UFRGS

**Profa. Virgínia Maria Rosito d'Ávila
Bessa
(UFRGS)**
Dra. pela UFRGS

Dedico este trabalho aos meus pais, Sérgio e Teresinha,
que me dão suporte e amparo incondicionalmente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao Prof. Roberto Domingo Rios, por todo o conhecimento repassado ao longo do curso de Engenharia Civil, pela amizade, pela paciência e por tornar minha graduação possível.

Agradeço, imensamente, ao Prof. João Ricardo Masuero, por toda a sua solicitude, empenho, dedicação e humildade, não apenas como professor, mas principalmente como coordenador. És um exemplo pessoal e profissional. Sem dúvida, transformaste e ainda transformas a vida de muitos alunos.

Agradeço aos meus pais, Sérgio e Teresinha, pela compreensão, suporte e incentivo constantes durante todo o meu percurso na UFRGS e por tudo que proporcionaram em minha vida. Devo tudo a vocês. Obrigado por terem sempre acreditado em mim.

Agradeço à minha irmã, Heloísa, por todas as suas interferências nos meus dias. Por me valorizar, por se importar e por me ensinar. Pelas risadas compartilhadas, pelas mudanças que proporcionas e por todas as surpresas que contém. Sou muito feliz em poder compartilhar minha existência contigo.

Agradeço à minha namorada, Milena Portela, por ter cruzado meu caminho, pela incessante cumplicidade, por intensificar os bons momentos e atenuar os maus, por me encorajar, desafiar e repreender. És inspiração para mim por todas as tuas conquistas, caráter e valores. Sou infinitamente grato por tê-la ao meu lado.

Be yourself; everyone else is already taken.

Oscar Wilde

ESTUDO COMPARATIVO QUANTO AO CONSUMO DE MATERIAIS ENTRE SOLUÇÕES COM LAJES MACIÇAS E NERVURADAS DE CONCRETO ARMADO

RESUMO

Este trabalho versa sobre o comparativo de consumo de concreto e aço na concepção de lajes maciças e nervuradas em concreto armado simplesmente apoiadas em todos os bordos e calculadas segundo a mesma metodologia. São analisadas 57 configurações de lajes distintas para cada um dos métodos construtivos, com dimensões variando de 3 m x 3 m a 10 m x 10 m. O propósito é verificar qual das duas soluções apresenta vantagens no aspecto de quantitativos de materiais estruturais empregados para diferentes situações de carregamento. Inicialmente, são abordados as definições e características específicas de cada uma das soluções, bem como dos materiais alvo do estudo, através de referências bibliográficas. Em seguida, são determinados os elementos estruturais que serão estudados neste trabalho, definindo-se todos os parâmetros iniciais que delimitarão a análise. Posteriormente, são exibidos os resultados de projetos das lajes, com as respectivas seções e armaduras dimensionadas, além de verificações de todas as exigências normativas. Então, são apresentados os dados obtidos para os consumos dos dois materiais supracitados, organizados numérica e graficamente, de modo a proporcionar uma compreensão adequada dos resultados. Simultaneamente, é realizada a análise desses dados, contextualizando a representatividade numérica dos parâmetros estudados, viabilizando um relacionamento de vantagens e desvantagens entre os modelos de projeto, para que seja possível a utilização prática dos cálculos efetuados. Verifica-se que apenas em vãos de até 5 metros as soluções com lajes maciças podem apresentar consumo de concreto inferior às com lajes nervuradas. Para o aço, os vãos são ainda inferiores. Os custos atrelados a cada um dos sistemas não são abordados no presente trabalho.

Palavras-chave: Lajes maciças. Lajes nervuradas. Concreto armado. Consumo de materiais.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – E_{ci} , E_{cs} e α_i para diferentes classes de resistência de concreto armado.....	28
Tabela 2 – Espessura dos cobrimentos para cada classe de agressividade ambiental.....	31
Tabela 3 – Classificação das classes de agressividade ambiental de acordo com o ambiente de inserção da edificação.....	30
Tabela 4 - Cargas verticais acidentais conforme o uso da edificação.....	33
Tabela 5 – Valores do coeficiente ψ_2 para as cargas acidentais de edifícios.....	34
Tabela 6 - Valores de ρ_{min} em função do concreto utilizado.....	35
Tabela 7 – Taxas específicas de armadura mínima.....	36
Tabela 8 – Limites de deslocamentos.....	37
Tabela 9 – Valores do coeficiente ξ em função do tempo de aplicação das cargas.....	38
Tabela 10 - Valores dos coeficientes γ_c do concreto e γ_s do aço.....	40
Tabela 11 – Nomenclatura, vãos e carregamento das lajes dimensionadas.....	60
Tabela 12 – Lajes maciças dimensionadas.....	62
Tabela 13 – Propriedades das lajes nervuradas dimensionadas.....	64
Tabela 14 - Verificação dos deslocamentos das lajes nervuradas dimensionadas.....	66
Tabela 15 – Armaduras de flexão para as lajes maciças.....	68
Tabela 16 – Armaduras de flexão para as lajes nervuradas.....	70
Tabela 17 – Armaduras de flexão para as mesas das lajes nervuradas.....	72
Tabela 18 – Verificação ao cisalhamento das lajes maciças.....	74
Tabela 19 – Verificação ao cisalhamento das lajes nervuradas.....	76
Tabela 20 – Consumo de materiais nas lajes com carregamento $q = 1,5 \text{ kN/m}^2$	79
Tabela 21 – Consumo de materiais nas lajes com carregamento $q = 3,0 \text{ kN/m}^2$	79
Tabela 22 – Consumo de materiais nas lajes com carregamento $q = 4,0 \text{ kN/m}^2$	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista superior de laje nervurada armada em uma direção	21
Figura 2 - Vista superior de laje nervurada armada em duas direções	21
Figura 3 - Seção transversal de laje nervurada normal (direta).....	22
Figura 4 - Seção transversal de laje nervurada invertida	22
Figura 5 - Seção transversal de laje nervurada dupla	23
Figura 6 – Diagrama tensão-deformação para aços de armaduras passivas	29
Figura 7 – Domínios de deformação do concreto armado	41
Figura 8 – Profundidade limite da linha neutra	42
Figura 9 – Distribuição de tensões de compressão no concreto segundo os diagramas parábola-retângulo e retangular simplificado.....	43
Figura 10 - Geometria da seção retangular	44
Figura 11 – Geometria da seção T.....	47
Figura 12 – Seção T comprimida na mesa.....	48
Figura 13 – Seção T com a alma parcialmente comprimida.....	48
Figura 14 – Tabela de Kalmanok para lajes apoiadas nos 4 bordos e carga uniformemente distribuída.....	57
Figura 15 - Parâmetros determinados através da utilização das tabelas de Kalmanok	58
Figura 16 – Gráficos de consumo de concreto	82
Figura 17 – Diferenças no consumo de concreto	83
Figura 18 – Gráficos de consumo de aço.....	85
Figura 19 – Diferenças no consumo de aço	86

LISTA DE SIGLAS

NBR – Norma Brasileira

ELU – Estados Limites Últimos

ELS – Estados Limites de Serviço

LNU – Lajes Nervuradas Unidirecionais

LNB – Lajes Nervuradas Bidirecionais

CA – Concreto Armado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	15
2.2 PREMISSA.....	15
2.3 PRESSUPOSTO	15
2.4 LIMITAÇÃO.....	15
2.5 DELINEAMENTO	16
3 LAJES	17
3.1 LAJES MACIÇAS.....	18
3.1.1 Definição	18
3.1.2 Classificação	18
3.1.2.1 Classificação quanto à direção principal	18
3.1.2.1.1 <i>Lajes armadas em uma direção</i>	18
3.1.2.1.2 <i>Lajes armadas em duas direções</i>	19
3.1.2.2 Classificação quanto à vinculação	19
3.1.3 Espessura mínima	19
3.2 LAJES NERVURADAS	20
3.2.1 Definição	20
3.2.2 Classificação	20
3.2.2.1 Classificação quanto à direção principal	20
3.2.2.1.1 <i>Lajes nervuradas unidirecionais</i>	20
3.2.2.1.2 <i>Lajes nervuradas bidirecionais</i>	21
3.2.2.2 Classificação quanto à posição das nervuras	21
3.2.2.2.1 <i>Lajes nervuradas normais</i>	22
3.2.2.2.2 <i>Lajes nervuradas invertidas</i>	22
3.2.2.2.3 <i>Lajes nervuradas duplas ou lajes caixaõ</i>	22
3.2.2.3 Classificação quanto à vinculação	23
3.2.3 Vantagens e desvantagens	23
3.2.4 Recomendações técnicas específicas	24
4 MATERIAIS	25
4.1 CONCRETO.....	25
4.1.1 Massa específica	25

4.1.2 Resistência à compressão	25
4.1.3 Resistência à tração	26
4.1.4 Módulo de elasticidade	26
4.2 AÇO	28
4.2.1 Tipos de aço	28
4.2.2 Critérios normatizados	28
4.2.2.1 Superfície aderente.....	28
4.2.2.2 Diagrama tensão-deformação	28
4.2.2.3 Massa específica	29
4.2.2.4 Módulo de elasticidade.....	29
5 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO	30
5.1 COBRIMENTOS MÍNIMOS.....	30
5.2 AÇÕES ATUANTES NA ESTRUTURA	31
5.2.1 Ações permanentes (g)	31
5.2.1.1 Peso próprio	32
5.2.1.2 Revestimentos	32
5.2.2 Ações variáveis (q)	32
5.2.3 Ações excepcionais	33
5.3 COMBINAÇÃO DE AÇÕES	34
5.4 CRITÉRIOS PARA AS ARMADURAS.....	35
5.5 TAXAS MÍNIMAS DE ARMADURA.....	35
5.6 TAXAS MÁXIMAS DE ARMADURA PARA FLEXÃO	36
5.7 DESLOCAMENTOS.....	36
5.8 ESTADOS LIMITES.....	38
5.8.1 Estados limites últimos	38
5.8.2 Estados limites de serviço	39
5.9 SEGURANÇA.....	39
5.10 HIPÓTESES	40
5.11 DIAGRAMA RETANGULAR SIMPLIFICADO	42
5.12 CONDIÇÕES DE DUTILIDADE.....	43
6 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO	44
6.1 SEÇÃO RETANGULAR.....	44
6.1.1 Armadura simples	45
6.1.2 Armadura dupla	46
6.2 SEÇÃO T	46

6.2.1 Profundidade da zona comprimida (y) situada na mesa	47
6.2.2 Profundidade da zona comprimida (y) situada na alma ($y < y_{\text{máx}}$)	48
6.2.3 Profundidade da zona comprimida situada na alma ($y > y_{\text{máx}}$).....	49
7 CISALHAMENTO	51
7.1 VERIFICAÇÃO NO ESTADO LIMITE ÚLTIMO	51
7.1.1 Modelo de cálculo I	51
7.1.2 Modelo de cálculo II.....	52
7.2 ESFORÇO CORTANTE EM LAJES.....	53
7.2.1 Lajes sem armadura para força cortante.....	53
7.2.2 Lajes com armadura para força cortante	54
8 METODOLOGIA DE CÁLCULO	55
8.1 TEORIA DE FLEXÃO DE PLACAS	55
8.2 TABELAS PARA O CÁLCULO DE PLACAS	56
9 DIMENSIONAMENTO E CONSUMO.....	59
9.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	59
9.2 AMOSTRAGEM.....	59
9.2.1 Lajes maciças	61
9.2.2 Lajes nervuradas.....	63
9.3 ARMADURAS DE FLEXÃO.....	68
9.3.1 Lajes maciças	68
9.3.2 Lajes nervuradas.....	70
9.4 VERIFICAÇÃO AO CISALHAMENTO.....	74
9.4.1 Lajes maciças	74
9.4.2 Lajes nervuradas.....	76
9.5 CONSUMO DE MATERIAIS	78
10 ANÁLISE DOS RESULTADOS	81
10.1 CONSUMO DE CONCRETO	81
10.2 CONSUMO DE AÇO.....	84
11 CONCLUSÕES E ADENDOS	87
11.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
11.2 ADENDOS.....	87
REFERÊNCIAS	89
ANEXO A	90

1 INTRODUÇÃO

É de amplo conhecimento que o concreto armado é o constituinte da maior parte das estruturas utilizadas em todas as edificações no Brasil, desde as habitacionais mais simples até obras grandes e complexas.

O consumo de matérias-primas, de maneira genérica, é de, em média, 10 toneladas por habitante todo ano. Ainda, é estimado que de 40% a 75% desse consumo seja relacionado com a construção civil.¹

Nesse âmbito, há muitos pontos de interesse em um melhor aproveitamento dos materiais, desde causas econômicas até causas ambientais. Uma das diretrizes de aperfeiçoamento no consumo é a percepção do tema na concepção de projetos, visto que, possivelmente, pequenas alterações produzam grandes impactos.

Nesse contexto, Carvalho e Pinheiro (2009) afirmam que o pavimento de uma edificação é a parte da estrutura que mais consome material, devido a sua grande superfície. Os autores ainda dizem que uma redução de 1 cm na altura da laje pode significar uma redução de custos considerável, por exemplo. Dessa maneira, para pavimentos com o menor dos vãos a serem vencidos inferior à 5 metros e com cargas a serem suportadas não muito elevadas, normalmente são empregadas lajes maciças apoiadas em vigas (sistema tradicional), visto que a espessura demandada pelas lajes se torna pequena. Já para grandes vãos, as lajes maciças podem ser antieconômicas, pois a espessura necessária da estrutura é elevada.

Um constante crescimento da utilização da solução de lajes nervuradas pode ser observado na construção civil atualmente. Motivado pela tendência arquitetônica de concepção de ambientes mais amplos e pela simultânea possibilidade de redução de custos, o emprego desse método construtivo tornou-se recorrente em diferentes tipos de edificações.

¹ AGOPYAN, V. **Construção Civil consome até 75% da matéria-prima do planeta.** Em: Globo Ciência, 13 de julho de 2013.

Suscintamente, a sistemática de funcionamento de uma laje nervurada direta (de seção transversal em formato de “T”) é simples: uma mesa superior de concreto armado é responsável por resistir aos esforços de compressão, enquanto, na extremidade inferior das nervuras, as armaduras longitudinais são solicitadas a resistir aos esforços de tração. As nervuras, por si só, geralmente funcionam como ligação entre a mesa e as armaduras, tendo sua dimensão vertical elevada para gerar rigidez à torção e à flexão.

Com base nisto, este trabalho propõe o dimensionamento dos sistemas de lajes maciças e nervuradas para diversas situações propostas, a fim de mensurar o consumo total de concreto e aço em cada uma das soluções. Deste modo, é realizada uma análise das vantagens e desvantagens na aplicação dos métodos construtivos citados, visando facilitar a observação das diferenças entre os dois casos.

O trabalho está composto de onze capítulos. De forma sequencial, o capítulo um apresenta um conjunto de considerações iniciais e contextualização do assunto abordado. No capítulo dois são apresentadas todas as diretrizes que guiarão as discussões do trabalho. No capítulo três, as lajes em concreto armado são definidas e classificadas de acordo com suas características construtivas, segregando-se em maciças e nervuradas. No capítulo quatro, os materiais utilizados para a constituição dos elementos estruturais estudados são introduzidos e detalhados.

O dimensionamento inicia-se no capítulo cinco, onde são definidos todos os critérios regentes dos cálculos realizados, de acordo com as especificações normatizadas. No capítulo seis, são exibidos os métodos de dimensionamento de seções retangular e “T” submetidas à esforços de flexão. O capítulo sete aborda as verificações devidas quanto aos esforços de cisalhamento. No capítulo oito, a metodologia de cálculo para as lajes é definida. Nos capítulos nove e dez, respectivamente, são apresentados todos os dimensionamentos realizados, bem como uma análise dos resultados obtidos. No capítulo onze, finalmente, são realizadas algumas considerações finais pertinentes ao assunto do trabalho.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

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

2.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo principal do trabalho é comparar o consumo de materiais (concreto e aço) a serem empregados na utilização dos métodos construtivos de lajes maciças e laje nervuradas em concreto armado, sob determinadas condições e critérios predefinidos, devendo ambas atenderem aos requisitos dos Estados Limites Últimos (ELU) e Estados Limites de Serviço (ELS).

2.2 PREMISSA

A premissa do trabalho é de que uma proposta arquitetônica pode ser executada com diferentes soluções estruturais, de modo a suprir as necessidades específicas de cada situação, desde que atenda a uma série de pré-requisitos de desempenho normatizados.

2.3 PRESSUPOSTO

Pressupõe-se que os objetos a serem dimensionados com as tabelas de solução para a metodologia de flexão de placas sejam suficientemente aproximados de estruturas reais para justificar os resultados obtidos quanto ao consumo de materiais.

2.4 LIMITAÇÃO

O trabalho limita-se ao dimensionamento de lajes maciças e nervuradas em concreto armado, simplesmente apoiadas nos quatro bordos, para vãos variados em um intervalo de 3 a 10 metros e submetidas a carregamentos uniformemente distribuídos de 1,5 kN/m², 3 kN/m² e 4 kN/m², a fim de quantificar os materiais empregados (concreto e aço) na execução das mesmas.

2.5 DELINEAMENTO

O presente trabalho configura-se de acordo com as etapas a seguir, que são descritas nos próximos parágrafos desta seção:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição das dimensões das lajes a serem estudadas;
- c) dimensionamento estrutural das lajes;
- d) determinação quantitativa do consumo de materiais;
- e) exposição de resultados;
- f) análise conclusiva das diferentes situações propostas;

A pesquisa bibliográfica foi realizada no início e no decorrer de todo o trabalho, visando a agregação de conhecimentos técnicos de estudos e aplicações já realizados previamente, a fim de dar suporte científico ao desenvolvimento da proposta apresentada. As informações provêm, em sua maioria, de livros e normas técnicas.

A etapa de determinação das dimensões das lajes componentes da amostragem compreende a seleção de vãos de pavimentos que tenham abrangência satisfatória para dar suporte ao estudo. A etapa de dimensionamento estrutural das placas engloba a seleção de carregamentos atuantes e as devidas solicitações resultantes, de modo a viabilizar os cálculos determinantes das geometrias das estruturas, bem como das armaduras necessárias de projeto. Esta etapa requereu o estudo de todos os critérios de projeto e regulamentações normatizados, para permitir que o estudo fosse equiparado à situação real.

A etapa de determinação das quantidades de materiais empregados em cada solução consiste em uma análise simplificada, atrelada ao dimensionamento estrutural, dos volumes de concreto e aço necessários para a composição de cada laje projetada, fornecendo estimativas correspondentes a todas as diferentes situações propostas.

As etapas finais de exposição de resultados e análise crítica são compostas de representações gráficas dos cálculos efetuados, possibilitando uma visualização prática das consequências de cada uma das soluções adotadas para cada caso estudado, dando suporte adequado à tomada de decisão perante as alternativas propostas.

3 LAJES

Segundo Araújo (2010a, p. 1), “As lajes são os elementos estruturais que têm a função básica de receber as cargas de utilização das edificações, aplicadas nos pisos, e transmiti-las às vigas.” Em um modelo básico, as cargas são transmitidas das vigas aos pilares e destes às fundações. Ainda segundo o autor, lajes são elementos planos e de espessura muito inferior às outras dimensões no plano perpendicular à essa.

Campos Filho (2014, p. 1) define as lajes como segue:

“As lajes são elementos estruturais laminares planos, solicitados predominantemente por cargas normais ao seu plano médio. Elas constituem os pisos dos edifícios correntes de concreto armado. Nas estruturas laminares planas, predominam duas dimensões, comprimento e largura, sobre a terceira que é a espessura. De mesma forma, que as vigas são representadas pelos seus eixos, as lajes são representadas pelo seu plano médio. As lajes são diferenciadas pela sua forma, vinculação e relação entre os lados. Geralmente, nas estruturas correntes, as lajes são retangulares, mas podem ter forma trapezoidal ou em L.”

Souza e Cunha (1998, p. 23) classificam as lajes quanto à forma, natureza, tipo de apoio e tipo de armação:

- a) quanto à forma: lajes retangulares, quadradas, triangulares, em “L”, circulares, etc.;
- b) quanto à natureza: lajes maciças, nervuradas, mistas, em grelha, duplas e pré-fabricadas;
- c) quanto ao tipo de apoio: lajes de apoio contínuo, discreto e em apenas um trecho da área;
- d) quanto ao tipo de armação: lajes armadas em uma só direção ou em duas direções.

No presente trabalho, as lajes serão subdivididas nos dois grandes grupos de maciças e nervuradas, visto que essas são as soluções construtivas alvo da análise comparativa.

3.1 LAJES MACIÇAS

3.1.1 Definição

Araújo (2010a, p. 2) define as lajes maciças como:

“As lajes maciças são placas de espessura uniforme, apoiadas ao longo do seu contorno. Os apoios podem ser constituídos por vigas ou por alvenarias, sendo este o tipo de laje predominante nos edifícios residências onde os vãos são relativamente pequenos.”

Segundo Bastos (2015, p. 1), “Laje maciça é aquela onde toda a espessura é composta por concreto, contendo armaduras longitudinais de flexão e eventualmente armaduras transversais, e apoiada em vigas ou paredes ao longo das bordas”.

3.1.2 Classificação

3.1.2.1 Classificação quanto à direção principal

Araújo (2010a, p. 5-7) diz que, ao ser aplicada uma carga p a uma laje, de dimensões l_x e l_y , e admitindo-se que os apoios tenham grande rigidez, a flecha no centro da laje é única, mesmo que essa possua vãos distintos e, portanto, curvaturas distintas nas duas direções. Disso, conclui-se que o momento fletor solicitante é mais elevado na direção do menor vão da laje, originando a classificação quanto à sua armação, em: lajes armadas em uma direção e lajes armadas em duas direções (em cruz).

3.1.2.1.1 Lajes armadas em uma direção

As lajes armadas em uma direção são usualmente definidas como aquelas em que a relação entre o vão maior e o vão menor é superior a 2. Mais precisamente, são as lajes cuja deformada tem aspecto cilíndrico. Nesse caso, o momento na direção do vão maior tem valor bem reduzido e não requer cálculo, bastando apenas armaduras de distribuição nessa direção (ARAÚJO, 2010a, p. 7-8). Apesar do nome dado a essas lajes, o autor salienta que são projetadas armaduras em ambas as direções, porém os cálculos são necessários apenas para a direção do menor vão.

3.1.2.1.2 Lajes armadas em duas direções

As lajes armadas em duas direções são comumente identificadas como aquelas em que a relação entre l_x (menor vão) e l_y (maior vão) não é superior a 2. Com maior exatidão, define-se essas como as lajes cuja deformada apresenta dupla curvatura. Nessa situação, os dois momentos fletores devem ser calculados para o dimensionamento adequado das armaduras em cada eixo (ARAÚJO, 2010a, p. 7). Esta situação será abordada no presente trabalho.

3.1.2.2 Classificação quanto à vinculação

Segundo Campos Filho (2014), as extremidades das lajes podem ser classificadas em três tipos, de acordo com sua forma de vinculação:

- a) livres: são nomeadas livres as extremidades das lajes que não se encontrem suportadas por qualquer tipo de apoio;
- b) apoiadas: são ditas apoiadas as extremidades das lajes que são suportadas em toda a sua extensão por vigas ou paredes portantes;
- c) engastadas: são consideradas engastadas as extremidades das lajes que têm continuidade com a laje adjacente.

Os objetos de estudo do trabalho considerarão o caso em que as lajes estão apoiadas em todos os seus contornos.

3.1.3 Espessura mínima

De acordo com Araújo (2010a, p. 169), as lajes maciças devem ter sua espessura dimensionada de forma a limitar sua deformação e evitar vibrações que causem desconforto aos usuários. Além disso, procura-se dimensionar os elementos com espessuras suficientes para evitar a necessidade da inclusão de armaduras superiores.

A espessura mínima para lajes maciças de CA deve ser, segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014):

- 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.

3.2 LAJES NERVURADAS

3.2.1 Definição

De acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 97) “Lajes nervuradas são as lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte.”.

Segundo Araújo (2014, p. 193-194), as lajes nervuradas têm sua aplicação justificada para grandes vãos (acima de 8 metros, aproximadamente), casos nos quais a utilização de lajes maciças torna-se antieconômica, devido à elevada espessura necessária para obter o desempenho desejado, que resulta em um carregamento de grandes magnitudes oriundo do peso próprio da estrutura. Citando Figueiredo Filho (1989, p. 8):

“O custo é um dos aspectos mais importantes a se considerar em uma obra. Se vários sistemas estruturais apresentarem desempenho satisfatório em relação aos requisitos anteriores, será melhor aquele que proporcionar menor custo no confronto com os demais, tanto da própria estrutura quanto contribuindo para a redução dos custos dos outros elementos componentes do edifício, sem perda da qualidade construtiva e da segurança.”

Ainda de acordo com Araújo (2014, p. 193), a utilização ou não de materiais inertes de baixo peso específico em relação ao do concreto (tijolos cerâmicos furados, blocos de isopor, etc.) é responsável apenas pela planificação da superfície externa da laje.

3.2.2 Classificação

3.2.2.1 Classificação quanto à direção principal

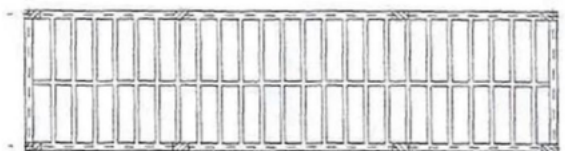
Quanto ao posicionamento das nervuras em planta, as lajes nervuradas podem ser classificadas como lajes nervuradas unidirecionais (LNU) e lajes nervuradas bidirecionais (LNB).

3.2.2.1.1 Lajes nervuradas unidirecionais

Nas lajes nervuradas armadas em uma direção (Figura 1), normalmente as nervuras apresentam-se na direção do menor vão. Além disso, elas comportam-se, estruturalmente, como vigas

simplesmente apoiadas e independentes. Sua utilização mais recorrente dá-se quando um dos vãos supera muito o outro em dimensão (CARVALHO; PINHEIRO, 2009, p. 42).

Figura 1 - Vista superior de laje nervurada armada em uma direção

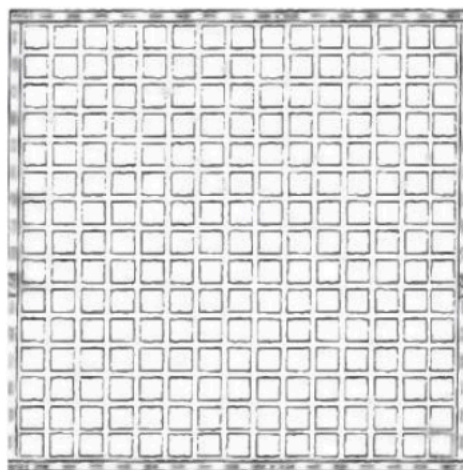


(fonte: adaptado de CARVALHO; PINHEIRO, 2009, p. 43)

3.2.2.1.2 Lajes nervuradas bidirecionais

As lajes nervuradas armadas em duas direções (Figura 2) são utilizadas quando a relação entre os vãos das duas direções for inferior a 2. Comumente, dispõe-se as nervuras paralelamente às bordas e ortogonais entre si (CARVALHO; PINHEIRO, 2009, p. 43). Este será o caso estudado no presente trabalho.

Figura 2 - Vista superior de laje nervurada armada em duas direções



(fonte: adaptado de CARVALHO; PINHEIRO, 2009, p. 44)

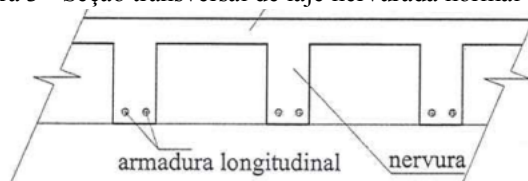
3.2.2.2 Classificação quanto à posição das nervuras

Quanto à posição das nervuras na seção transversal, as lajes nervuradas podem ser classificadas em 3 categorias diferentes: normais, invertidas e duplas. Neste trabalho, a abordagem será restrita a uma laje nervurada normal (direta).

3.2.2.2.1 Lajes nervuradas normais

As lajes nervuradas normais (Figura 3) são aquelas constituídas de mesa superior de concreto e nervuras na parte inferior, sendo os espaçamentos entre as nervuras preenchidos por blocos inertes sem função estrutural ou vazios (CARVALHO; PINHEIRO, 2009, p. 18). Por ser o modelo mais usual, este será o abordado nos estudos realizados.

Figura 3 - Seção transversal de laje nervurada normal (direta)

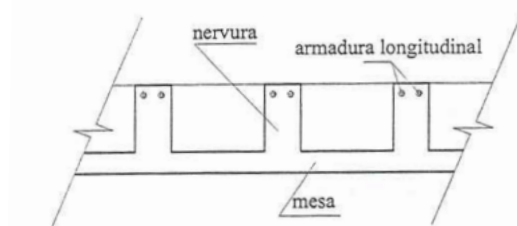


(fonte: adaptado de CARVALHO; PINHEIRO, 2009, p. 18)

3.2.2.2.2 Lajes nervuradas invertidas

As lajes nervuradas invertidas (Figura 4) são executadas de modo que a mesa de concreto fique na parte inferior e as nervuras na parte superior. Os espaços entre as nervuras, do mesmo modo que nas lajes normais, podem ser preenchidos por blocos inertes sem função estrutural ou permanecerem vazios. Sua execução é complexa e sua aplicação é restrita para casos de lajes em balanço (CARVALHO; PINHEIRO, 2009, p. 18).

Figura 4 - Seção transversal de laje nervurada invertida

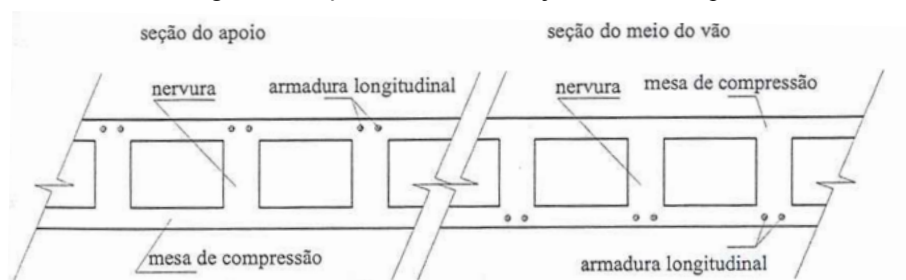


(fonte: adaptado de CARVALHO; PINHEIRO, 2009, p. 19)

3.2.2.2.3 Lajes nervuradas duplas ou lajes caixaõ

As lajes nervuradas duplas (Figura 5) são aquelas em que as nervuras se situam entre duas mesas de concreto. Nestas, os espaços entre as nervuras são ocupados por materiais de preenchimento ou, também, podem permanecer vazios, o que acarreta no descarte das formas utilizadas. Dada a dificuldade na execução desse tipo de laje, a solução encontra-se praticamente em desuso. (CARVALHO; PINHEIRO, 2009, p. 19)

Figura 5 - Seção transversal de laje nervurada dupla



(fonte: adaptado de CARVALHO; PINHEIRO, 2009, p. 19)

3.2.2.3 Classificação quanto à vinculação

Quanto à vinculação nas extremidades, a classificação das lajes nervuradas segue o mesmo padrão das lajes maciças, assunto abordado no item 3.1.2.2.

3.2.3 Vantagens e desvantagens

Visto que as lajes nervuradas são um sistema construtivo com comportamento semelhante ao de lajes maciças, mas de eficiência assemelhada às vigas de flexão, Carvalho e Pinheiro (2009, p. 13-14) destacam as seguintes vantagens em relação aos métodos construtivos alternativos:

- a) permite vencer grandes vãos, liberando espaços, o que é vantajoso em locais como garagens, onde pilares, além de dificultarem as manobras dos veículos, ocupam regiões que serviriam para vagas;
- b) podem ser construídas com a mesma tecnologia empregada nas lajes maciças, diferentemente das lajes protendidas, que exigem técnicas específicas de execução;
- c) tem grande versatilidade de aplicações, podendo ser utilizadas em pavimentos de edificações comerciais, residenciais, educacionais, hospitalares, garagens etc.;
- d) são também adequadas aos sistemas de lajes sem vigas, em que podem ser necessárias regiões maciças apenas nas regiões dos pilares, onde há grande concentração de tensões;
- e) consomem menos concreto e aço que outros sistemas similares, diminuindo o peso próprio e aliviando as fundações;
- f) pelas suas características (grande altura e pequeno peso próprio), podem suportar cargas mais elevadas que as demais.

Como principais desvantagens, relata-se a dificuldade na passagem de tubulações e o incremento na altura de cada andar e da edificação como um todo (CARVALHO; PINHEIRO, 2009, p. 14).

3.2.4 Recomendações técnicas específicas

A respeito das espessuras, a NBR 6118 estabelece os seguintes limites (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 74):

- a) a espessura da mesa, quando não existirem tubulações horizontais embutidas, deve ser maior ou igual a $1/15$ da distância entre as faces das nervuras (l_0) e não menor que 4 cm;
- b) o valor mínimo absoluto da espessura da mesa deve ser 5 cm, quando existirem tubulações embutidas de diâmetro menor ou igual a 10 mm. Para tubulações com diâmetro \emptyset maior que 10 mm, a mesa deve ter a espessura mínima de $4 \text{ cm} + \emptyset$, ou $4 \text{ cm} + 2 \emptyset$ no caso de haver cruzamento destas tubulações;
- c) a espessura das nervuras não pode ser inferior a 5 cm;
- d) nervuras com espessura menor que 8 cm não podem conter armadura de compressão.

Para o projeto, na mesma norma constam as seguintes condições (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 75):

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

Para as armaduras, a NBR 6118 só estabelece distinção entre lajes maciças e nervuradas quanto aos estribos, onde especifica que para as lajes nervuradas o espaçamento entre eles não deve ser superior a 20 cm (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 169).

4 MATERIAIS

4.1 CONCRETO

A seguir são expostas propriedades importantes do concreto, constantes na NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

4.1.1 Massa específica

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) orienta que, caso a massa específica real do concreto não seja conhecida, sejam adotados os valores para cálculos de 2400 kg/m³ para o concreto simples e 2500 kg/m³ para o concreto armado.

4.1.2 Resistência à compressão

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) define as classes C20 e C25 como as de resistências mínimas à compressão para estruturas de concreto armado e protendido, respectivamente. Concretos com resistências inferiores, como o C15, podem ser utilizados apenas em obras provisórias ou de fins não estruturais.

A norma brasileira cita ainda que, para idades não indicadas de concretos, deve ser considerada a resistência referente à idade de 28 dias.

Para concretos de idades superiores a 28 dias, adota-se a expressão (1) para a estimativa da resistência à compressão de cálculo do concreto:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (1)$$

Sendo:

f_{cd} : resistência à compressão de cálculo, em MPa;

f_{ck} : resistência característica à compressão, em MPa;

γ_c : coeficiente de ponderação da resistência, usualmente 1,4.

4.1.3 Resistência à tração

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) divide os cálculos da resistência do concreto à tração em dois grupos: concretos de classes até C50 e concretos de classes C55 até C90. Respectivamente, as duas equações são:

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (2)$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + 0,11 \cdot f_{ck}) \quad (3)$$

Sendo:

f_{ctm} : resistência à tração média do concreto, em MPa.

Das equações (2) e (3) acima, obtém-se os limites de tração inferior e superior característicos, conforme segue nas fórmulas (4) e (5):

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ct,m} \quad (4)$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 \cdot f_{ct,m} \quad (5)$$

Sendo:

$f_{ctk,inf}$: resistência característica inferior à tração do concreto, em MPa

$f_{ctk,sup}$: resistência característica superior à tração do concreto, em MPa

f_{ctm} : resistência à tração média do concreto, em MPa.

4.1.4 Módulo de elasticidade

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) regulamenta o cálculo de estimativa do módulo de elasticidade inicial segundo as equações (6) e (7) a seguir, sendo a primeira para concretos de classe C20 à C50 e a segunda para os concretos de classe C55 à C90:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (6)$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

Sendo:

E_{ci} : módulo de elasticidade inicial do concreto, em MPa;

α_E : coeficiente que considera a influência do agregado empregado;

f_{ck} : resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

Os coeficientes α_E são definidos de acordo com a composição dos agregados, conforme segue:

- a) $\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio;
- b) $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse;
- c) $\alpha_E = 0,9$ para calcário;
- d) $\alpha_E = 0,7$ para arenito.

A partir do E_{ci} , pode ser estimado o módulo de deformação secante (E_{cs}) pela expressão (8):

$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad (8)$$

Sendo:

E_{cs} : módulo de elasticidade secante do concreto, em MPa;

α_i : coeficiente de minoração do módulo de elasticidade inicial;

O coeficiente α_i pode ser definido pela expressão (9):

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (9)$$

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) apresenta a Tabela 1 a seguir para valores estimados já arredondados de módulos de elasticidade inicial e secante e coeficiente de minoração do E_{ci} , para concretos cujo agregado graúdo seja o granito, e que podem ser aplicados em projetos estruturais, de forma a simplificar os cálculos:

Tabela 1 – E_{ci} , E_{cs} e α_i para diferentes classes de resistência de concreto armado

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

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p.25)

4.2 AÇO

4.2.1 Tipos de aço

Para as armaduras passivas em estruturas de concreto armado, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) restringe o uso do aço a três categorias de resistência, que são: CA-25, CA-50 e CA-60, cujas resistências à tração são de 250, 500 e 600 MPa, respectivamente.

4.2.2 Critérios normatizados

Nos itens subsequentes, serão expostos alguns critérios e recomendações constantes na NBR 6118 para as armaduras.

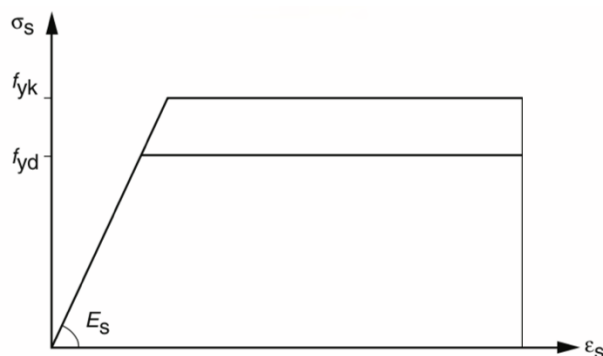
4.2.2.1 Superfície aderente

A supracitada norma diz que os fios e barras de aço podem ser lisos, entalhados ou providos de saliências, de forma a resultar em diferentes capacidades de aderência ao concreto. O presente trabalho limita-se a dimensionamentos com barras de aço dotadas de nervuras.

4.2.2.2 Diagrama tensão-deformação

A norma permite a utilização do diagrama simplificado (Figura 6) para o cálculo das armaduras no ELU e no ELS, tanto para os aços com ou sem patamar de escoamento. O diagrama aplica-se tanto para tração quanto para compressão e é válido para temperaturas situadas no intervalo entre -20 °C e 150 °C.

Figura 6 – Diagrama tensão-deformação para aços de armaduras passivas



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p.29)

Sendo:

f_{yk} : tensão característica de escoamento do aço;

f_{yd} : tensão de cálculo de escoamento do aço;

σ_s : tensão normal no aço de armadura;

E_s : módulo de elasticidade da armadura;

ϵ_s : deformação da armadura.

4.2.2.3 Massa específica

A massa específica do aço estrutural, de acordo com a norma, é de 7850 kg/m³.

4.2.2.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade, na falta de ensaios ou informações do fabricante, pode ser admitido como igual a 210 GPa, segundo a norma.

5 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

Os diversos critérios essenciais que foram seguidos para o dimensionamento das lajes são descritos no decorrer deste capítulo.

5.1 COBRIMENTOS MÍNIMOS

Araújo (2010a, p. 167-168) diz que a durabilidade das armaduras depende da qualidade do concreto, sendo esta garantida por características como boa compactação e baixa permeabilidade. O cobrimento das armaduras deve seguir as seguintes exigências, para armaduras passivas, da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014):

- a) ser igual ou superior à bitola da armadura adotada;
- b) ser igual ou superior à bitola de um feixe de barras.

Ainda, a referida norma estabelece critérios de cobrimentos mínimos (Tabela 3) de acordo com as classes de agressividade ambiental do local da edificação, explicitados na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação das classes de agressividade ambiental de acordo com o ambiente de inserção da edificação

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

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

Tabela 3 – Espessura dos cobrimentos para cada classe de agressividade ambiental

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje	20	25	35	45
Concreto Protendido	Laje	25	30	40	50

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 20)

5.2 AÇÕES ATUANTES NA ESTRUTURA

De acordo com a NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), as ações nas estruturas podem ser divididas em três grupos, de acordo com sua variabilidade no decorrer do tempo, que são: ações permanentes, ações variáveis e ações excepcionais.

5.2.1 Ações permanentes (g)

De acordo com a NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), as ações permanentes “[...] ocorrem com valores constantes ou de pequena variação em torno de sua média, durante praticamente toda a vida da construção.” Sua variabilidade é medida através de amostragens de construções análogas. Podem, ainda, ser subdividas em diretas e indiretas, conforme segue:

- a) ações permanentes diretas: pesos próprios de elementos construtivos, peso dos equipamentos fixos e empuxos devidos ao peso próprio de terras não removíveis e ações permanentes aplicadas a estas;
- b) ações permanentes indiretas: protensão, recalques de apoio e retração de materiais.

Neste grupo encontram-se as cargas de peso próprio e revestimentos.

5.2.1.1 Peso próprio

Araújo (2010a, p. 25) diz que o peso próprio das lajes de concreto armado é determinado em função do peso específico constante na NBR 6120 e das dimensões da laje, sendo o primeiro igual a 25 kN/m^3 .

5.2.1.2 Revestimentos

Segundo Araújo (2010a, p. 25-26), analogamente ao peso próprio das lajes, determina-se o peso dos revestimentos, dependendo dos materiais empregados e da espessura das camadas. Usualmente, para pisos cerâmicos ou tacos de madeira pode-se adotar valores entre $0,8 \text{ kN/m}^2$ a $1,0 \text{ kN/m}^2$.

5.2.2 Ações variáveis (q)

De acordo com a NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), são “ações que ocorrem com valores que apresentam variações significativas em torno de sua média, durante a vida da construção.” Podem ser subdivididas em normais e especiais, em função da sua probabilidade de ocorrência durante a vida da edificação, conforme segue:

- a) ações variáveis normais: são aquelas com probabilidade de ocorrência grande o suficiente para serem obrigatoriamente consideradas no projeto estrutural de uma edificação;
- b) ações variáveis especiais: são ações como ações sísmicas e outras cargas da natureza ou cargas com intensidades especiais, que devem ser consideradas para as estruturas cabíveis.

Os carregamentos decorrentes do uso a serem considerados para diferentes ocupações de edificações têm seus valores mínimos estabelecidos na NBR 6120 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980). A Tabela 4 descreve as cargas que serão utilizadas posteriormente no dimensionamento das lajes a serem estudadas neste trabalho.

Tabela 4 - Cargas verticais acidentais conforme o uso da edificação

Local		Carga (kN/m ²)
Arquibancadas		4,0
Edifícios residenciais	Dormitórios, sala, copa, cozinha e banheiros	1,5
	Dispensa, área de serviço e lavanderia	2,0
Escadas	Com acesso ao público	3,0
	Sem acesso ao público	2,5
Corredores	Com acesso ao público	3,0
	Sem acesso ao público	2,0
Escritórios	Salas de uso geral e banheiro	2,0
Garagens e estacionamentos	Para veículos de passagem ou semelhantes com carga máxima de estacionamentos de 25 kN por veículo	3,0

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980)

5.2.3 Ações excepcionais

Citando a NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 16):

[...] ações excepcionais são as que têm duração extremamente curta e muito baixa probabilidade de ocorrência durante a vida da construção, mas que devem ser consideradas nos projetos de determinadas estruturas.

Nessa categoria são consideradas ações como explosões, choques de veículos, enchentes ou sismos excepcionais.

5.3 COMBINAÇÃO DE AÇÕES

De acordo com as classificações das cargas descritas nos itens 5.2.1 a 5.2.3, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) recomenda o emprego de diferentes combinações de ações para cargas permanentes e acidentais. Para as combinações últimas normais, utiliza-se a equação (10):

$$F_d = \gamma_g \cdot F_{gk} + \gamma_q \cdot F_{q1} + \sum_{k=2}^n \gamma_q \cdot \psi_0 \cdot F_{qk} \quad (10)$$

sendo:

F_d : valor da combinação de cálculo adotada;

F_{gk} : valor característico das ações permanentes;

F_{q1} : valor característico da ação principal variável adotada;

k: índice da ação variável;

n: número total de ações variáveis;

F_{qk} : valor característico da ação variável de índice k;

ψ_2 : coeficiente de minoração que relaciona a ação das cargas variáveis simultaneamente (Tabela 5);

γ_g e γ_q : coeficientes de majoração, no geral igual a 1,4.

Tabela 5 – Valores do coeficiente ψ_2 para as cargas acidentais de edifícios

Ações		ψ_0
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^a	0,5
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ^b	0,7
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8

^a Edifícios residenciais.

^b Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 65)

5.4 CRITÉRIOS PARA AS ARMADURAS

Para as lajes em concreto armado, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) faz as seguintes recomendações de projeto:

- a) os diâmetros das barras de aço não devem ultrapassar 1/8 da altura da laje;
- b) em lajes armadas em duas direções, o espaçamento máximo entre barras deve ser limitado a 20 cm ou o dobro da altura da laje;
- c) para armaduras principais de lajes armadas em uma direção, armaduras negativas ou de borda, deve-se prever uma armadura de distribuição determinada pelo maior entre os seguintes valores,
 - 20% da armadura atuante na direção perpendicular;
 - 0,9 cm²/m;
 - armadura mínima;
- d) o comprimento das armaduras negativas em cada lado deve ser equivalente a 1/4 do maior dos menores vãos das lajes adjacentes;
- e) nas bordas da laje deve-se prever armaduras de canto com comprimento equivalente a 1/5 do menor vão da laje.

5.5 TAXAS MÍNIMAS DE ARMADURA

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) fornece, como forma de simplificação de cálculos, duas tabelas para a determinação da taxa mínima de armaduras para as estruturas (ρ_{\min}). A Tabela 6 fornece valores de ρ_{\min} para uma seção retangular a ser projetada com aço CA-50, em função da classe de resistência do concreto utilizado.

Tabela 6 - Valores de ρ_{\min} em função do concreto utilizado

Forma da seção	Valores de ρ_{\min} ($A_s, \min/A_c$) %														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retang.	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

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

A Tabela 7 exhibe os critérios específicos de armaduras mínimas a serem atendidos para as lajes de concreto armado.

Tabela 7 – Taxas específicas de armadura mínima

Armadura	Elementos estruturais sem armaduras ativas	Elementos estruturais com armadura ativa aderente	Elementos estruturais com armadura ativa não aderente
Armaduras negativas	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}}$	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}} - \rho_p$ $\geq 0,67 \rho_{\text{mín}}$	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}} - 0,5 \rho_p$ $\geq 0,67 \rho_{\text{mín}}$
Armaduras negativas de bordas sem continuidade	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\text{mín}}$		
Armaduras positivas de lajes armadas nas duas direções	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\text{mín}}$	$\rho_s \geq 0,67 \rho_{\text{mín}} - \rho_p$ $\geq 0,5 \rho_{\text{mín}}$	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}} - 0,5 \rho_p$ $\geq 0,5 \rho_{\text{mín}}$
Armadura positiva (principal) de lajes armadas em uma direção	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}}$	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}} - \rho_p \geq 0,5 \rho_{\text{mín}}$	$\rho_s \geq \rho_{\text{mín}} - 0,5 \rho_p$ $\geq 0,5 \rho_{\text{mín}}$
Armadura positiva (secundária) de lajes armadas em uma direção	$A_s/s \geq 20\%$ da armadura principal $A_s/s \geq 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ $\rho_s \geq 0,5 \rho_{\text{mín}}$		–

onde

$$\rho_s = A_s/b_w h \text{ e } \rho_p = A_p/b_w h.$$

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 158)

5.6 TAXAS MÁXIMAS DE ARMADURA PARA FLEXÃO

A NBR 6118 determina que a soma das armaduras de tração e compressão (A_s e A_s') possuam valor de, no máximo, 4% da área da seção de concreto (A_c), de modo a assegurar as condições mínimas de ductilidade regulamentadas pela referida norma.

5.7 DESLOCAMENTOS

No projeto de lajes e outras estruturas em concreto armado, deve-se respeitar certos limites de deslocamentos estabelecidos pela NBR 6118 (Tabela 8), que, de acordo com Araújo (2010a, p. 160), visam garantir o conforto dos usuários da edificação, sua utilização adequada e prevenir

danos a elementos não estruturais, além de garantirem a hipótese de pequenos deslocamentos, que é comumente considerada válida para as estruturas.

Tabela 8 – Limites de deslocamentos

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	1/250
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas acidentais	1/350
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	1/250
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	1/350 + contraflecha
			Ocorrido após a construção do piso	1/600
	Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento

onde:

l : comprimento teórico para lajes em balanço ou menor vão da laje nos demais casos.

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 77)

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) estabelece que, para determinar a influência do tempo nos deslocamentos das estruturas, deve-se calcular a flecha diferida, através da multiplicação da flecha imediata pelo coeficiente α_f . Esse coeficiente é determinado pela equação (11):

$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1 + 50\rho'} \quad (11)$$

Onde:

ρ' : taxa de armadura de compressão da seção;

$\Delta\xi$: $\xi(t) - \xi(t_0)$;

ξ : coeficiente em função do tempo, estabelecido pela Tabela 9;

Tabela 9 – Valores do coeficiente ξ em função do tempo de aplicação das cargas

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

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p.127)

A flecha total é obtida pela soma da flecha imediata (W_0) com a flecha diferida no tempo:

$$W_\infty = (1 + \alpha_f) \cdot W_0 \quad (12)$$

5.8 ESTADOS LIMITES

De acordo com Bessa (2014, p. 15), “Uma estrutura, ou parte dela, é considerada inadequada à sua finalidade quando ela atinge um estado particular, dito estado limite, no qual ela não atende critérios condicionantes ao seu comportamento ou ao seu uso.” No dimensionamento de estruturas de concreto armado, objetiva-se garantir, simultaneamente, estabilidade, conforto e durabilidade.

5.8.1 Estados limites últimos

Os estados limites últimos, de acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), dizem respeito quanto à segurança diante da ruptura da estrutura. São os estados que determinam a capacidade máxima portante, com as cargas majoradas e as resistências dos materiais minoradas. Na NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), os ELU são caracterizados por:

- a) perda de equilíbrio, global ou parcial, admitida a estrutura como um corpo rígido;
- b) ruptura ou deformação plástica excessiva dos materiais;
- c) transformação da estrutura, no todo ou em parte, em sistema hipostático;
- d) instabilidade por deformação;
- e) instabilidade dinâmica.

5.8.2 Estados limites de serviço

Os estados limites de serviço dizem respeito à utilização da estrutura, visto que, ao atingir esse estado, a mesma deixa de apresentar as características esperadas de conforto e durabilidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

A NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003) cita que os estados limites de serviço têm decorrência de ações com três possíveis ordens de grandeza de permanência na estrutura, que são:

- a) combinações quase permanentes: podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura;
- b) combinações frequentes: se repetem muitas vezes durante o período de vida da estrutura;
- c) combinações raras: atuam no máximo algumas horas durante o período de vida da estrutura.

5.9 SEGURANÇA

De acordo com a NBR 8681 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003), devem ser aplicados coeficientes parciais de segurança (γ_{m1} , γ_{m2} , γ_{m3}) para garantir a resistência das estruturas, que levam em conta os seguintes itens:

- a) γ_{m1} : considera a variabilidade da resistência efetiva;
- b) γ_{m2} : considera a diferença entre as resistências efetivas de materiais e estruturas e as obtidas em corpos-de-prova padronizados;
- c) γ_{m3} : considera as incertezas na determinação das solicitações existentes, tanto em decorrência dos métodos construtivos ou dos métodos de cálculo empregados.

Utiliza-se γ_m como o produto dos três coeficientes intermediários listados acima. Este valor é padronizado para o ELU pela NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), separadamente para o concreto (γ_c) e para o aço (γ_s), conforme a Tabela 10 abaixo:

Tabela 10 - Valores dos coeficientes γ_c do concreto e γ_s do aço

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

(fonte: adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 65)

Para o ELS, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) determina que os limites não necessitam de minoração e, portanto, γ_m deve ser considerado igual a 1,0.

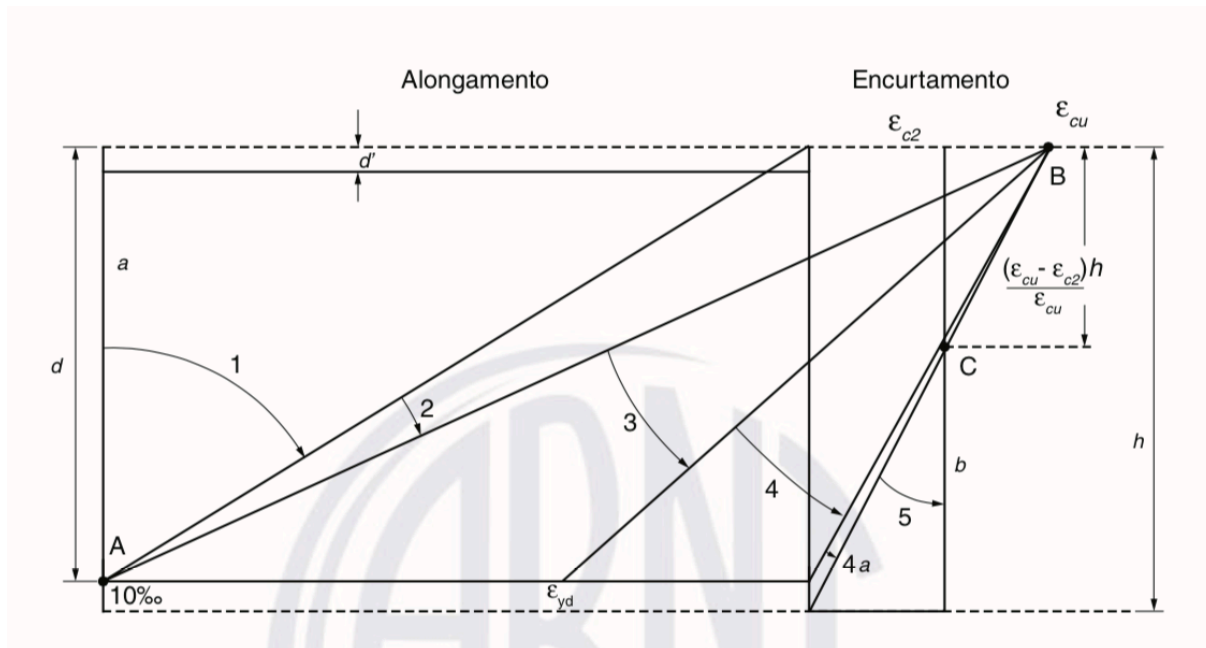
5.10 HIPÓTESES

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) define algumas hipóteses básicas que devem ser consideradas na análise dos esforços resistentes (N_{Rd} , M_{Rd}) de uma seção de viga ou pilar. As hipóteses pertinentes ao dimensionamento de estruturas de concreto armado com armaduras passivas são (adaptado do item 17.2.2 da norma):

- a) as seções transversais se mantêm planas após a deformação;
- b) a deformação das barras passivas aderentes em tração ou compressão deve ser a mesma do concreto em seu entorno;
- c) as tensões de tração no concreto que forem normais à seção transversal devem ser desprezadas no dimensionamento no ELU;
- d) a distribuição de tensões no concreto é feita de acordo com o diagrama parábola retângulo e este admite tensão de pico igual a $0,85 f_{cd}$;
- e) a tensão nas armaduras deve ser obtida a partir dos diagramas de tensão-deformação;
- f) o ELU é caracterizado quando a distribuição das deformações na seção transversal for definida em um dos domínios de deformação caracterizados no item 5.10.

O diagrama de deformações específicas de um elemento de concreto armado pode assumir diversas configurações, dependendo de suas solicitações. A cada região distinta do diagrama dá-se o nome de domínio de deformação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). A representação esquemática dos domínios é apresentada na Figura 7.

Figura 7 – Domínios de deformação do concreto armado



(fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, p. 122)

De acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), há duas caracterizações de ruptura compreendidas pelo diagrama para classificar os diferentes domínios de deformação de uma estrutura, conforme segue:

- a) Ruptura convencional por deformação plástica excessiva: reta *a*, domínio 1 e domínio 2;
- b) Ruptura convencional por encurtamento-limite do concreto: domínio 3, domínio 4, domínio 4a, domínio 5 e reta *b*.

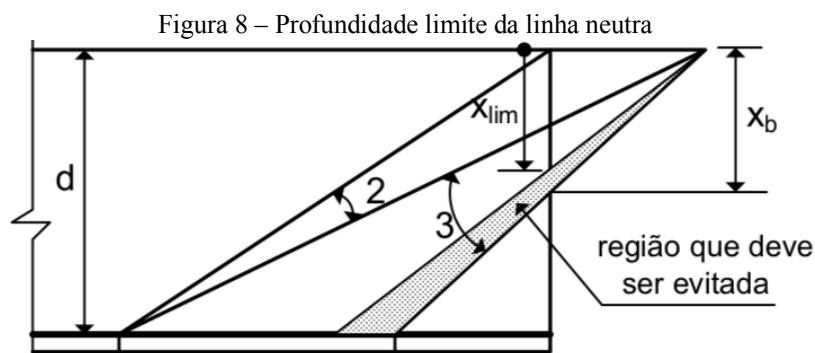
As retas *a* e *b* e os domínios podem ser definidos como (adaptado da NBR 6118):

- a) reta *a*: tração uniforme;
- b) domínio 1: tração não uniforme, sem compressão;
- c) domínio 2: flexão simples ou composta sem ruptura à compressão do concreto ($\epsilon_c < \epsilon_{cu}$ e com o máximo alongamento permitido)

- d) domínio 3: flexão simples (seção subarmada) ou composta com ruptura à compressão do concreto e com escoamento do aço ($\epsilon_s \geq \epsilon_{yd}$);
- e) domínio 4: flexão simples (seção superarmada) ou composta com ruptura à compressão do concreto e aço tracionado sem escoamento ($\epsilon_s < \epsilon_{yd}$);
- f) domínio 4a: flexão composta com armaduras comprimidas;
- g) domínio 5: compressão não uniforme, sem tração;
- h) reta b: compressão uniforme.

Os elementos estruturais em concreto armado projetados segundo as premissas do domínio 3 são as de melhor desempenho econômico, visto que tiram o proveito otimizado das resistências dos materiais.

Além disso, Araújo (2010a) explica que as rupturas das estruturas que ocorrem nos domínios 2 e 3 são de caráter dúctil, ou seja, apresentam sinais de falha antes que ocorra o colapso. Isso é desejável por questões de segurança, portanto procura-se dimensionar os elementos de forma a assegurar que a deformação do concreto fique afastada do domínio 4. Para que isso ocorra, é definido um valor limite para a profundidade da linha neutra, de forma que a distância do dimensionamento na região do domínio 4 seja assegurada. Esse valor é identificado por x_{lim} (Figura 8).



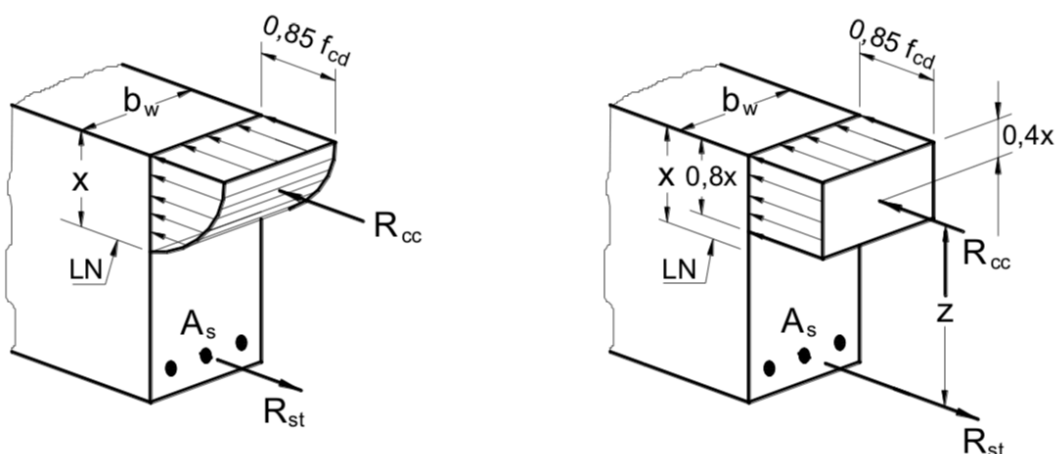
(fonte: adaptado de ARAÚJO, 2010b, p. 94)

5.11 DIAGRAMA RETANGULAR SIMPLIFICADO

Segundo a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), o diagrama de tensão de compressão do concreto, de formato parábola-retângulo, pode ser simplificado para o formato retangular, conforme a Figura 9. Ao ser realizada essa conversão, a profundidade da região de concentração dos esforços de compressão no concreto (y) é reduzida a 80% da profundidade (x) da linha neutra (LN).

Os equacionamentos da próxima seção serão realizados de acordo com o equilíbrio de forças e momentos do diagrama retangular, visto que a rotina de cálculos é simplificada. As equações derivam da equivalência das resultantes de tração (R_{st}) e compressão (R_{cc}) do concreto. A largura da seção é identificada por b_w , as armaduras de tração por A_s e o afastamento entre as resultantes por z . A representação da Figura 9 é válida para os concretos de resistência máxima de 50 MPa (caso estudado no presente trabalho) e seção cuja largura b_w seja constante, de modo que a tensão máxima de compressão seja igual a $0,85f_{cd}$, sendo f_{cd} a resistência de cálculo à compressão do concreto.

Figura 9 – Distribuição de tensões de compressão no concreto segundo os diagramas parábola-retângulo e retangular simplificado



(fonte: adaptado de BASTOS, 2015)

5.12 CONDIÇÕES DE DUTILIDADE

De acordo com o especificado na NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), para que a estrutura apresente comportamento dúctil adequado, a posição da linha neutra deve obedecer aos seguintes limites:

- $x_{dúctil} \leq 0,45.d$, para concretos de f_{ck} até 50 MPa;
- $x_{dúctil} \leq 0,35.d$, para concretos de f_{ck} entre 50 e 90 MPa.

6 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO

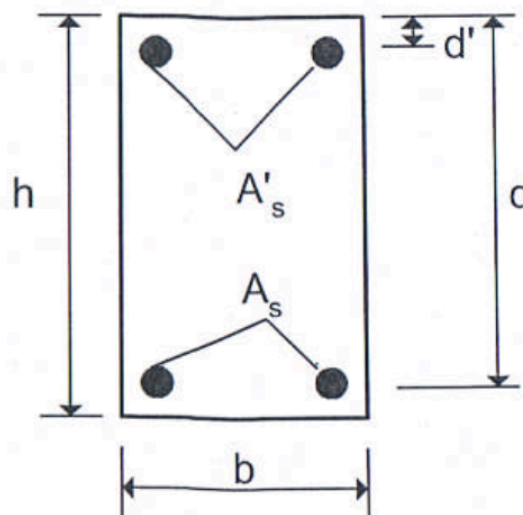
De acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), a análise das estruturas deve ser feita através de um modelo estrutural compatível com o objeto de análise. Dependendo da complexidade do projeto, mais de um modelo pode ser necessário para o dimensionamento.

O modelo de estudo deve representar, adequadamente, a geometria, os carregamentos, as condições de contorno da estrutura e as características dos materiais empregados, de modo a dar a confiabilidade de projeto desejada. Para isso, as lajes maciças são dimensionadas conforme os critérios para seções retangulares e, como pode ser inferido, as lajes nervuradas são analisadas conforme os critérios de seções T.

6.1 SEÇÃO RETANGULAR

Para uma dada seção retangular (Figura 10), são definidos os seguintes parâmetros geométricos:

Figura 10 - Geometria da seção retangular



(fonte: ARAÚJO, 2010b, p. 106)

- a) b : largura da seção;
- b) h : altura da seção;

- c) d : distância entre a fibra mais comprimida da seção e o centro geométrico das armaduras de tração;
- d) d' : distância entre a fibra mais comprimida da seção e o centro geométrico das armaduras de compressão;
- e) A_s : armadura de tração;
- f) A_s' : armadura de compressão.

6.1.1 Armadura simples

Para o cálculo da armadura positiva de resistência aos esforços de flexão, a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) estabelece as seguintes expressões:

$$A_s = \frac{\alpha_c \cdot f_{cd} \cdot b \cdot y}{f_{yd}} \quad (13)$$

$$y = d - \sqrt{d^2 - \frac{M_d}{0,425 \cdot b \cdot f_{cd}}} \quad (14)$$

O parâmetro de redução da resistência do concreto na compressão (α_c) é admitido como 0,85 para concretos de classes até C50 e, para classes de resistência de C50 até C90, é calculado como segue:

$$\alpha_c = 0,85 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck} - 50}{200} \right] \quad (15)$$

Sendo:

A_s : armadura de flexão a ser adotada, em cm^2 ;

α_c : parâmetro de redução da resistência do concreto na compressão;

f_{cd} : resistência à compressão de cálculo do concreto, em kN/cm^2 ;

b : largura da laje, em cm ;

y : profundidade do diagrama retangular de compressão equivalente, em cm ;

f_{yd} : tensão de escoamento de cálculo do aço, em kN/cm^2 ;

d : altura útil da laje, em cm ;

M_d : momento solicitante de cálculo, em kNcm .

6.1.2 Armadura dupla

Caso a equação (14) resulte em um $y > y_{m\acute{a}x}$, Bessa (2014) diz que a posição da linha neutra é fixada em $y_{m\acute{a}x}$ e acrescentam-se armaduras A_s' na zona comprimida da seção, o mais próximo da extremidade superior quanto possível, de modo a contribuir na resistência   compressão da estrutura. Para este caso, as seguintes equações de equilíbrio são definidas pela NBR 6118:

$$0 = 0,85 \cdot b \cdot y_{m\acute{a}x} \cdot f_{cd} + A_s' \cdot \sigma_2 - A_s \cdot f_{yd} \quad (16)$$

$$M_d = M_{dm\acute{a}x} + A_s' \cdot \sigma_2 \cdot (d - d') \quad (17)$$

Onde:

A_s : armadura de flexão a ser adotada, em cm^2 ;

A_s' : armadura de compressão a ser adotada, em cm^2 ;

f_{cd} : resistência   compressão de cáculo do concreto, em kN/cm^2 ;

b : largura da laje, em cm ;

$y_{m\acute{a}x}$: menor valor entre y_{lim} e $y_{d\acute{u}ctil}$, profundidade do diagrama retangular de compressão correspondente a 80% do valor de $x_{m\acute{a}x}$, em cm ;

f_{yd} : tensão de escoamento de cáculo do aço, em kN/cm^2 ;

d : altura útil da laje, em cm ;

d' : distância entre a fibra mais comprimida e o centro geométrico das armaduras de compressão;

M_d : momento solicitante de cáculo, em $\text{kN}\cdot\text{cm}$.

$M_{dm\acute{a}x}$: momento solicitante calculado com $y = y_{m\acute{a}x}$;

σ_2 : tensão da armadura de compressão, determinada pelo diagrama de tensão-deformação do aço empregado.

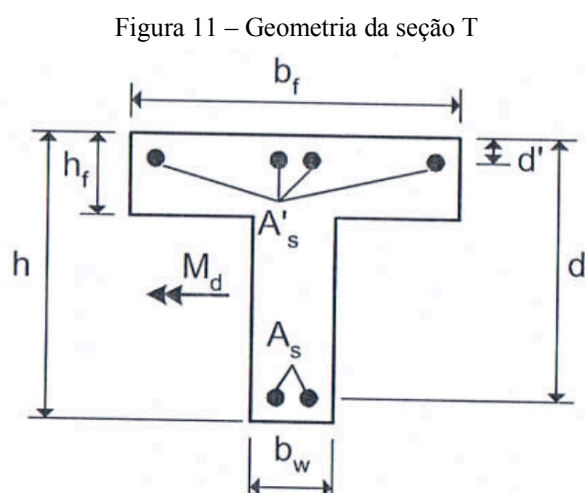
6.2 SEÇÃO T

Para uma seção T genérica, são definidos os seguintes parâmetros geométricos:

- a) b_f : largura da mesa;
- b) b_w : largura da alma;
- c) h_f : altura da mesa;
- d) h : altura da seção;

- e) d : distância entre a fibra mais comprimida da seção e o centro geométrico das armaduras de tração;
- f) d' : distância entre a fibra mais comprimida da seção e o centro geométrico das armaduras de compressão;
- g) M_d : momento solicitante de projeto;
- h) A_s : armadura de tração;
- i) A_s' : armadura de compressão.

Para o dimensionamento de armaduras das seções em T, o procedimento é o mesmo descrito anteriormente, devendo-se apenas considerar a forma da seção nas equações de equilíbrio, conforme as diferenças nos parâmetros geométricos (Figura 11). Estas adaptações são decorrentes da posição da linha neutra na seção, que pode ser dada em três situações distintas, descritas a seguir.

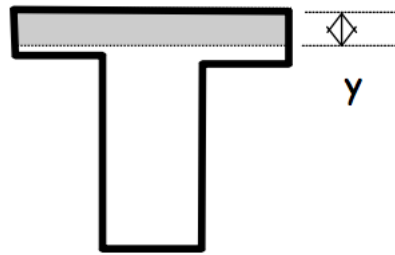


(fonte: ARAÚJO, 2010b, p. 127)

6.2.1 Profundidade da zona comprimida (y) situada na mesa

A situação ilustrada na Figura 12 exige apenas armadura simples e o dimensionamento é feito considerando-se uma viga retangular com a largura da mesa da seção T. As equações de equilíbrio, para concretos de classes até C50, são as seguintes:

Figura 12 – Seção T comprimida na mesa



(fonte: adaptado de BESSA, 2014, p. 13)

$$0 = 0,85 \cdot b_f \cdot y \cdot f_{cd} - A_s \cdot f_{yd} \quad (18)$$

$$M_d = 0,85 \cdot b_f \cdot y \cdot f_{cd} \cdot (d - 0,5 \cdot y) \quad (19)$$

onde:

A_s : armadura de flexão a ser adotada, em cm^2 ;

f_{cd} : resistência à compressão de cálculo do concreto, em kN/cm^2 ;

b_f : largura da mesa da seção, em cm;

y : profundidade do diagrama retangular de compressão equivalente, em cm;

f_{yd} : tensão de escoamento de cálculo do aço, em kN/cm^2 ;

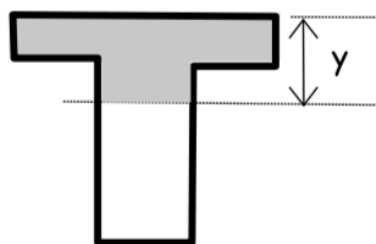
d : altura útil da seção, em cm;

M_d : momento solicitante de cálculo, em kNm .

6.2.2 Profundidade da zona comprimida (y) situada na alma ($y < y_{\text{máx}}$)

Para a situação da Figura 13, novamente apenas armadura simples é requerida, visto que a zona de compressão do concreto não ultrapassa a região delimitada por $0,8 \cdot x_{\text{máx}}$.

Figura 13 – Seção T com a alma parcialmente comprimida



(fonte: adaptado de BESSA, 2014, p. 13)

A formulação para esse caso é:

$$0 = 0,85 \cdot b_w \cdot y \cdot f_{cd} + 0,85 \cdot f_{cd} \cdot (b_f - b_w) \cdot h_f - A_s \cdot f_{yd} \quad (20)$$

$$M_d = 0,85 \cdot b_w \cdot y \cdot f_{cd} \cdot (d - 0,5 \cdot y) + 0,85 \cdot f_{cd} \cdot (b_f - b_w) \cdot h_f \cdot (d - 0,5 \cdot h_f) \quad (21)$$

onde:

A_s : armadura de flexão a ser adotada, em cm^2 ;

f_{cd} : resistência à compressão de cálculo do concreto, em kN/cm^2 ;

b_f : largura da mesa da seção, em cm;

y : profundidade do diagrama retangular de compressão equivalente, em cm;

f_{yd} : tensão de escoamento de cálculo do aço, em kN/cm^2 ;

d : altura útil da seção, em cm;

M_d : momento solicitante de cálculo, em kNm .

6.2.3 Profundidade da zona comprimida situada na alma ($y > y_{\text{máx}}$)

Na terceira situação possível, analogamente à seção retangular, se a posição da linha neutra ultrapassar o valor limite (x_{lim}), o diagrama de deformação da estrutura fica posicionado na região do domínio 4, como exposto no item 5.10. Para reverter a situação, torna-se necessário dimensionar armaduras negativas, resistentes à compressão, para a estrutura. De acordo com Bessa (2014), os equacionamentos de equilíbrio são:

$$0 = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot [(b_f - b_w) \cdot h_f + b_w \cdot y_{\text{lim}}] + A'_s \cdot \sigma_2 - A_s \cdot f_{yd} \quad (22)$$

$$M_d = M_{d\text{max}} + A'_s \cdot \sigma_2 \cdot (d - d') \quad (23)$$

sendo:

A_s : armadura de flexão a ser adotada, em cm^2 ;

A'_s : armadura de compressão a ser adotada, em cm^2 ;

f_{cd} : resistência à compressão de cálculo do concreto, em kN/cm^2 ;

f_{yd} : tensão de escoamento de cálculo do aço, em kN/cm^2 ;

b_f : largura da mesa da seção, em cm;

b_w : largura da alma, em cm;

y : posição da linha neutra na laje, em cm;

$y_{m\acute{a}x}$: menor valor entre y_{lim} e $y_{d\acute{u}ctil}$, profundidade do diagrama retangular de compressão correspondente a 80% do valor de $x_{m\acute{a}x}$, em cm;

d' : distância entre a fibra mais comprimida e o centro geométrico das armaduras de compressão;

M_d : momento solicitante de cálculo, em kN.cm;

$M_{dm\acute{a}x}$: momento solicitante no caso de $x = x_{m\acute{a}x}$;

σ_2 : tensão da armadura de compressão, determinada pelo diagrama de tensão-deformação do aço empregado

7 CISALHAMENTO

7.1 VERIFICAÇÃO NO ESTADO LIMITE ÚLTIMO

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) orienta que, para que a estrutura apresente resistência satisfatória aos esforços cortantes aplicados, duas condições devem ser satisfeitas, que são:

$$V_{sd} \leq V_{Rd2} \quad (24)$$

$$V_{sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (25)$$

onde:

V_{sd} : força cortante solicitante de cálculo na seção;

V_{Rd2} : força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto;

V_{Rd3} : força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal;

V_c : parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça;

V_{sw} : parcela resistida pela armadura transversal, de acordo com os modelos indicados em 7.1.1 ou 7.1.2.

Para a determinação das forças cortantes resistentes de cálculo, podem ser adotados dois modelos de cálculo, segundo a NBR, que são descritos nos itens 7.1.1 e 7.1.2.

7.1.1 Modelo de cálculo I

O modelo I segue as premissas de que as diagonais de compressão têm inclinação de 45° em relação ao eixo longitudinal do elemento e que V_c não dependa de V_{sd} , tendo, portanto, valor constante. Os equacionamentos para a verificação da compressão diagonal do concreto (eq. 26 e 27) e para o cálculo da armadura transversal (eq. 28) seguem:

$$V_{Rd2} \leq 0,27 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad (26)$$

$$\alpha_{v2} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right), \text{ com } f_{ck} \text{ em MPa} \quad (27)$$

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (28)$$

onde:

$$V_{sw} = (A_{sw} / s) 0,9 d f_{ywd} (\sin \alpha + \cos \alpha);$$

$V_c = 0$ nos elementos estruturais tracionados quando a linha neutra se situa fora da seção;

$V_c = V_{c0}$ na flexão simples e na flexo-tração com a linha neutra cortando a seção;

$V_c = V_{c0} (1 + M_0 / M_{Sd, \max}) \leq 2V_{c0}$ na flexo-compressão;

$$V_{c0} = 0,6 f_{ctd} b_w d;$$

$$f_{ctd} = f_{ctk, \text{ inf}} / \gamma_c;$$

b_w : largura da viga, em cm;

d : altura útil da viga, em cm;

s : espaçamento entre elementos da armadura transversal A_{sw} , medido segundo o eixo longitudinal da peça;

f_{ywd} : tensão na armadura transversal passiva, limitada ao valor f_{yd} no caso de estribos e a 70% desse valor no caso de barras dobradas, não se tomando, para ambos os casos, valores superiores a 435 MPa;

α : ângulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal da peça ($45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$).

M_0 : momento que anula a tensão de compressão na borda da seção onde atua $M_{Sd, \max}$, em kNcm;

$M_{Sd, \max}$: momento fletor solicitante máximo ao longo da viga, em kNcm.

7.1.2 Modelo de cálculo II

No modelo II, as premissas adotadas são de que as diagonais de compressão do concreto têm inclinações entre 30° e 45° , além de que V_c seja reduzido conforme V_{sd} aumente. As fórmulas para a verificação da compressão diagonal do concreto (eq. 29 e 30) e para o cálculo da armadura transversal (eq. 31) seguem:

$$V_{Rd2} = 0,54 \cdot \alpha_{v2} \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \cdot \sin^2 \theta \cdot (\cotg \alpha + \cotg \theta) \quad (29)$$

$$\alpha_{v2} = \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right), \text{ com } f_{ck} \text{ em MPa} \quad (30)$$

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (31)$$

onde:

$$V_{sw} = (A_{sw} / s) 0,9 d f_{ywd} (\cotg \alpha + \cotg \theta) \sen \alpha;$$

$V_c = 0$, em elementos estruturais tracionados quando a linha neutra se situa fora da seção;

$V_c = V_{c1}$, na flexão simples e na flexo-tração com a linha neutra cortando a seção;

$V_c = V_{c1} (1 + M_0 / M_{Sd, \text{máx}}) < 2V_{c1}$ na flexo-compressão;

$V_{c1} = V_{c0}$ quando $V_{Sd} \leq V_{c0}$;

$V_{c1} = 0$ quando $V_{Sd} = V_{Rd2}$, interpolando-se linearmente para valores intermediários;

$$f_{ctd} = f_{ctk, \text{inf}} / \gamma_c;$$

b_w : largura da viga, em cm;

d : altura útil da viga, em cm;

s : espaçamento entre elementos da armadura transversal A_{sw} , medido segundo o eixo longitudinal da peça;

f_{ywd} : tensão na armadura transversal passiva, limitada ao valor f_{yd} no caso de estribos e a 70% desse valor no caso de barras dobradas, não se tomando, para ambos os casos, valores superiores a 435 MPa;

α : ângulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal da peça ($45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$).

M_0 : momento que anula a tensão de compressão na borda da seção onde atua $M_{Sd, \text{máx}}$, em kNcm;

$M_{Sd, \text{máx}}$: momento fletor solicitante máximo ao longo da viga, em kNcm.

7.2 ESFORÇO CORTANTE EM LAJES

7.2.1 Lajes sem armadura para força cortante

De acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), caso as lajes maciças ou nervuradas satisfaçam a condição abaixo (eq. 32), estas podem dispensar a utilização de armaduras transversais para resistir aos esforços cortantes.

$$V_{sd} \leq V_{Rd1} \quad (32)$$

sendo:

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1,2 + 40 \rho_1) + 0,15 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad (33)$$

onde:

$$\tau_{Rd} = 0,25 f_{ctd};$$

$$f_{ctd} = f_{ctk, inf} / \gamma_c;$$

$$\rho_1 = A_{s1} / b_w d, \text{ não maior que } |0,02|;$$

$$\sigma_{cp} = N_{Sd} / A_c;$$

k: coeficiente com os seguintes valores:

— para elementos onde 50 % da armadura inferior não chega até o apoio: $k = |1|$;

— para os demais casos: $k = |1,6 - d|$, não menor que $|1|$, com d em metros;

τ_{Rd} : tensão resistente de cálculo do concreto ao cisalhamento;

A_{s1} : área da armadura de tração;

b_w : largura mínima da seção ao longo da altura útil d;

N_{Sd} : força longitudinal na seção devida à protensão ou carregamento

7.2.2 Lajes com armadura para força cortante

Caso a condição da equação (32) não seja satisfeita, o disposto no item 7.1 deve ser aplicado.

Para a resistência dos estribos, consideram-se os seguintes valores máximos, permitindo interpolação para valores intermediários:

— 250 MPa, para lajes com espessura até 15 cm;

— 435 MPa (f_{ywd}), para lajes com espessura maior que 35 cm.

8 METODOLOGIA DE CÁLCULO

Araújo (2010a) expõe vários modelos possíveis de serem aplicados para o dimensionamento de lajes em concreto armado. Entre eles estão o Método de Marcus, a Teoria das Linhas de Ruptura, a Teoria de Flexão de Placas, o Modelo das Diferenças Finitas e o Método dos Elementos Finitos.

Este trabalho se utilizará da Teoria de Flexão de Placas para a obtenção dos resultados, aplicando-se determinadas tabelas de coeficientes para o dimensionamento dos sistemas, o que torna os cálculos mais simplificados.

8.1 TEORIA DE FLEXÃO DE PLACAS

No método da Teoria de Flexão de Placas, Araújo (2010a, p. 39-55) demonstra as etapas para a solução da equação diferencial das placas, considerando as devidas equações de equilíbrio e as condições de contorno aplicadas. Além disso, o autor cita que deve ser seguido o procedimento da teoria de Kirchoff para placas finas com pequenas deflexões, que leva em conta as seguintes hipóteses, de acordo com Szilard² (1974 apud ARAÚJO, 2010a, p.43), Timoshenko e Woinowsky-Krieger³ (1970 apud ARAÚJO, 2010a, p. 43):

1. O material da placa é elástico linear, homogêneo e isotrópico.
2. A espessura da placa é pequena em relação às outras dimensões.
3. As deflexões são pequenas em relação à espessura da placa.
4. As rotações da superfície média deformada são pequenas em relação à unidade.

² SZILARD, R. **Theory and Analysis of Plates**: classical and numerical methods. New Jersey: Prentice-Hall, 1974.

³ TIMOSHENKO, S. P.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. **Theory of Plates and Shells**. New York: McGraw-Hill, 1970.

5. Linhas retas, inicialmente normais à superfície média, permanecem retas e normais à superfície média após as deformações. Esta hipótese é equivalente à hipótese das seções planas da teoria de vigas e consiste em desprezar as deformações por corte.
6. As deflexões da placa são normais ao plano indeformado inicial.
7. As tensões normais à superfície média são desprezíveis ($\sigma_z \cong 0$).

Visto que a solução da equação diferencial é de alta complexidade devido a esta ser de quarto grau, Araújo(2010a) sugere a adoção de um grupo de tabelas para os cálculos de esforços e reações necessários, o que será discutido a seguir.

8.2 TABELAS PARA O CÁLCULO DE PLACAS

As diferenças que distinguem a variedade de tabelas para o cálculo de lajes encontradas na literatura são, geralmente, devidas a diferenças no coeficiente de Poisson adotado e aproximações no truncamento das séries de Fourier (ARAÚJO, 2010a, p. 65).

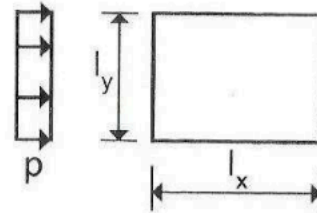
Araújo apresenta as tabelas desenvolvidas por Kalmanok⁴ (1961 apud ARAÚJO, 2010a), com modificações referentes ao coeficiente de Poisson, que fora considerado $\nu = 0$ nas tabelas originais, porém é recomendado como $\nu = 2$ pela NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). Além disso, as tabelas foram adaptadas para fornecer as reações uniformemente distribuídas ao longo dos apoios.

A Figura 14 apresenta a tabela para o cálculo de lajes retangulares simplesmente apoiadas, com carga p uniformemente distribuída. Para obtenção dos coeficientes de cálculo, entra-se na tabela com o parâmetro l_y/l_x , sendo l_y o maior vão da laje. Extraem-se, então, os seguintes coeficientes:

- a) m_x e m_y , para o cálculo dos momentos fletores positivos;
- b) m_{xy} , para o cálculo do momento de torção nos cantos das lajes;
- c) w_c , para o cálculo da flecha no centro da laje;
- d) r_x e r_y , para o cálculo das reações de apoio.

⁴ KALMANOK, A. S. **Manual Para Cálculo de Placas**. Montevideo: Inter Ciencia, 1961.

Figura 14 – Tabela de Kalmanok para lajes apoiadas nos 4 bordos e carga uniformemente distribuída



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

(fonte: adaptado de ARAÚJO, 2010a, p. 341)

A formulação para a determinação dos parâmetros de dimensionamento (Figura 15), utilizando-se os dados fornecidos pela tabela, segue:

$$W_o = 0,001 \cdot w_c \cdot \frac{p \cdot l_x^4}{D} \quad (34)$$

$$D = \frac{E_{cs} \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (35)$$

$$M_x = 0,001 \cdot m_x \cdot p \cdot l_x^2 \quad (36)$$

$$M_y = 0,001 \cdot m_y \cdot p \cdot l_x^2 \quad (37)$$

$$R_x = 0,001 \cdot r_x \cdot p \cdot l_x \quad (38)$$

$$R_y = 0,001 \cdot r_y \cdot p \cdot l_x \quad (39)$$

onde:

W_c : flecha no centro da laje;

M_x, M_y : momentos positivos no centro da laje nas direções dos vãos l_x e l_y , respectivamente;

R_x : reação de apoio por unidade de comprimento no lado l_x ;

R_y : reação de apoio por unidade de comprimento no lado l_y ;

D : rigidez à flexão da placa;

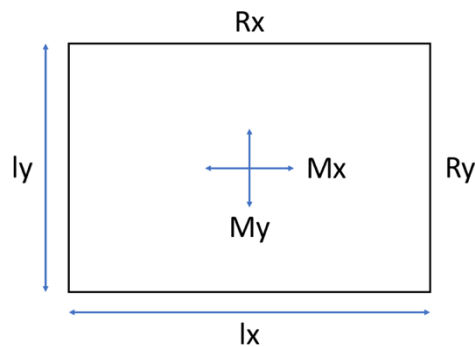
E_{cs} : módulo de elasticidade secante;

h : espessura da laje;

ν : coeficiente de Poisson;

$w_c, m_x, m_y, m_{xy}, r_x, r_y$: coeficientes retirados das tabelas de lajes.

Figura 15 - Parâmetros determinados através da utilização das tabelas de Kalmanok



(fonte: elaborada pelo autor)

9 DIMENSIONAMENTO E CONSUMO

Para o dimensionamento das soluções equivalentes em lajes maciças e nervuradas, foram utilizadas duas planilhas de cálculos desenvolvidas pelo autor no *software* Excel, empregando-se as tabelas e formulações descritas no capítulo 8, as orientações e verificações das normas técnicas, alguns critérios e parâmetros predefinidos e informações de produtos do mercado disponibilizados pelos fabricantes para as barras de aço e para a padronização das nervuras.

9.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O estudo realizado tomou base os seguintes critérios:

- a) Concreto de classe de resistência C30;
- b) Aço com classe de resistência CA50 para bitolas de 6,3 mm a 16 mm;
- c) Aço com classe de resistência CA60 para bitolas de 5 mm;
- d) Classe de agressividade ambiental II, portanto, cobertura de 2,5 cm;
- e) Coeficiente de Poisson $\nu = 0,2$;
- f) Cargas de revestimento de $0,9 \text{ kN/m}^2$;
- g) Lajes simplesmente apoiadas nos quatro bordos;
- h) Vigas totalmente rígidas;
- i) Limites de deslocamentos de acessibilidade visual, no ELS;
- j) Granito utilizado como agregado graúdo ($\alpha_e = 1,0$);
- k) Espessura mínima de 8 cm para lajes maciças;
- l) Duas barras de aço (A_s) por nervura;
- m) Bitola mínima de 5 mm para as barras de aço;
- n) Configurações e informações técnicas de lajes nervuradas de acordo com os sistemas disponibilizados pelo fabricante Atex ® (Anexo A).

9.2 AMOSTRAGEM

A amostragem (Tabela 11) compõe-se de lajes dimensionadas para vãos de configurações variadas, iniciando-se em 3 m x 3 m até 10 m x 10 m. As cargas acidentais utilizadas foram de $1,5 \text{ kN/m}^2$, 3 kN/m^2 e 4 kN/m^2 .

As lajes, para fins de identificação, foram numeradas em ordem crescente de superfície. Os prefixos “M” e “N” que precedem os números de identificação dizem respeito ao tipo das lajes, correspondendo a “maciça” ou “nervurada”, respectivamente.

Tabela 11 – Nomenclatura, vãos e carregamento das lajes dimensionadas

Laje Maciça	Laje Nervurada	Vãos [m]	Área [m ²]	Carga acidental [kN/m ²]
M1	N1	3 x 3	9	1.50
M2	N2	3 x 4	12	1.50
M3	N3	4 x 4	16	1.50
M4	N4	4 x 5	20	1.50
M5	N5	5 x 5	25	1.50
M6	N6	5 x 6	30	1.50
M7	N7	5 x 7	35	1.50
M8	N8	6 x 6	36	1.50
M9	N9	6 x 7	42	1.50
M10	N10	6 x 8	48	1.50
M11	N11	7 x 7	49	1.50
M12	N12	7 x 8	56	1.50
M13	N13	7 x 9	63	1.50
M14	N14	8 x 8	64	1.50
M15	N15	8 x 9	72	1.50
M16	N16	8 x 10	80	1.50
M17	N17	9 x 9	81	1.50
M18	N18	9 x 10	90	1.50
M19	N19	10 x 10	100	1.50
M20	N20	3 x 3	9	3.00
M21	N21	3 x 4	12	3.00
M22	N22	4 x 4	16	3.00
M23	N23	4 x 5	20	3.00
M24	N24	5 x 5	25	3.00
M25	N25	5 x 6	30	3.00
M26	N26	5 x 7	35	3.00
M27	N27	6 x 6	36	3.00
M28	N28	6 x 7	42	3.00
M29	N29	6 x 8	48	3.00
M30	N30	7 x 7	49	3.00
M31	N31	7 x 8	56	3.00

continua

continuação

Laje Maciça	Laje Nervurada	Vãos [m]	Área [m ²]	Carga acidental [kN/m ²]
M32	N32	7 x 9	63	3.00
M33	N33	8 x 8	64	3.00
M34	N34	8 x 9	72	3.00
M35	N35	8 x 10	80	3.00
M36	N36	9 x 9	81	3.00
M37	N37	9 x 10	90	3.00
M38	N38	10 x 10	100	3.00
M39	N39	3 x 3	9	4.00
M40	N40	3 x 4	12	4.00
M41	N41	4 x 4	16	4.00
M42	N42	4 x 5	20	4.00
M43	N43	5 x 5	25	4.00
M44	N44	5 x 6	30	4.00
M45	N45	5 x 7	35	4.00
M46	N46	6 x 6	36	4.00
M47	N47	6 x 7	42	4.00
M48	N48	6 x 8	48	4.00
M49	N49	7 x 7	49	4.00
M50	N50	7 x 8	56	4.00
M51	N51	7 x 9	63	4.00
M52	N52	8 x 8	64	4.00
M53	N53	8 x 9	72	4.00
M54	N54	8 x 10	80	4.00
M55	N55	9 x 9	81	4.00
M56	N56	9 x 10	90	4.00
M57	N57	10 x 10	100	4.00

(fonte: elaborado pelo autor)

9.2.1 Lajes maciças

Os dimensionamentos das lajes maciças foram feitos através da combinação dos cálculos das solicitações oriundos do uso das tabelas de lajes de Kalmanok com as recomendações de equacionamentos da NBR 6118. Foram obtidos, inicialmente, os momentos, reações e flecha de projeto, de forma a viabilizar os cálculos das armaduras.

De forma iterativa, a espessura de cada uma das lajes foi determinada, respeitando-se os limites de deslocamentos de serviço nos seus pontos centrais. Finalmente, foi verificada a necessidade de projeto de estribos, que foram prescindíveis em todos os casos estudados.

As lajes maciças dimensionadas para o estudo apresentam-se na Tabela 12, bem como os deslocamentos diferidos no tempo e os limites máximos para os mesmos.

Tabela 12 – Lajes maciças dimensionadas

Laje	Espessura [cm]	P_{total} [kN/m ²]	Carregamento de serviço [kN/m ²]	Flecha diferida [cm]	Limites de deslocamento [cm]	Limite \geq Flecha?
M1	8	4.40	3.35	0.24	1.2	Sim
M2	8	4.40	3.35	0.38	1.2	Sim
M3	8	4.40	3.35	0.75	1.6	Sim
M4	8	4.40	3.35	1.11	1.6	Sim
M5	8	4.40	3.35	1.82	2	Sim
M6	10	4.90	3.85	1.59	2	Sim
M7	10	4.90	3.85	1.92	2	Sim
M8	10	4.90	3.85	2.22	2.4	Sim
M9	12	5.40	4.35	1.96	2.4	Sim
M10	13	5.65	4.60	1.97	2.4	Sim
M11	12	5.40	4.35	2.69	2.8	Sim
M12	14	5.90	4.85	2.55	2.8	Sim
M13	15	6.15	5.10	2.63	2.8	Sim
M14	15	6.15	5.10	2.76	3.2	Sim
M15	17	6.65	5.60	2.81	3.2	Sim
M16	17	6.65	5.60	3.09	3.2	Sim
M17	17	6.65	5.60	3.33	3.6	Sim
M18	19	7.15	6.10	3.19	3.6	Sim
M19	20	7.40	6.35	3.53	4	Sim
M20	8	5.90	3.80	0.27	1.2	Sim
M21	8	5.90	3.80	0.44	1.2	Sim
M22	8	5.90	3.80	0.85	1.6	Sim
M23	8	5.90	3.80	1.26	1.6	Sim
M24	9	6.15	4.05	1.55	2	Sim
M25	10	6.40	4.30	1.78	2	Sim
M26	11	6.65	4.55	1.70	2	Sim
M27	11	6.65	4.55	1.97	2.4	Sim

continua

continuação

Laje	Espessura [cm]	P_{total} [kN/m ²]	Carregamento de serviço [kN/m ²]	Flecha diferida [cm]	Limites de deslocamento [cm]	Limite \geq Flecha?
M28	12	6.90	4.80	2.16	2.4	Sim
M29	13	7.15	5.05	2.16	2.4	Sim
M30	13	7.15	5.05	2.46	2.8	Sim
M31	15	7.65	5.55	2.37	2.8	Sim
M32	16	7.90	5.80	2.47	2.8	Sim
M33	15	7.65	5.55	3.00	3.2	Sim
M34	17	8.15	6.05	3.03	3.2	Sim
M35	18	8.40	6.30	2.93	3.2	Sim
M36	18	8.40	6.30	3.16	3.6	Sim
M37	19	8.65	6.55	3.42	3.6	Sim
M38	20	8.90	6.80	3.79	4	Sim
M39	8	6.90	4.10	0.29	1.2	Sim
M40	8	6.90	4.10	0.47	1.2	Sim
M41	8	6.90	4.10	0.91	1.6	Sim
M42	8	6.90	4.10	1.36	1.6	Sim
M43	9	7.15	4.35	1.66	2	Sim
M44	11	7.65	4.85	1.51	2	Sim
M45	11	7.65	4.85	1.81	2	Sim
M46	11	7.65	4.85	2.10	2.4	Sim
M47	13	8.15	5.35	1.90	2.4	Sim
M48	14	8.40	5.60	1.92	2.4	Sim
M49	14	8.40	5.60	2.18	2.8	Sim
M50	15	8.65	5.85	2.50	2.8	Sim
M51	17	9.15	6.35	2.25	2.8	Sim
M52	16	8.90	6.10	2.72	3.2	Sim
M53	18	9.40	6.60	2.79	3.2	Sim
M54	19	9.65	6.85	2.71	3.2	Sim
M55	18	9.40	6.60	3.31	3.6	Sim
M56	20	9.90	7.10	3.18	3.6	Sim
M57	21	10.15	7.35	3.53	4	Sim

(fonte: elaborado pelo autor)

9.2.2 Lajes nervuradas

Para as lajes nervuradas, as soluções das linhas de cubetas de classes 600 a 900 comercializadas pela fabricante Atex ® (Anexo A) foram consideradas. Visto que o objetivo do trabalho consiste

na análise de consumo de materiais, as soluções foram classificadas em ordem crescente de volume de concreto empregado por metro quadrado de laje construída. Deste modo, a planilha de lajes nervuradas foi elaborada para que automaticamente selecionasse o produto do catálogo que menos consumisse concreto e simultaneamente satisfizesse a espessura equivalente em inércia da respectiva laje maciça. As solicitações e flechas foram calculadas de forma análoga às lajes maciças.

As armaduras foram projetadas devidamente para as nervuras, bem como foi feita a devida verificação à necessidade de estribos para resistência aos esforços cortantes, novamente dispensados para todos os casos estudados.

As lajes nervuradas dimensionadas para o estudo apresentam-se na Tabela 13. Na nomenclatura do fabricante de cubetas para lajes nervuradas Atex[®], o número que identifica o modelo do sistema representa o espaçamento entre as nervuras, em milímetros, ou seja, o modelo *Atex 600* possui espaçamento entre nervuras de 60 cm, por exemplo. Na Tabela 14 são apresentadas as verificações de deslocamentos das lajes nervuradas, de maneira análoga ao realizado para as lajes maciças.

Tabela 13 – Propriedades das lajes nervuradas dimensionadas

Laje	Modelo	Altura do molde [cm]	Espessura da mesa [cm]	Altura total [cm]	Espessura média da nervura [cm]	Área da seção transversal [cm ²]	Altura equivalente de inércia [cm]
N1	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N2	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N3	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N4	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N5	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N6	Atex 600	15	5	20	7.900	418	12.7
N7	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N8	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N9	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N10	Atex 610	16	5	21	8.40	440	13.7
N11	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N12	Atex 650	18	5	23	8.10	471	14.6
N13	Atex 650	21	5	26	7.00	472	15.6
N14	Atex 650	21	5	26	7.00	472	15.6

continua

continuação

Laje	Modelo	Altura do molde [cm]	Espessura da mesa [cm]	Altura total [cm]	Espessura média da nervura [cm]	Área da seção transversal [cm ²]	Altura equivalente de inércia [cm]
N15	Atex 610	21	5	26	9.60	506	17.1
N16	Atex 610	21	5	26	9.60	506	17.1
N17	Atex 610	21	5	26	9.60	506	17.1
N18	Atex 650	26	5	31	9.30	567	19.9
N19	Atex 800	25	5	30	14.80	770	20.7
N20	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N21	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N22	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N23	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N24	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N25	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N26	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N27	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N28	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N29	Atex 610	16	5	21	8.40	440	13.7
N30	Atex 610	16	5	21	8.40	440	13.7
N31	Atex 650	21	5	26	7.00	472	15.6
N32	Atex 650	21	5	26	8.40	501	16.6
N33	Atex 650	21	5	26	7.00	472	15.6
N34	Atex 610	21	5	26	9.60	506	17.1
N35	Atex 650	26	5	31	9.30	567	19.9
N36	Atex 650	26	5	31	9.30	567	19.9
N37	Atex 650	26	5	31	9.30	567	19.9
N38	Atex 800	25	5	30	14.80	770	20.7
N39	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N40	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N41	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N42	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N43	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N44	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N45	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N46	Atex 600	15	5	20	7.90	418	12.7
N47	Atex 610	16	5	21	8.40	440	13.7
N48	Atex 650	18	5	23	8.10	471	14.6
N49	Atex 650	18	5	23	8.10	471	14.6

continua

continuação

Laje	Modelo	Altura do molde [cm]	Espessura da mesa [cm]	Altura total [cm]	Espessura média da nervura [cm]	Área da seção transversal [cm ²]	Altura equivalente de inércia [cm]
N50	Atex 650	21	5	26	7.00	472	15.6
N51	Atex 610	21	5	26	9.60	506	17.1
N52	Atex 650	21	5	26	8.40	501	16.6
N53	Atex 650	26	5	31	9.30	567	19.9
N54	Atex 650	26	5	31	9.30	567	19.9
N55	Atex 650	26	5	31	9.30	567	19.9
N56	Atex 800	25	5	30	14.80	770	20.7
N57	Atex 650	30	5	35	10.00	625	22.6

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 14 - Verificação dos deslocamentos das lajes nervuradas dimensionadas

Laje	P_{total} [kN/m ²]	Carregamento de serviço [kN/m ²]	Flecha diferida [cm]	Limites de deslocamento [cm]	Limite \geq Flecha?
N1	4.58	3.53	0.06	1.20	Sim
N2	4.58	3.53	0.10	1.20	Sim
N3	4.58	3.53	0.20	1.60	Sim
N4	4.58	3.53	0.29	1.60	Sim
N5	4.58	3.53	0.48	2.00	Sim
N6	4.58	3.53	0.71	2.00	Sim
N7	4.58	3.53	0.86	2.00	Sim
N8	4.58	3.53	0.99	2.40	Sim
N9	4.58	3.53	1.34	2.40	Sim
N10	4.68	3.63	1.33	2.40	Sim
N11	4.58	3.53	1.84	2.80	Sim
N12	4.70	3.65	1.69	2.80	Sim
N13	4.72	3.67	1.69	2.80	Sim
N14	4.72	3.67	1.77	3.20	Sim
N15	5.18	4.13	2.03	3.20	Sim
N16	5.18	4.13	2.24	3.20	Sim
N17	5.18	4.13	2.41	3.60	Sim
N18	5.38	4.33	1.97	3.60	Sim
N19	5.75	4.70	2.36	4.00	Sim
N20	6.08	3.98	0.07	1.20	Sim

continua

continuação

Laje	P_{total} [kN/m ²]	Carregamento de serviço [kN/m ²]	Flecha diferida [cm]	Limites de deslocamento [cm]	Limite \geq Flecha?
N21	6.08	3.98	0.11	1.20	Sim
N22	6.08	3.98	0.22	1.60	Sim
N23	6.08	3.98	0.33	1.60	Sim
N24	6.08	3.98	0.54	2.00	Sim
N25	6.08	3.98	0.80	2.00	Sim
N26	6.08	3.98	0.97	2.00	Sim
N27	6.08	3.98	1.12	2.40	Sim
N28	6.08	3.98	1.51	2.40	Sim
N29	6.18	4.08	1.49	2.40	Sim
N30	6.18	4.08	1.70	2.80	Sim
N31	6.22	4.12	1.57	2.80	Sim
N32	6.43	4.33	1.65	2.80	Sim
N33	6.22	4.12	1.98	3.20	Sim
N34	6.68	4.58	2.26	3.20	Sim
N35	6.88	4.78	1.64	3.20	Sim
N36	6.88	4.78	1.77	3.60	Sim
N37	6.88	4.78	2.17	3.60	Sim
N38	7.25	5.15	2.59	4.00	Sim
N39	7.08	4.28	0.08	1.20	Sim
N40	7.08	4.28	0.12	1.20	Sim
N41	7.08	4.28	0.24	1.60	Sim
N42	7.08	4.28	0.35	1.60	Sim
N43	7.08	4.28	0.58	2.00	Sim
N44	7.08	4.28	0.86	2.00	Sim
N45	7.08	4.28	1.04	2.00	Sim
N46	7.08	4.28	1.21	2.40	Sim
N47	7.18	4.38	1.33	2.40	Sim
N48	7.20	4.40	1.33	2.40	Sim
N49	7.20	4.40	1.51	2.80	Sim
N50	7.22	4.42	1.68	2.80	Sim
N51	7.68	4.88	1.70	2.80	Sim
N52	7.43	4.63	1.85	3.20	Sim
N53	7.88	5.08	1.59	3.20	Sim
N54	7.88	5.08	1.75	3.20	Sim
N55	7.88	5.08	1.88	3.60	Sim
N56	8.25	5.45	2.20	3.60	Sim
N57	8.28	5.48	2.11	4.00	Sim

(fonte: elaborado pelo autor)

9.3 ARMADURAS DE FLEXÃO

Para o dimensionamento das armaduras de flexão, os momentos solicitantes nas estruturas foram obtidos por meio da tabela de lajes da Figura 14, juntamente com as devidas equações correspondentes. Foram realizadas as devidas verificações de armaduras mínimas e máximas e, posteriormente, as armaduras foram definidas de forma a atender as taxas de armaduras calculadas para cada vão,

9.3.1 Lajes maciças

Para as lajes maciças, todos os A_s calculados foram superiores às respectivas áreas de aço mínimas. As armaduras dimensionadas foram de diâmetros entre 5 e 12,5 mm, distribuídas com espaçamentos inferiores ao dobro da espessura das lajes ou 20 cm. Todas as lajes foram dimensionadas no domínio 2. A Tabela 15 expõe os resultados obtidos para todas as lajes maciças.

Tabela 15 – Armaduras de flexão para as lajes maciças

Laje	M_x [kN.m]	M_y [kN.m]	$A_{s, \text{mín}}$ [cm ² /m]	$A_s x$ [cm ² /m]	$A_s y$ [cm ² /m]	Armadura vão l_x	Armadura vão l_y
M1	1.75	1.75	0.80	1.02	1.02	∅ 5 c/ 16 cm	∅ 5 c/ 16 cm
M2	2.70	1.75	0.80	1.58	1.02	∅ 5 c/ 12 cm	∅ 5 c/ 16 cm
M3	3.11	3.11	0.80	1.82	1.82	∅ 6.3 c/ 16 cm	∅ 6.3 c/ 16 cm
M4	4.41	3.14	0.80	2.59	1.84	∅ 6.3 c/ 12 cm	∅ 6.3 c/ 16 cm
M5	4.86	4.86	0.80	2.85	2.85	∅ 6.3 c/ 10 cm	∅ 6.3 c/ 10 cm
M6	7.68	5.46	1.01	3.30	2.35	∅ 8 c/ 15 cm	∅ 6.3 c/ 13 cm
M7	9.10	5.33	1.01	3.91	2.29	∅ 10 c/ 20 cm	∅ 6.3 c/ 13 cm
M8	7.80	7.80	1.01	3.35	3.35	∅ 8 c/ 15 cm	∅ 8 c/ 15 cm
M9	11.20	8.73	1.21	3.80	2.96	∅ 8 c/ 13 cm	∅ 8 c/ 17 cm
M10	13.89	8.99	1.31	4.26	2.76	∅ 10 c/ 18 cm	∅ 8 c/ 18 cm
M11	11.70	11.70	1.21	3.97	3.97	∅ 10 c/ 19 cm	∅ 10 c/ 19 cm
M12	16.65	12.98	1.41	4.66	3.64	∅ 10 c/ 16 cm	∅ 8 c/ 13 cm
M13	20.58	13.32	1.51	5.30	3.43	∅ 10 c/ 14 cm	∅ 8 c/ 14 cm
M14	17.40	17.40	1.51	4.48	4.48	∅ 8 c/ 11 cm	∅ 8 c/ 11 cm
M15	24.51	19.11	1.71	5.45	4.25	∅ 10 c/ 14 cm	∅ 10 c/ 18 cm
M16	26.69	18.98	1.71	5.93	4.22	∅ 10 c/ 13 cm	∅ 10 c/ 18 cm

continua

continuação

Laje	M _x [kN.m]	M _y [kN.m]	A _{s, mín} [cm ² /m]	A _{s x} [cm ² /m]	A _{s y} [cm ² /m]	Armadura vão l _x	Armadura vão l _y
M17	23.81	23.81	1.71	5.29	5.29	ø 10 c/ 14 cm	ø 10 c/ 14 cm
M18	30.58	26.06	1.91	5.97	5.09	ø 10 c/ 13 cm	ø 10 c/ 15 cm
M19	32.71	32.71	2.01	6.02	6.02	ø 10 c/ 13 cm	ø 10 c/ 13 cm
M20	2.35	2.35	0.80	1.37	1.37	ø 5 c/ 14 cm	ø 5 c/ 14 cm
M21	3.63	2.35	0.80	2.12	1.37	ø 6.3 c/ 14 cm	ø 5 c/ 14 cm
M22	4.17	4.17	0.80	2.44	2.44	ø 6.3 c/ 12 cm	ø 6.3 c/ 12 cm
M23	5.92	4.21	0.80	3.47	2.47	ø 8 c/ 14 cm	ø 6.3 c/ 12 cm
M24	6.80	6.80	0.90	3.37	3.37	ø 8 c/ 14 cm	ø 8 c/ 14 cm
M25	10.03	7.14	1.01	4.31	3.07	ø 10 c/ 18 cm	ø 6.3 c/ 10 cm
M26	12.35	7.23	1.11	4.68	2.74	ø 10 c/ 16 cm	ø 8 c/ 18 cm
M27	10.58	10.58	1.11	4.01	4.01	ø 10 c/ 19 cm	ø 10 c/ 19 cm
M28	14.31	11.15	1.21	4.85	3.78	ø 10 c/ 16 cm	ø 8 c/ 13 cm
M29	17.58	11.38	1.31	5.39	3.49	ø 10 c/ 14 cm	ø 8 c/ 14 cm
M30	15.49	15.49	1.31	4.75	4.75	ø 10 c/ 16 cm	ø 10 c/ 16 cm
M31	21.59	16.83	1.51	5.56	4.34	ø 10 c/ 14 cm	ø 10 c/ 18 cm
M32	26.44	17.11	1.61	6.31	4.08	ø 12.5 c/ 19 cm	ø 10 c/ 19 cm
M33	21.64	21.64	1.51	5.58	5.58	ø 10 c/ 14 cm	ø 10 c/ 14 cm
M34	30.04	23.42	1.71	6.68	5.20	ø 12.5 c/ 18 cm	ø 10 c/ 15 cm
M35	33.71	23.98	1.81	7.01	4.98	ø 10 c/ 11 cm	ø 8 c/ 10 cm
M36	30.07	30.07	1.81	6.25	6.25	ø 12.5 c/ 19 cm	ø 12.5 c/ 19 cm
M37	36.99	31.53	1.91	7.22	6.16	ø 12.5 c/ 16 cm	ø 12.5 c/ 19 cm
M38	39.34	39.34	2.01	7.24	7.24	ø 12.5 c/ 16 cm	ø 12.5 c/ 16 cm
M39	2.74	2.74	0.80	1.61	1.61	ø 5 c/ 12 cm	ø 5 c/ 12 cm
M40	4.24	2.74	0.80	2.48	1.61	ø 6.3 c/ 12 cm	ø 5 c/ 12 cm
M41	4.88	4.88	0.80	2.86	2.86	ø 6.3 c/ 10 cm	ø 6.3 c/ 10 cm
M42	6.92	4.92	0.80	4.06	2.88	ø 8 c/ 12 cm	ø 6.3 c/ 10 cm
M43	7.90	7.90	0.90	3.92	3.92	ø 8 c/ 12 cm	ø 8 c/ 12 cm
M44	11.99	8.53	1.11	4.55	3.23	ø 8 c/ 11 cm	ø 8 c/ 15 cm
M45	14.21	8.32	1.11	5.39	3.15	ø 10 c/ 14 cm	ø 8 c/ 15 cm
M46	12.17	12.17	1.11	4.61	4.61	ø 10 c/ 17 cm	ø 10 c/ 17 cm
M47	16.90	13.17	1.31	5.19	4.04	ø 10 c/ 15 cm	ø 10 c/ 19 cm
M48	20.65	13.37	1.41	5.79	3.74	ø 10 c/ 13 cm	ø 8 c/ 13 cm
M49	18.19	18.19	1.41	5.10	5.10	ø 10 c/ 15 cm	ø 10 c/ 15 cm
M50	24.41	19.03	1.51	6.29	4.90	ø 12.5 c/ 19 cm	ø 10 c/ 16 cm
M51	30.62	19.82	1.71	6.80	4.40	ø 12.5 c/ 18 cm	ø 8 c/ 11 cm
M52	25.18	25.18	1.61	6.01	6.01	ø 10 c/ 13 cm	ø 10 c/ 13 cm
M53	34.65	27.01	1.81	7.20	5.61	ø 12.5 c/ 17 cm	ø 10 c/ 13 cm

continua

continuação

Laje	M_x [kN.m]	M_y [kN.m]	$A_{s, \text{mín}}$ [cm ² /m]	$A_s x$ [cm ² /m]	$A_s y$ [cm ² /m]	Armadura vão l_x	Armadura vão l_y
M54	38.72	27.54	1.91	7.56	5.38	∅ 12.5 c/ 16 cm	∅ 10 c/ 14 cm
M55	33.65	33.65	1.81	7.00	7.00	∅ 10 c/ 11 cm	∅ 10 c/ 11 cm
M56	42.34	36.09	2.01	7.79	6.64	∅ 10 c/ 10 cm	∅ 12.5 c/ 18 cm
M57	44.86	44.86	2.11	7.81	7.81	∅ 10 c/ 10 cm	∅ 10 c/ 10 cm

(fonte: elaborado pelo autor)

9.3.2 Lajes nervuradas

No dimensionamento das armaduras de flexão das lajes nervuradas (Tabela 16), os critérios adotados foram similares aos das lajes maciças, com a diferença de que os momentos solicitantes foram adaptados para as nervuras. As equações utilizadas foram as correspondentes à seção T, porém, em todos os casos a zona comprimida situou-se inteiramente na região da mesa da seção, novamente verificando-se a situação de domínio 2 para todos os elementos. Para algumas das estruturas estudadas foi necessário a adoção dos critérios de armaduras mínimas, sobretudo para as lajes de menores dimensões com carregamentos reduzidos. Por razões de simetria, o projeto das armaduras de flexão a serem dispostas nas nervuras foi realizado considerando-se duas barras por nervura. As armaduras selecionadas foram de bitolas compreendidas entre 6,3 e 16 mm.

Tabela 16 – Armaduras de flexão para as lajes nervuradas

Laje	M_x por nervura [kN.m]	M_y por nervura [kN.m]	$A_{s, \text{mín}}$ [cm ² /m]	$A_s x$ [cm ² /m]	$A_s y$ [cm ² /m]	Armadura por nervura vão l_x	Armadura por nervura vão l_y
N1	1.09	1.09	0.42	0.42	0.42	2 ∅ 6.3	2 ∅ 6.3
N2	1.69	1.09	0.42	0.42	0.42	2 ∅ 6.3	2 ∅ 6.3
N3	1.94	1.94	0.42	0.42	0.42	2 ∅ 6.3	2 ∅ 6.3
N4	2.76	1.96	0.42	0.51	0.42	2 ∅ 6.3	2 ∅ 6.3
N5	3.04	3.04	0.42	0.56	0.56	2 ∅ 6.3	2 ∅ 6.3
N6	4.31	3.06	0.42	0.79	0.56	2 ∅ 8	2 ∅ 6.3
N7	5.10	2.99	0.42	0.94	0.55	2 ∅ 8	2 ∅ 6.3
N8	4.37	4.37	0.42	0.80	0.80	2 ∅ 8	2 ∅ 8
N9	5.70	4.44	0.42	1.05	0.82	2 ∅ 10	2 ∅ 8

continua

continuação

Laje	M_x por nervura [kN.m]	M_y por nervura [kN.m]	$A_{s, \min}$ [cm ² /m]	$A_s x$ [cm ² /m]	$A_s y$ [cm ² /m]	Armadura por nervura vão l_x	Armadura por nervura vão l_y
N10	6.90	4.47	0.44	1.20	0.78	2 ϕ 10	2 ϕ 8
N11	5.95	5.95	0.42	1.10	1.10	2 ϕ 10	2 ϕ 10
N12	7.96	6.20	0.47	1.25	0.97	2 ϕ 10	2 ϕ 8
N13	9.48	6.13	0.47	1.30	0.84	2 ϕ 10	2 ϕ 8
N14	8.01	8.01	0.47	1.10	1.10	2 ϕ 10	2 ϕ 10
N15	11.46	8.93	0.51	1.57	1.22	2 ϕ 10	2 ϕ 10
N16	12.47	8.87	0.51	1.71	1.22	2 ϕ 12.5	2 ϕ 10
N17	11.13	11.13	0.51	1.52	1.52	2 ϕ 10	2 ϕ 10
N18	13.81	11.77	0.57	1.56	1.33	2 ϕ 10	2 ϕ 10
N19	15.25	15.25	0.77	1.79	1.79	2 ϕ 12.5	2 ϕ 12.5
N20	1.45	1.45	0.42	0.42	0.42	2 ϕ 6.3	2 ϕ 6.3
N21	2.24	1.45	0.42	0.42	0.42	2 ϕ 6.3	2 ϕ 6.3
N22	2.58	2.58	0.42	0.47	0.47	2 ϕ 6.3	2 ϕ 6.3
N23	3.66	2.60	0.42	0.67	0.48	2 ϕ 8	2 ϕ 6.3
N24	4.03	4.03	0.42	0.74	0.74	2 ϕ 8	2 ϕ 8
N25	5.72	4.07	0.42	1.05	0.75	2 ϕ 10	2 ϕ 8
N26	6.78	3.97	0.42	1.25	0.73	2 ϕ 10	2 ϕ 8
N27	5.80	5.80	0.42	1.07	1.07	2 ϕ 10	2 ϕ 10
N28	7.56	5.90	0.42	1.39	1.09	2 ϕ 10	2 ϕ 10
N29	9.12	5.90	0.44	1.59	1.03	2 ϕ 12.5	2 ϕ 10
N30	8.03	8.03	0.44	1.40	1.40	2 ϕ 10	2 ϕ 10
N31	10.53	8.21	0.47	1.44	1.13	2 ϕ 10	2 ϕ 10
N32	12.91	8.36	0.50	1.77	1.14	2 ϕ 12.5	2 ϕ 10
N33	10.56	10.56	0.47	1.45	1.45	2 ϕ 10	2 ϕ 10
N34	14.78	11.52	0.51	2.02	1.58	2 ϕ 12.5	2 ϕ 12.5
N35	16.56	11.78	0.57	1.87	1.33	2 ϕ 12.5	2 ϕ 10
N36	14.78	14.78	0.57	1.67	1.67	2 ϕ 12.5	2 ϕ 12.5
N37	17.65	15.05	0.57	1.99	1.70	2 ϕ 12.5	2 ϕ 12.5
N38	19.23	19.23	0.77	2.25	2.25	2 ϕ 12.5	2 ϕ 12.5
N39	1.69	1.69	0.42	0.42	0.42	2 ϕ 6.3	2 ϕ 6.3
N40	2.61	1.69	0.42	0.48	0.42	2 ϕ 6.3	2 ϕ 6.3
N41	3.00	3.00	0.42	0.55	0.55	2 ϕ 6.3	2 ϕ 6.3
N42	4.26	3.03	0.42	0.78	0.56	2 ϕ 8	2 ϕ 6.3
N43	4.69	4.69	0.42	0.86	0.86	2 ϕ 8	2 ϕ 8
N44	6.66	4.74	0.42	1.23	0.87	2 ϕ 10	2 ϕ 8
N45	7.89	4.62	0.42	1.45	0.85	2 ϕ 10	2 ϕ 8

continua

continuação

Laje	M_x por nervura [kN.m]	M_y por nervura [kN.m]	$A_{s, \text{mín}}$ [cm ² /m]	$A_s x$ [cm ² /m]	$A_s y$ [cm ² /m]	Armadura por nervura vão l_x	Armadura por nervura vão l_y
N46	6.76	6.76	0.42	1.24	1.24	2 ϕ 10	2 ϕ 10
N47	8.93	6.96	0.44	1.55	1.21	2 ϕ 10	2 ϕ 10
N48	10.62	6.87	0.47	1.67	1.08	2 ϕ 12.5	2 ϕ 10
N49	9.36	9.36	0.47	1.47	1.47	2 ϕ 10	2 ϕ 10
N50	12.23	9.53	0.47	1.68	1.31	2 ϕ 12.5	2 ϕ 10
N51	15.42	9.98	0.51	2.11	1.37	2 ϕ 12.5	2 ϕ 10
N52	12.61	12.61	0.50	1.73	1.73	2 ϕ 12.5	2 ϕ 12.5
N53	17.43	13.59	0.57	1.97	1.54	2 ϕ 12.5	2 ϕ 10
N54	18.97	13.50	0.57	2.14	1.52	2 ϕ 12.5	2 ϕ 10
N55	16.93	16.93	0.57	1.91	1.91	2 ϕ 12.5	2 ϕ 12.5
N56	21.17	18.04	0.77	2.48	2.11	2 ϕ 16	2 ϕ 12.5
N57	21.96	21.96	0.63	2.18	2.18	2 ϕ 12.5	2 ϕ 12.5

(fonte: elaborado pelo autor)

Visto que a norma estabelece critérios específicos para a verificação da flexão das mesas das lajes nervuradas (item 3.2.4), os elementos com espaçamentos entre eixos de nervuras entre 65 cm e 110 cm demandariam análise particular. Entretanto, todas as mesas foram submetidas à conferência (Tabela 17), dada a sistemática operacional simplificada disponível com o Excel. Todas as lajes dimensionadas exigiram armaduras de flexão na mesa de ordem inferior a 0,98 cm²/m (área de aço correspondente à armadura mínima adotada), resultando em uma distribuição uniforme de barras de diâmetro de 5 mm espaçadas de 20 cm.

Tabela 17 – Armaduras de flexão para as mesas das lajes nervuradas

Laje	M_{mesa} [kN.m]	$A_{s, \text{mín}}$ [cm ² /m]	A_s calculado [cm ² /m]	Armadura distribuída na mesa
N1	0.21	0.42	0.42	ϕ 5 c/ 20 cm
N2	0.21	0.42	0.42	ϕ 5 c/ 20 cm
N3	0.21	0.42	0.42	ϕ 5 c/ 20 cm
N4	0.21	0.42	0.42	ϕ 5 c/ 20 cm
N5	0.21	0.42	0.42	ϕ 5 c/ 20 cm
N6	0.21	0.42	0.42	ϕ 5 c/ 20 cm
N7	0.21	0.42	0.42	ϕ 5 c/ 20 cm

continua

continuação

Laje	M _{mesa} [kN.m]	A _{s, mín} [cm ² /m]	A _s calculado [cm ² /m]	Armadura distribuída na mesa
N8	0.21	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N9	0.21	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N10	0.22	0.44	0.44	ø 5 c/ 20 cm
N11	0.21	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N12	0.25	0.47	0.47	ø 5 c/ 20 cm
N13	0.25	0.47	0.47	ø 5 c/ 20 cm
N14	0.25	0.47	0.47	ø 5 c/ 20 cm
N15	0.24	0.51	0.51	ø 5 c/ 20 cm
N16	0.24	0.51	0.51	ø 5 c/ 20 cm
N17	0.24	0.51	0.51	ø 5 c/ 20 cm
N18	0.28	0.57	0.57	ø 5 c/ 20 cm
N19	0.46	0.77	0.77	ø 5 c/ 20 cm
N20	0.27	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N21	0.27	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N22	0.27	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N23	0.27	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N24	0.27	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N25	0.27	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N26	0.27	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N27	0.27	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N28	0.27	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N29	0.29	0.44	0.44	ø 5 c/ 20 cm
N30	0.29	0.44	0.44	ø 5 c/ 20 cm
N31	0.33	0.47	0.47	ø 5 c/ 20 cm
N32	0.34	0.50	0.50	ø 5 c/ 20 cm
N33	0.33	0.47	0.47	ø 5 c/ 20 cm
N34	0.31	0.51	0.51	ø 5 c/ 20 cm
N35	0.36	0.57	0.57	ø 5 c/ 20 cm
N36	0.36	0.57	0.57	ø 5 c/ 20 cm
N37	0.36	0.57	0.57	ø 5 c/ 20 cm
N38	0.58	0.77	0.77	ø 5 c/ 20 cm
N39	0.32	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N40	0.32	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N41	0.32	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N42	0.32	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N43	0.32	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N44	0.32	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm

continua

continuação

Laje	M_{mesa} [kN.m]	$A_{s, \text{mín}}$ [cm ² /m]	A_s calculado [cm ² /m]	Armadura distribuída na mesa
N45	0.32	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N46	0.32	0.42	0.42	ø 5 c/ 20 cm
N47	0.33	0.44	0.44	ø 5 c/ 20 cm
N48	0.38	0.47	0.47	ø 5 c/ 20 cm
N49	0.38	0.47	0.47	ø 5 c/ 20 cm
N50	0.38	0.47	0.47	ø 5 c/ 20 cm
N51	0.36	0.51	0.51	ø 5 c/ 20 cm
N52	0.39	0.50	0.50	ø 5 c/ 20 cm
N53	0.42	0.57	0.57	ø 5 c/ 20 cm
N54	0.42	0.57	0.57	ø 5 c/ 20 cm
N55	0.42	0.57	0.57	ø 5 c/ 20 cm
N56	0.66	0.77	0.77	ø 5 c/ 20 cm
N57	0.44	0.63	0.63	ø 5 c/ 20 cm

(fonte: elaborado pelo autor)

9.4 VERIFICAÇÃO AO CISALHAMENTO

9.4.1 Lajes maciças

Todas as lajes maciças atenderam à condição exposta no item 7.2.1, dispensando, portanto, o dimensionamento de estribos, conforme verifica-se na Tabela 18.

Tabela 18 – Verificação ao cisalhamento das lajes maciças

Laje	R_x [kN/m]	R_y [kN/m]	$V_{sd \ x}$ [kN/m]	$V_{Rd1 \ x}$ [kN/m]	$V_{Rd1} \geq V_{sd}?$	$V_{sd \ y}$ [kN/m]	$V_{Rd1 \ y}$ [kN/m]	$V_{Rd1} \geq V_{sd}?$
M1	3.30	3.30	4.62	39.67	Sim	4.62	39.67	Sim
M2	3.47	4.00	4.86	40.57	Sim	5.60	39.67	Sim
M3	4.40	4.40	6.16	41.28	Sim	6.16	41.28	Sim
M4	4.59	5.12	6.43	42.74	Sim	7.17	41.28	Sim
M5	5.50	5.50	7.70	43.90	Sim	7.70	43.90	Sim
M6	6.39	7.13	8.95	57.09	Sim	9.98	54.99	Sim
M7	6.49	7.72	9.09	58.37	Sim	10.80	54.99	Sim
M8	7.35	7.35	10.29	57.09	Sim	10.29	57.09	Sim
M9	8.39	9.10	11.75	70.55	Sim	12.75	68.57	Sim

continua

continuação

Laje	R_x [kN/m]	R_y [kN/m]	$V_{sd X}$ [kN/m]	$V_{Rd1 X}$ [kN/m]	$V_{Rd1} \geq V_{sd}?$	$V_{sd Y}$ [kN/m]	$V_{Rd1 Y}$ [kN/m]	$V_{Rd1} \geq V_{sd}?$
M10	8.92	10.27	12.48	77.64	Sim	14.38	74.24	Sim
M11	9.45	9.45	13.23	71.12	Sim	13.23	71.12	Sim
M12	10.70	11.61	14.98	84.76	Sim	16.25	82.52	Sim
M13	11.32	13.04	15.85	92.09	Sim	18.26	87.77	Sim
M14	12.30	12.30	17.22	89.87	Sim	17.22	89.87	Sim
M15	13.78	14.95	19.29	103.48	Sim	20.93	100.85	Sim
M16	13.89	15.48	19.44	104.39	Sim	21.67	100.85	Sim
M17	14.96	14.96	20.95	103.48	Sim	20.95	103.48	Sim
M18	16.47	17.37	23.06	115.42	Sim	24.32	113.74	Sim
M19	18.50	18.50	25.90	120.81	Sim	25.90	120.81	Sim
M20	4.43	4.43	6.20	40.05	Sim	6.20	40.05	Sim
M21	4.66	5.36	6.52	41.91	Sim	7.51	40.05	Sim
M22	5.90	5.90	8.26	42.74	Sim	8.26	42.74	Sim
M23	6.16	6.87	8.62	44.95	Sim	9.61	42.74	Sim
M24	7.69	7.69	10.76	51.33	Sim	10.76	51.33	Sim
M25	8.35	9.31	11.69	59.32	Sim	13.04	56.58	Sim
M26	8.81	10.47	12.34	66.72	Sim	14.66	62.07	Sim
M27	9.98	9.98	13.97	65.01	Sim	13.97	65.01	Sim
M28	10.72	11.63	15.01	72.82	Sim	16.29	70.55	Sim
M29	11.28	13.00	15.80	80.35	Sim	18.20	75.97	Sim
M30	12.51	12.51	17.52	78.83	Sim	17.52	78.83	Sim
M31	13.87	15.05	19.42	92.09	Sim	21.07	89.42	Sim
M32	14.54	16.76	20.36	99.63	Sim	23.46	94.69	Sim
M33	15.30	15.30	21.42	92.09	Sim	21.42	92.09	Sim
M34	16.89	18.32	23.64	106.03	Sim	25.65	102.68	Sim
M35	17.54	19.56	24.55	112.25	Sim	27.38	107.84	Sim
M36	18.90	18.90	26.46	110.83	Sim	26.46	110.83	Sim
M37	19.93	21.02	27.90	118.81	Sim	29.43	116.30	Sim
M38	22.25	22.25	31.15	124.17	Sim	31.15	124.17	Sim
M39	5.18	5.18	7.25	40.57	Sim	7.25	40.57	Sim
M40	5.44	6.27	7.62	42.74	Sim	8.78	40.57	Sim
M41	6.90	6.90	9.66	43.90	Sim	9.66	43.90	Sim
M42	7.20	8.03	10.09	46.29	Sim	11.24	43.90	Sim
M43	8.94	8.94	12.51	52.66	Sim	12.51	52.66	Sim
M44	9.98	11.13	13.98	65.98	Sim	15.58	63.30	Sim

continua

continuação

Laje	R_x [kN/m]	R_y [kN/m]	$V_{sd\ X}$ [kN/m]	$V_{Rd1\ X}$ [kN/m]	$V_{Rd1} \geq V_{sd}?$	$V_{sd\ Y}$ [kN/m]	$V_{Rd1\ Y}$ [kN/m]	$V_{Rd1} \geq V_{sd}?$
M45	10.14	12.05	14.19	68.26	Sim	16.87	63.30	Sim
M46	11.48	11.48	16.07	66.09	Sim	16.07	66.09	Sim
M47	12.67	13.74	17.73	79.52	Sim	19.24	77.14	Sim
M48	13.26	15.27	18.56	87.19	Sim	21.38	82.52	Sim
M49	14.70	14.70	20.58	85.44	Sim	20.58	85.44	Sim
M50	15.68	17.01	21.96	93.90	Sim	23.82	90.59	Sim
M51	16.85	19.41	23.58	106.03	Sim	27.17	101.29	Sim
M52	17.80	17.80	24.92	98.74	Sim	24.92	98.74	Sim
M53	19.48	21.13	27.27	112.42	Sim	29.58	109.95	Sim
M54	20.15	22.47	28.21	118.81	Sim	31.45	114.53	Sim
M55	21.15	21.15	29.61	112.25	Sim	29.61	112.25	Sim
M56	22.81	24.06	31.93	124.55	Sim	33.68	122.42	Sim
M57	25.38	25.38	35.53	129.82	Sim	35.53	129.82	Sim

(fonte: elaborado pelo autor)

9.4.2 Lajes nervuradas

Para os três casos em que uma laje nervurada dimensionada resultou em um espaçamento entre nervuras maior de 65 cm, as espessuras médias das nervuras foram de 14,8 cm. Portanto, todas as lajes nervuradas dimensionadas puderam ter a verificação ao cisalhamento conforme o disposto no item 7.2.1. Analogamente às lajes maciças, para todos os elementos foi dispensada a necessidade de estribos (Tabela 19).

Tabela 19 – Verificação ao cisalhamento das lajes nervuradas

Laje	R_x por nervura [kN/m]	R_y por nervura [kN/m]	$V_{sd\ X}$ [kN/m]	$V_{Rd1\ X}$ [kN/m]	$V_{Rd1} \geq V_{sd}?$	$V_{sd\ Y}$ [kN/m]	$V_{Rd1\ Y}$ [kN/m]	$V_{Rd1} \geq V_{sd}?$
N1	2.06	2.06	2.89	9.85	Sim	2.89	9.85	Sim
N2	2.17	2.50	3.04	9.85	Sim	3.50	9.85	Sim
N3	2.75	2.75	3.85	9.85	Sim	3.85	9.85	Sim
N4	2.87	3.20	4.02	9.85	Sim	4.48	9.85	Sim
N5	3.44	3.44	4.81	9.85	Sim	4.81	9.85	Sim

continua

continuação

	R_x por Laje nervura [kN/m]	R_y por nervura [kN/m]	$V_{sd\ X}$ [kN/m]	$V_{Rd1\ X}$ [kN/m]	$V_{Rd1} \geq V_{sd}?$	$V_{sd\ Y}$ [kN/m]	$V_{Rd1\ Y}$ [kN/m]	$V_{Rd1} \geq V_{sd}?$
N6	3.59	4.00	5.02	10.63	Sim	5.60	9.85	Sim
N7	3.64	4.33	5.10	10.63	Sim	6.06	9.85	Sim
N8	4.12	4.12	5.77	10.63	Sim	5.77	10.63	Sim
N9	4.27	4.63	5.98	11.80	Sim	6.49	10.63	Sim
N10	4.43	5.10	6.20	12.77	Sim	7.15	11.61	Sim
N11	4.81	4.81	6.73	11.80	Sim	6.73	11.80	Sim
N12	5.11	5.55	7.16	13.24	Sim	7.77	12.10	Sim
N13	5.21	6.01	7.30	12.86	Sim	8.41	11.74	Sim
N14	5.66	5.66	7.93	12.86	Sim	7.93	12.86	Sim
N15	6.44	6.99	9.02	16.48	Sim	9.78	16.48	Sim
N16	6.49	7.24	9.09	18.23	Sim	10.13	16.48	Sim
N17	6.99	6.99	9.79	16.48	Sim	9.79	16.48	Sim
N18	7.44	7.84	10.41	18.13	Sim	10.98	18.13	Sim
N19	8.63	8.63	12.08	28.14	Sim	12.08	28.14	Sim
N20	2.74	2.74	3.83	9.85	Sim	3.83	9.85	Sim
N21	2.88	3.32	4.03	9.85	Sim	4.64	9.85	Sim
N22	3.65	3.65	5.11	9.85	Sim	5.11	9.85	Sim
N23	3.81	4.25	5.33	10.63	Sim	5.94	9.85	Sim
N24	4.56	4.56	6.38	10.63	Sim	6.38	10.63	Sim
N25	4.76	5.31	6.66	11.80	Sim	7.43	10.63	Sim
N26	4.83	5.75	6.77	11.80	Sim	8.04	10.63	Sim
N27	5.47	5.47	7.66	11.80	Sim	7.66	11.80	Sim
N28	5.67	6.15	7.94	11.80	Sim	8.61	11.80	Sim
N29	5.85	6.74	8.19	14.58	Sim	9.44	12.77	Sim
N30	6.49	6.49	9.08	12.77	Sim	9.08	12.77	Sim
N31	6.77	7.34	9.47	12.86	Sim	10.28	12.86	Sim
N32	7.10	8.18	9.94	16.56	Sim	11.46	14.81	Sim
N33	7.46	7.46	10.45	12.86	Sim	10.45	12.86	Sim
N34	8.30	9.01	11.63	18.23	Sim	12.61	18.23	Sim
N35	8.62	9.61	12.07	19.82	Sim	13.45	18.13	Sim
N36	9.29	9.29	13.00	19.82	Sim	13.00	19.82	Sim
N37	9.51	10.03	13.32	19.82	Sim	14.04	19.82	Sim
N38	10.88	10.88	15.23	28.14	Sim	15.23	28.14	Sim
N39	3.19	3.19	4.46	9.85	Sim	4.46	9.85	Sim

continua

continuação

	R_x por Laje nervura [kN/m]	R_y por nervura [kN/m]	$V_{sd\ X}$ [kN/m]	$V_{Rd1\ X}$ [kN/m]	$V_{Rd1} \geq V_{sd}?$	$V_{sd\ Y}$ [kN/m]	$V_{Rd1\ Y}$ [kN/m]	$V_{Rd1} \geq V_{sd}?$
N40	3.35	3.86	4.69	9.85	Sim	5.41	9.85	Sim
N41	4.25	4.25	5.95	9.85	Sim	5.95	9.85	Sim
N42	4.43	4.94	6.21	10.63	Sim	6.92	9.85	Sim
N43	5.31	5.31	7.43	10.63	Sim	7.43	10.63	Sim
N44	5.54	6.18	7.76	11.80	Sim	8.65	10.63	Sim
N45	5.63	6.69	7.88	11.80	Sim	9.37	10.63	Sim
N46	6.37	6.37	8.92	11.80	Sim	8.92	11.80	Sim
N47	6.69	7.26	9.37	12.77	Sim	10.17	12.77	Sim
N48	6.82	7.85	9.54	15.02	Sim	11.00	13.24	Sim
N49	7.56	7.56	10.58	13.24	Sim	10.58	13.24	Sim
N50	7.85	8.52	11.00	14.61	Sim	11.93	12.86	Sim
N51	8.48	9.77	11.88	18.23	Sim	13.68	16.48	Sim
N52	8.92	8.92	12.48	16.56	Sim	12.48	16.56	Sim
N53	9.80	10.63	13.71	19.82	Sim	14.88	18.13	Sim
N54	9.87	11.01	13.82	19.82	Sim	15.41	18.13	Sim
N55	10.64	10.64	14.89	19.82	Sim	14.89	19.82	Sim
N56	11.40	12.03	15.97	31.15	Sim	16.84	28.14	Sim
N57	12.42	12.42	17.39	22.54	Sim	17.39	22.54	Sim

(fonte: elaborado pelo autor)

9.5 CONSUMO DE MATERIAIS

Os consumos de materiais, foram feitos de maneira simplificada, de modo que:

- os volumes de concreto calculados para as lajes não levaram em consideração os espaços de inserção das armaduras;
- na aplicação dos espaçamentos de distribuição das barras de aço, os diâmetros das mesmas foram considerados como pontuais.

Os resultados obtidos para o consumo de concreto (em metros cúbicos) e aço (em quilogramas), para os carregamentos acidentais de 1,5 kN/m², 3 kN/m² e 4 kN/m², estão expostos, respectivamente, na Tabela 20, Tabela 21 e Tabela 22:

Tabela 20 – Consumo de materiais nas lajes com carregamento $q = 1,5 \text{ kN/m}^2$

Vãos	Consumo concreto em lajes M [m ³]	Consumo concreto em lajes N [m ³]	Consumo De aço em lajes M [kg]	Consumo De aço em lajes N [kg]	Diferença de consumo de concreto M [%]	Diferença de consumo de aço M [%]
3x3	0.72	0.78	18.24	29.10	-4.19	-22.94
3x4	0.96	1.04	27.52	39.62	-4.19	-18.02
4x4	1.28	1.39	49.00	51.73	-4.19	-2.71
4x5	1.60	1.74	69.34	65.48	-4.19	2.86
5x5	2.00	2.18	117.60	80.83	-4.19	18.53
5x6	3.00	2.61	129.35	110.32	6.95	7.94
5x7	3.50	3.05	163.22	128.93	6.95	11.74
6x6	3.60	3.13	180.12	152.40	6.95	8.34
6x7	5.04	3.65	214.88	205.76	15.94	2.17
6x8	6.24	4.37	254.34	232.51	17.65	4.48
7x7	5.88	4.26	302.33	279.95	15.94	3.84
7x8	7.84	5.15	364.68	260.41	20.69	16.68
7x9	9.45	5.86	419.85	292.27	23.46	17.92
8x8	9.60	5.95	429.76	345.40	23.46	10.88
8x9	12.24	7.99	533.09	408.53	21.00	13.23
8x10	13.60	8.88	613.30	532.37	21.00	7.06
9x9	13.77	8.99	666.36	457.32	21.00	18.60
9x10	17.10	10.71	749.66	487.62	22.98	21.18
10x10	20.00	13.40	888.48	641.50	19.76	16.14

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 21 – Consumo de materiais nas lajes com carregamento $q = 3,0 \text{ kN/m}^2$

Vãos	Consumo concreto em lajes M [m ³]	Consumo concreto em lajes N [m ³]	Consumo De aço em lajes M [kg]	Consumo De aço em lajes N [kg]	Diferença de consumo de concreto M [%]	Diferença de consumo de aço M [%]
3x3	0.72	0.78	20.16	29.10	-4.19	-18.15
3x4	0.96	1.04	33.36	39.62	-4.19	-8.58
4x4	1.28	1.39	62.72	51.73	-4.19	9.60
4x5	1.60	1.74	93.24	73.48	-4.19	11.85
5x5	2.25	2.18	134.30	105.83	1.69	11.85
5x6	3.00	2.61	167.09	146.82	6.95	6.46
5x7	3.85	3.05	197.62	171.93	11.68	6.95
6x6	3.96	3.13	222.12	205.68	11.68	3.84
6x7	5.04	3.65	274.29	242.02	15.94	6.25

continua

continuação

Vãos	Consumo concreto em lajes M [m ³]	Consumo concreto em lajes N [m ³]	Consumo De aço em lajes M [kg]	Consumo De aço em lajes N [kg]	Diferença de consumo de concreto M [%]	Diferença de consumo de aço M [%]
6x8	6.24	4.37	321.88	319.93	17.65	0.30
7x7	6.37	4.46	362.80	276.65	17.65	13.47
7x8	8.40	5.21	415.24	304.13	23.46	15.45
7x9	10.08	6.36	485.82	399.77	22.61	9.72
8x8	9.60	5.95	533.09	345.40	23.46	21.36
8x9	12.24	7.99	640.09	573.02	21.00	5.53
8x10	14.40	9.52	698.06	507.48	20.40	15.81
9x9	14.58	9.64	780.03	609.62	20.40	12.26
9x10	17.10	10.71	940.85	680.32	22.98	16.07
10x10	20.00	13.40	1117.08	641.50	19.76	27.04

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 22 – Consumo de materiais nas lajes com carregamento $q = 4,0 \text{ kN/m}^2$

Vãos	Consumo concreto em lajes M [m ³]	Consumo concreto em lajes N [m ³]	Consumo De aço em lajes M [kg]	Consumo De aço em lajes N [kg]	Diferença de consumo de concreto M [%]	Diferença de consumo de aço M [%]
3x3	0.72	0.78	23.04	29.10	-4.19	-11.62
3x4	0.96	1.04	38.12	39.62	-4.19	-1.93
4x4	1.28	1.39	74.48	51.73	-4.19	18.02
4x5	1.60	1.74	109.36	73.48	-4.19	19.62
5x5	2.25	2.18	158.00	105.83	1.69	19.77
5x6	3.30	2.61	174.99	146.82	11.68	8.75
5x7	3.85	3.05	229.32	171.93	11.68	14.30
6x6	3.96	3.13	251.74	205.68	11.68	10.07
6x7	5.46	3.82	291.84	239.15	17.65	9.92
6x8	6.72	4.42	342.47	304.97	20.69	5.79
7x7	6.86	4.51	380.07	264.45	20.69	17.94
7x8	8.40	5.21	472.86	356.29	23.46	14.06
7x9	10.71	6.99	523.15	419.37	21.00	11.01
8x8	10.24	6.46	572.58	481.67	22.61	8.62
8x9	12.96	8.57	699.92	458.61	20.40	20.83
8x10	15.20	9.52	775.48	507.48	22.98	20.89
9x9	14.58	9.64	832.95	609.62	20.40	15.48
9x10	18.00	12.06	956.11	704.30	19.76	15.17
10x10	21.00	13.50	1122.94	752.62	21.74	19.74

(fonte: elaborado pelo autor)

10 ANÁLISE DOS RESULTADOS

De forma a facilitar a análise comparativa dos dados obtidos, foram elaborados gráficos que ilustram as variações nos consumos dos dois materiais para as crescentes áreas de superfícies das estruturas. Foram evidenciadas as diferenças de consumo de materiais entre os dois tipos de soluções propostas para cada caso de maneira independente. As análises foram agrupadas de acordo com cada um dos 3 carregamentos estabelecidos no estudo.

Pode-se observar um padrão de comportamento constante para o consumo de ambos os materiais, sendo este atrelado ao tamanho das áreas de superfície das estruturas. Percebe-se que a alteração da magnitude do carregamento tem influência mais evidente nas quantidades absolutas de materiais empregados e não é um fator suficiente para provocar alterações na forma de desenvolvimento dos diagramas.

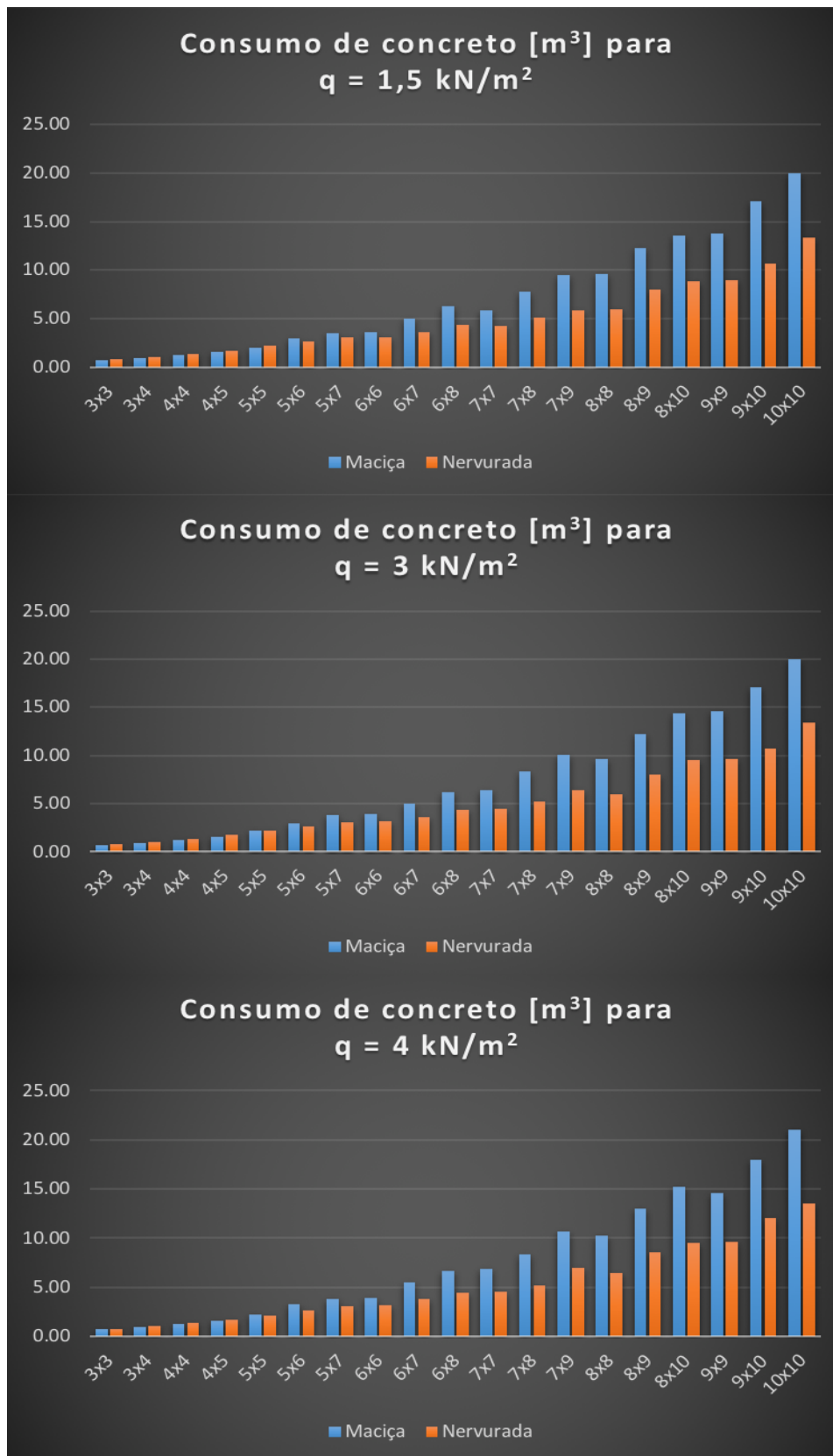
10.1 CONSUMO DE CONCRETO

Analisando-se os gráficos da Figura 16, nota-se que as lajes nervuradas se destacam como alternativa de menor consumo de concreto para vãos elevados, ao passo que apresentam equivalência ou sutil desvantagem na eficiência em relação às lajes maciças, quando propostas como solução para dimensões reduzidas.

Nos diagramas da Figura 17, observa-se que os únicos casos em que as lajes maciças apresentaram menor consumo de concreto do que as nervuradas foram dos elementos de dimensões de 3 m x 3 m, 3 m x 4 m, 4 m x 4 m e 4 m x 5 m com qualquer um dos três carregamentos acidentais e da laje de dimensões 5 m x 5 m e carregamento $q = 1,5 \text{ kN/m}^2$.

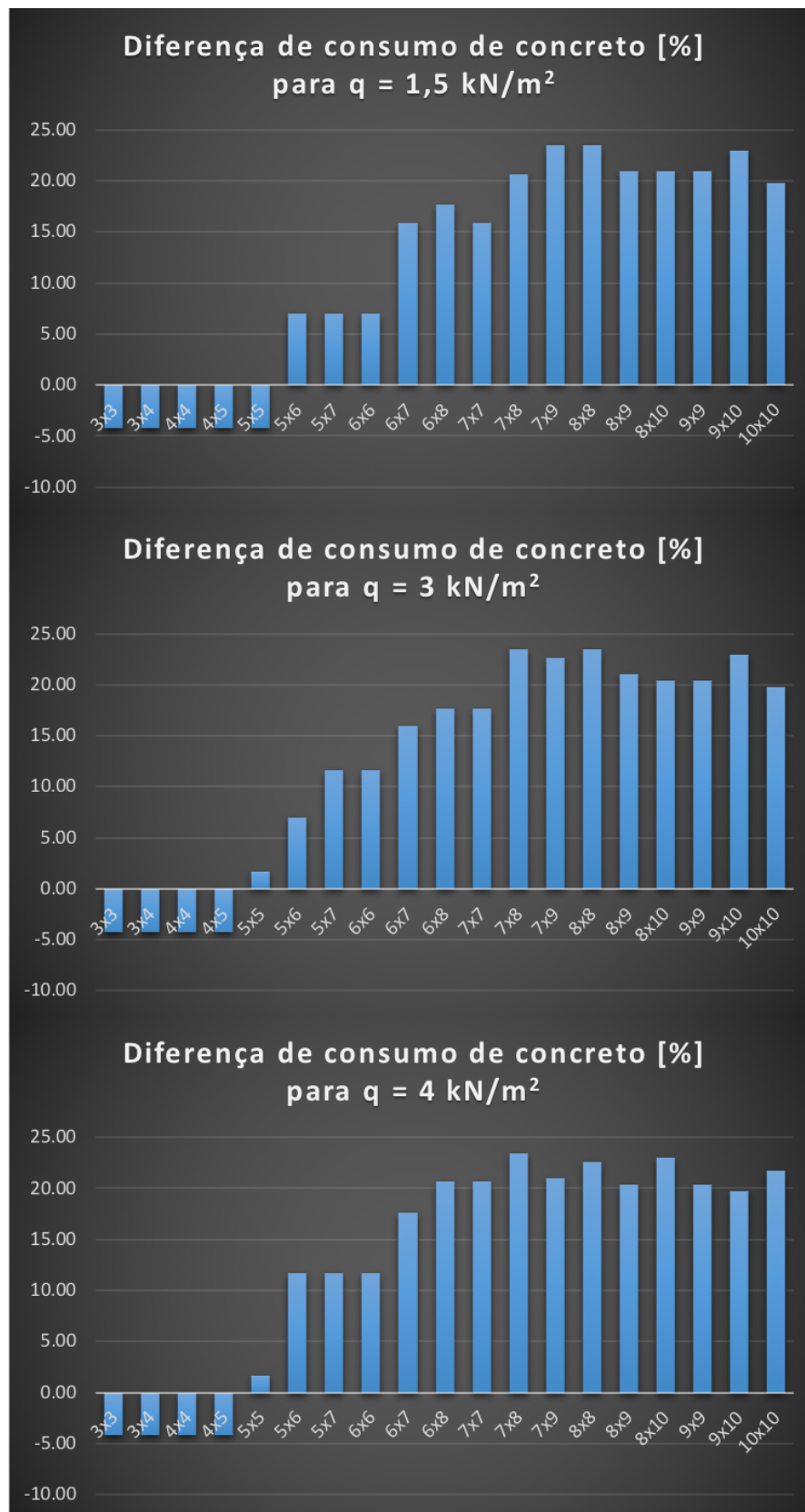
A diferença média entre os volumes de concreto consumidos entre as soluções foi de 12,54% em favor das lajes nervuradas. Considerando-se só os casos em que essa solução foi vantajosa, a diferença média aumenta para 17,48%.

Figura 16 – Gráficos de consumo de concreto



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 17 – Diferenças no consumo de concreto



(fonte: elaborado pelo autor)

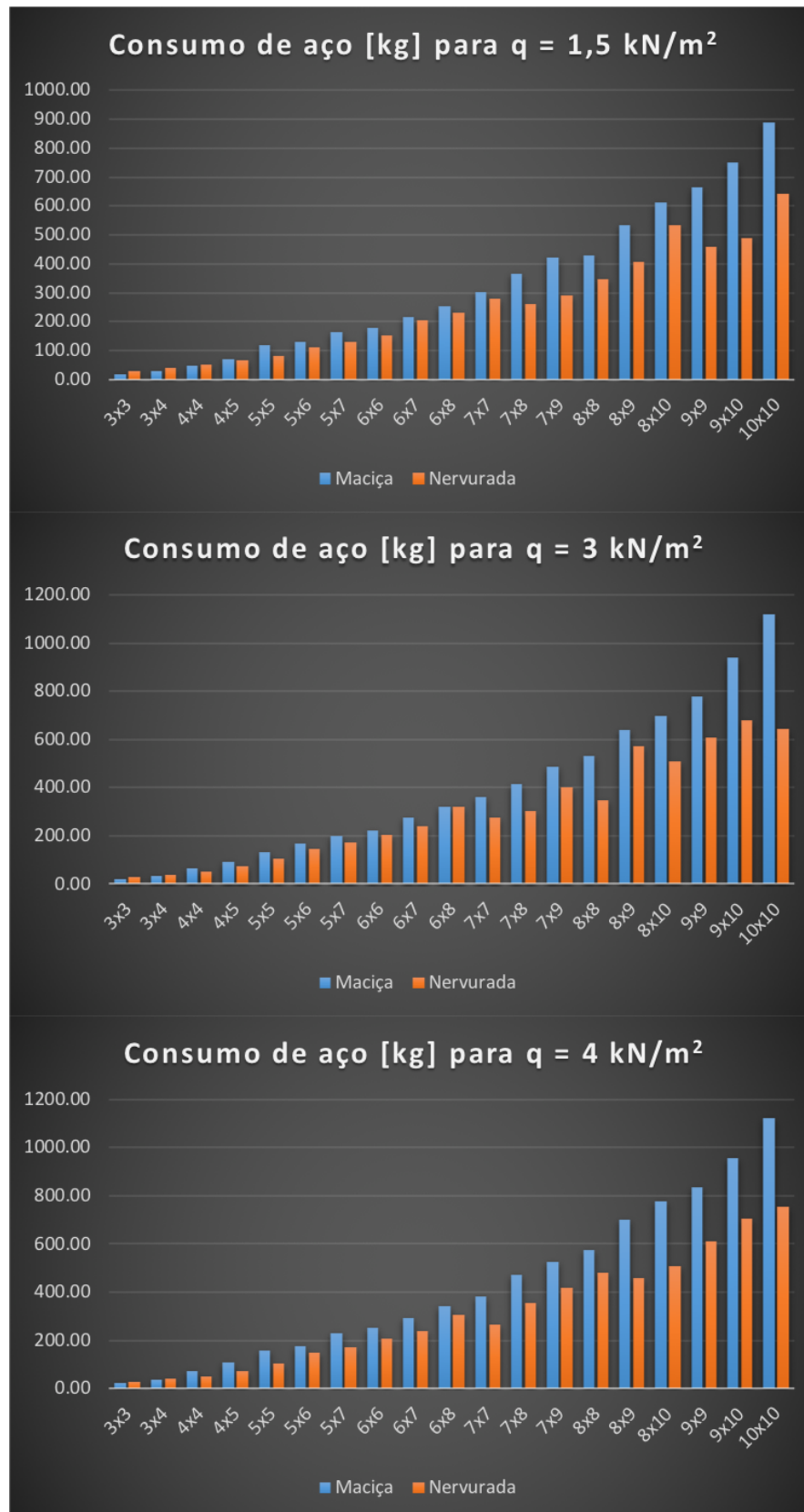
10.2 CONSUMO DE AÇO

Semelhante ao que foi exposto para o consumo de concreto, o consumo de aço torna-se significativamente mais eficiente para as lajes nervuradas conforme aumentam-se os vãos a serem vencidos, como pode ser observado nos gráficos Figura 18.

As variações em relação ao consumo de aço (Figura 19) entre as duas soluções, entretanto, apresentou oscilações bastante evidentes, sobretudo para as áreas de superfície menores. Nota-se que, para os elementos de dimensões reduzidas, o consumo de aço chega a ser cerca de 27% menor com a utilização de lajes maciças. Todavia, o consumo absoluto do material nessas situações é muito baixo, tornando a disparidade menos importante.

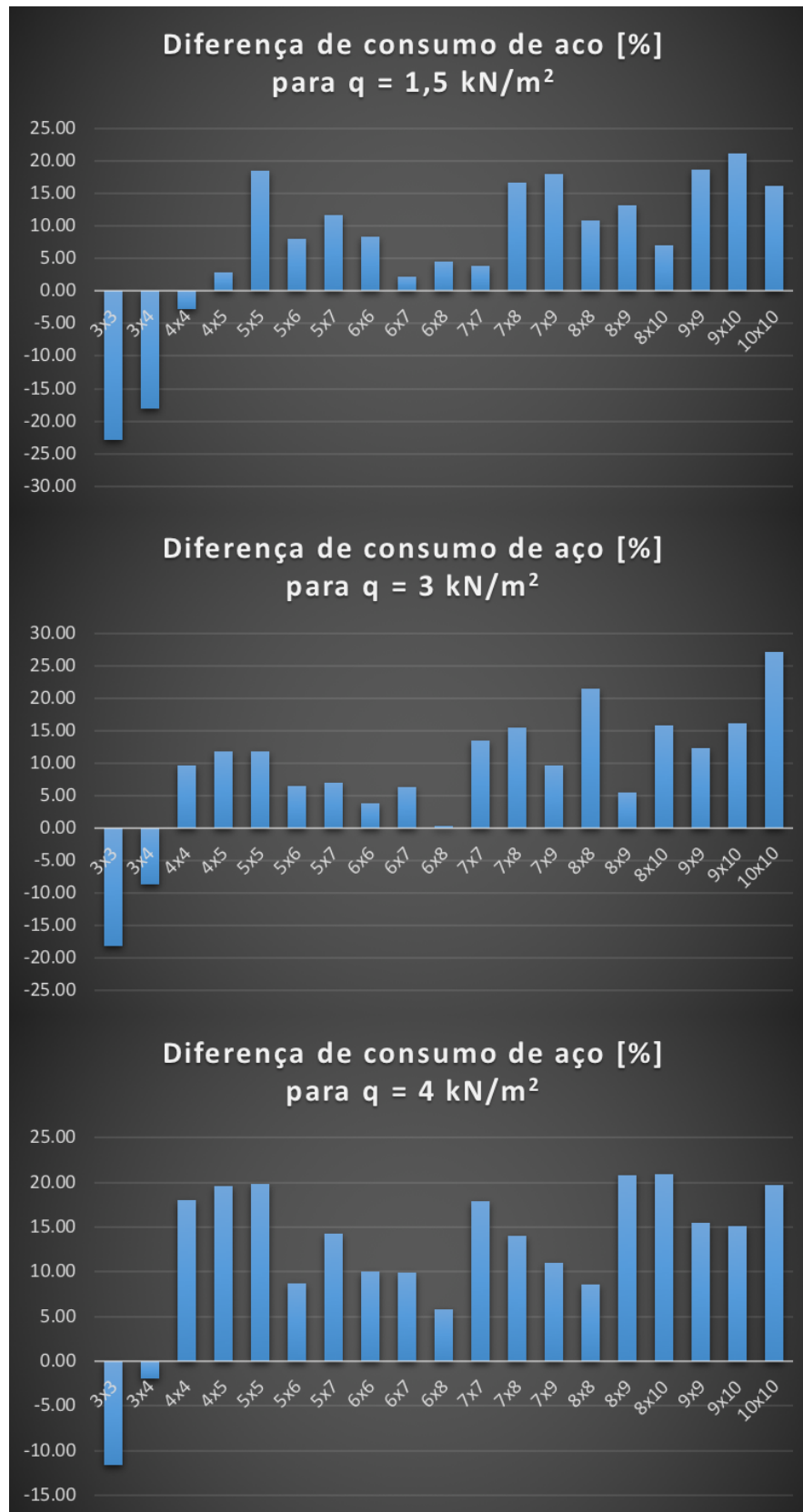
De modo geral, pode-se constatar que as soluções com lajes nervuradas apresentaram melhor desempenho, mesmo possuindo armadura de distribuição ou flexão em toda a mesa. Na média total o consumo de aço foi 9,50% menor com lajes nervuradas. Analisando-se apenas o cenário em que as lajes maciças apresentam desvantagem, a diferença média no consumo de aço chega a 12,51%.

Figura 18 – Gráficos de consumo de aço



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 19 – Diferenças no consumo de aço



(fonte: elaborado pelo autor)

11 CONCLUSÕES E ADENDOS

11.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos gráficos e diagramas obtidos para o consumo de concreto e aço em lajes maciças e nervuradas, pode-se concluir que as lajes nervuradas têm um aproveitamento de materiais maior quando os vãos entre apoios são elevados. Isso ocorre devido à forma geométrica resultante das mesmas, que proporciona rigidez equivalente empregando-se um volume de materiais reduzido.

De forma complementar, a tomada de decisão entre os sistemas no âmbito do consumo de materiais pode gerar impactos importantes no dimensionamento global das estruturas, visto que são geradas alterações nos carregamentos provenientes do peso próprio das placas, sendo estes distribuídos em todo o sistema de estruturas subsequente, até as fundações.

Por fim, um contraponto da aplicação das lajes nervuradas é a espessura total do sistema, que resultou superior à espessura das lajes maciças para todos os casos estudados. O referido parâmetro chega a atingir valores duas vezes maiores para as estruturas de dimensões de superfície inferiores e valores 50% superiores no caso dos vãos maiores. Como consequência disso, a altura dos pavimentos de uma dada edificação pode representar um fator importante a ser levado em consideração na escolha da solução empregada.

11.2 ADENDOS

É importante ressaltar que o presente trabalho não é suficientemente conclusivo para uma definição de caráter econômico entre os sistemas. A análise realizada levou em consideração apenas os quantitativos de materiais empregados na composição das estruturas, não havendo uma correlação direta entre isso e o valor total de cada sistema. Para que seja feita uma tomada de decisão mais adequada, devem ser julgados também fatores como custos de mão-de-obra, tempo de execução, valores dos equipamentos utilizados para a concepção de lajes nervuradas com cubetas (seja locação ou aquisição), restrições de projeto, etc.

Ainda, salienta-se que devido à curta disponibilidade de tempo de realização do trabalho, a abordagem foi limitada à situação de lajes simplesmente apoiadas nos 4 bordos, o que é uma situação difícil de ocorrer na prática. Para os casos de ocorrência de continuidade entre duas lajes, surgem momentos solicitantes negativos nas zonas de apoios, o que deve ser levado em conta para que haja um correto dimensionamento de armaduras na região superior da seção das lajes que estejam em configuração de engastamento, alterando, assim, os quantitativos de materiais empregados.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. 3. ed. ed. Rio Grande: Dunas, 2010a. v. 2.
- _____. **Curso de Concreto Armado**. 3.ed. ed. Rio Grande: Dunas, 2010b. v. 1.
- _____. **Curso de Concreto Armado**. 4. ed. ed. Rio Grande: Dunas, 2014. v. 4.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios, 2008.
- _____. **NBR 6120**: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.
- _____. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ATEX DO BRASIL, LOCAÇÃO DE EQUIPAMENTOS LTDA. Produtos: dados técnicos. [S. l.], 2014. Disponível em <http://www.atex.com.br/upload/PDFCalculista/folder-dados-tecnicos-site_636481789564006068.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2018.
- BESSA, V. M. R. A. **Notas de Aula - ENG01111 - Estruturas de Concreto Armado I**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- BASTOS, P. S. S. **Notas de aula – Estruturas de Concreto I: Flexão Normal Simples – Vigas**. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2015.
- CAMPOS FILHO, A. **Notas de aula - Projeto de lajes maciças de concreto armado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 1. ed. São Paulo: Editora Pini, 2009.
- FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Sistemas estruturais de lajes sem vigas: subsídios para o projeto e execução**. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.
- SOUZA, V. C. M.; CUNHA, A. J. P. **Lajes em concreto armado e protendido**. 2. ed. Niterói: EDUFF, 1998.

ANEXO A – CATÁLOGO DE FÔMAS ATEX®

FÔRMA ATEX BIDIRECIONAL

Moldam nervuras ortogonais, com larguras iguais nas duas direções, gerando uma laje nervurada adequada para relação entre o vão menor e o vão maior compreendida entre 0,5 e 1,0.

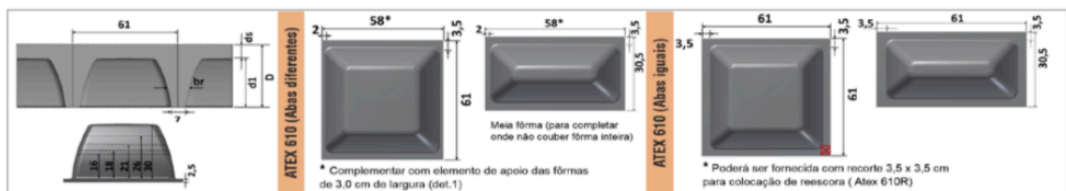
ATEX 600

ALTURA DA FÔRMA	ESPESSURA DA LÂMINA	ALTURA TOTAL	LARGURA DA NERVURA			ÁREA DA SEÇÃO	DISTÂNCIA DO C.G. à		INÉRCIA		VOLUME DO VAZIO		PESO PRÓPRIO	VOLUME DE CONCRETO
			INFERIOR	SUPERIOR	MÉDIA		FACE SUPERIOR	FACE INFERIOR	INÉRCIA P/ NERV.	ALTURA EQUIVALENTE	m ³	m ³ /m ²		
15,0	5,0	20,0	6,0	9,8	7,9	418	5,2	14,8	10290	12,7	0,041	0,113	2,18	0,087
18,0	5,0	23,0	8,0	12,5	10,3	485	6,6	16,4	18954	15,6	0,045	0,124	2,65	0,106
d1	ds	D	bi	bs	br	A	rs	ri	I	heq	V/V		CONCRETO 25kN/m ³	



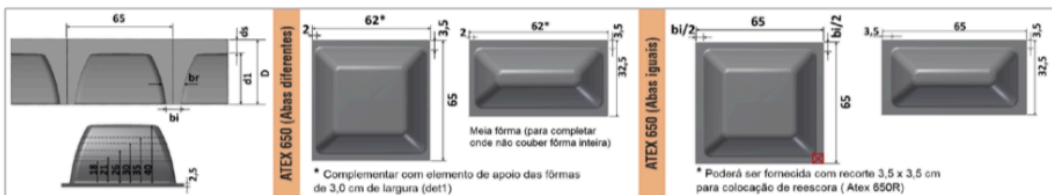
ATEX 610

ALTURA DA FÔRMA	ESPESSURA DA LÂMINA	ALTURA TOTAL	LARGURA DA NERVURA			ÁREA DA SEÇÃO	DISTÂNCIA DO C.G. à		INÉRCIA		VOLUME DO VAZIO		PESO PRÓPRIO	VOLUME DE CONCRETO
			INFERIOR	SUPERIOR	MÉDIA		FACE SUPERIOR	FACE INFERIOR	INÉRCIA P/ NERV.	ALTURA EQUIVALENTE	m ³	m ³ /m ²		
16,0	5,0	21,0	7,0	9,9	8,4	440	5,6	15,4	12933	13,7	0,044	0,119	2,28	0,091
	7,5	23,5				593	6,3	17,2	18299	15,3			2,90	0,116
	10,0	26,0				745	7,3	18,7	25336	17,1			3,53	0,141
18,0	5,0	23,0	7,0	9,9	8,5	458	6,2	16,8	16986	15,0	0,050	0,134	2,40	0,096
	7,5	25,5				611	6,8	18,7	23356	16,6			3,03	0,121
	10,0	28,0				763	7,7	20,3	31367	18,3			3,65	0,146
21,0	5,0	26,0	7,0	12,2	9,6	506	7,3	18,7	25473	17,1	0,056	0,149	2,78	0,111
	7,5	28,5				659	7,8	20,7	34104	18,9			3,40	0,136
	10,0	31,0				811	8,6	22,4	44358	20,6			4,03	0,161
26,0	5,0	31,0	7,0	14,8	10,9	588	9,2	21,8	44482	20,6	0,065	0,175	3,38	0,135
	7,5	33,5				741	9,6	23,9	57825	22,5			4,00	0,160
	10,0	36,0				893	10,2	25,8	72683	24,3			4,63	0,185
30,0	5,0	35,0	7,0	17,2	12,1	668	10,9	24,1	65517	23,4	0,072	0,193	3,93	0,157
	7,5	37,5				821	11,1	26,4	83818	25,5			4,55	0,182
	10,0	40,0				973	11,7	28,3	103553	27,3			5,18	0,207
d1	ds	D	bi	bs	br	A	rs	ri	I	heq	V/V		CONCRETO 25kN/m ³	



ATEX 650

ALTURA DA FÓRMA	ESPESSURA DA LÂMINA	ALTURA TOTAL	LARGURA DA NERVURA			ÁREA DA SEÇÃO	DISTÂNCIA DO C.G. à		INÉRCIA		VOLUME DO VAZIO		PESO PRÓPRIO	VOLUME DE CONCRETO
			INFERIOR	SUPERIOR	MÉDIA		FACE SUPERIOR	FACE INFERIOR	INÉRCIA P/ NERV.	ALTURA EQUIVALENTE	m ³	m ³ /m ²		
18,0	5,0	23,0	7,0	9,2	8,1	471	5,9	17,1	16974	14,6	0,058	0,138	2,30	0,092
	7,5	25,5				633	6,6	18,9	23295	16,3			2,93	0,117
	10,0	28,0				796	7,5	20,5	31332	18,0			3,55	0,142
21,0	5,0	26,0	7,0	9,8	8,4	501	6,9	19,1	24728	16,6	0,067	0,159	2,53	0,101
	7,5	28,5				664	7,4	21,1	32901	18,3			3,15	0,126
	10,0	31,0				826	8,2	22,8	42711	19,9			3,78	0,151
26,0	5,0	31,0	7,0	11,6	9,3	567	8,7	22,3	42880	19,9	0,081	0,191	2,98	0,119
	7,5	33,5				729	9,0	24,6	55354	21,7			3,60	0,144
	10,0	36,0				892	9,6	26,4	69257	23,4			4,23	0,169
30,0	5,0	35,0	7,0	13,0	10,0	625	10,2	24,8	62438	22,6	0,091	0,215	3,38	0,135
	7,5	37,5				788	10,3	27,2	79372	24,5			4,00	0,160
	10,0	40,0				950	10,8	29,2	97493	26,2			4,63	0,185
35,0	5,0	40,0	7,0	15,0	11,0	710	12,2	27,8	94580	25,9	0,102	0,241	3,95	0,158
	7,5	42,5				873	12,2	30,3	118568	28,0			4,58	0,183
	10,0	45,0				1035	12,6	32,4	143400	29,8			5,20	0,208
40,0	5,0	45,0	7,0	17,4	12,2	813	14,3	30,7	137193	29,4	0,112	0,264	4,65	0,186
	7,5	47,5				976	14,2	33,3	170025	31,5			5,28	0,211
	10,0	50,0				1138	14,5	35,5	203401	33,5			5,90	0,236
21,0	5,0	26,0	5,0	9,0	7,0	472	6,2	19,8	20508	15,6	0,071	0,167	2,32	0,093
	7,5	28,5				635	6,8	21,7	27369	17,2			2,94	0,118
	10,0	31,0				797	7,7	23,3	35878	18,8			3,57	0,143
d1	ds	D	bi	bs	br	A	rs	ri	I	heq	V/V	CONCRETO 25kN/m ³		



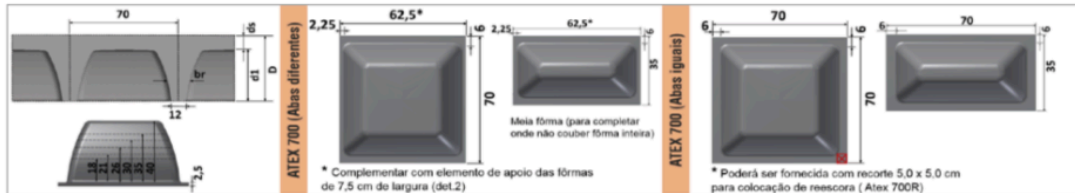
ATEX 660

ALTURA DA FÓRMA	ESPESSURA DA LÂMINA	ALTURA TOTAL	LARGURA DA NERVURA			ÁREA DA SEÇÃO	DISTÂNCIA DO C.G. à		INÉRCIA		VOLUME DO VAZIO		PESO PRÓPRIO	VOLUME DE CONCRETO
			INFERIOR	SUPERIOR	MÉDIA		FACE SUPERIOR	FACE INFERIOR	INÉRCIA P/ NERV.	ALTURA EQUIVALENTE	m ³	m ³ /m ²		
16,0	5,0	21,0	12,0	15,0	13,5	546	6,5	14,5	18869	15,1	0,044	0,101	2,73	0,109
	7,5	23,5				711	7,2	16,3	26637	16,9			3,35	0,134
	10,0	26,0				876	8,1	17,9	36353	18,8			3,98	0,159
18,0	5,0	23,0	12,0	15,0	13,5	573	7,3	15,7	24678	16,5	0,050	0,114	2,90	0,116
	7,5	25,5				738	7,8	17,7	33992	18,4			3,53	0,141
	10,0	28,0				903	8,7	19,3	45220	20,2			4,15	0,166
21,0	5,0	26,0	12,0	17,2	14,6	637	8,5	17,5	36182	18,7	0,056	0,127	3,33	0,133
	7,5	28,5				802	9,0	19,5	48625	20,7			3,95	0,158
	10,0	31,0				967	9,7	21,3	62981	22,5			4,58	0,183
26,0	5,0	31,0	12,0	19,7	15,9	743	10,5	20,5	61721	22,4	0,065	0,150	4,00	0,160
	7,5	33,5				908	10,9	22,6	80525	24,5			4,63	0,185
	10,0	36,0				1073	11,5	24,5	101169	26,4			5,25	0,210
30,0	5,0	35,0	12,0	22,2	17,1	843	12,2	22,8	89505	25,3	0,072	0,165	4,63	0,185
	7,5	37,5				1008	12,5	25,0	114715	27,5			5,25	0,210
	10,0	40,0				1173	13,1	26,9	141746	29,5			5,88	0,235
d1	ds	D	bi	bs	br	A	rs	ri	I	heq	V/V	CONCRETO 25kN/m ³		



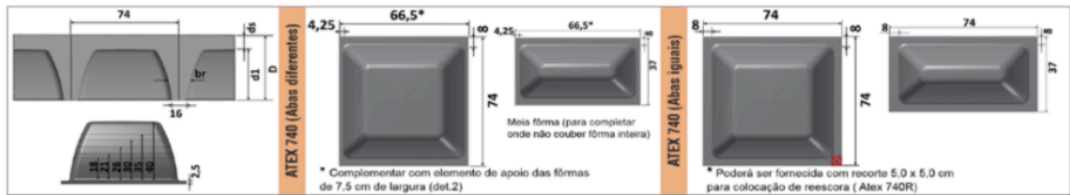
ATEX 700

ALTURA DA FÔRMA cm	ESPESSURA DA LÂMINA cm	ALTURA TOTAL cm	LARGURA DA NERVURA			ÁREA DA SEÇÃO cm ²	DISTANCIA DO C.G. à		INÉRCIA		VOLUME DO VAZIO		PESO PRÓPRIO kN/m ²	VOLUME DE CONCRETO m ³ /m ²
			INFERIOR cm	SUPERIOR cm	MÉDIA cm		FACE SUPERIOR cm	FACE INFERIOR cm	INÉRCIA P/ NERV. cm ⁴	ALTURA EQUIVALENTE cm	m ³	m ² /m ²		
18,0	5,0	23,0	12,0	14,2	13,1	586	7,0	16,0	24905	16,2	0,058	0,119	2,78	0,111
	7,5	25,5				761	7,6	17,9	34229	18,0			3,40	0,136
	10,0	28,0				936	8,5	19,5	45523	19,8			4,03	0,161
21,0	5,0	26,0	12,0	15,0	13,5	634	8,1	17,9	36015	18,3	0,067	0,137	3,08	0,123
	7,5	28,5				809	8,6	19,9	48206	20,2			3,70	0,148
	10,0	31,0				984	9,4	21,6	62285	22,0			4,33	0,173
26,0	5,0	31,0	12,0	16,4	14,2	719	10,1	20,9	60869	21,9	0,081	0,165	3,63	0,145
	7,5	33,5				894	10,4	23,1	79131	23,8			4,25	0,170
	10,0	36,0				1069	11,0	25,0	99047	25,7			4,88	0,195
30,0	5,0	35,0	12,0	18,0	15,0	800	11,8	23,2	87628	24,7	0,091	0,185	4,13	0,165
	7,5	37,5				975	11,9	25,6	112103	26,6			4,75	0,190
	10,0	40,0				1150	12,4	27,6	138016	28,7			5,38	0,215
35,0	5,0	40,0	12,0	20,0	16,0	910	13,9	26,1	130753	28,2	0,102	0,208	4,80	0,192
	7,5	42,5				1085	14,0	28,5	164577	30,4			5,43	0,217
	10,0	45,0				1260	14,4	30,7	199554	32,5			6,05	0,242
40,0	5,0	45,0	12,0	22,2	17,1	1034	16,1	28,9	186636	31,7	0,112	0,228	5,55	0,222
	7,5	47,5				1209	16,1	31,4	231618	34,1			6,18	0,247
	10,0	50,0				1384	16,4	33,6	277525	36,1			6,80	0,272
d1	ds	D	bi	bs	br	A	rs	ri	I	heq	V/V	CONCRETO 25kN/m ³		



ATEX 740

ALTURA DA FÔRMA cm	ESPESSURA DA LÂMINA cm	ALTURA TOTAL cm	LARGURA DA NERVURA			ÁREA DA SEÇÃO cm ²	DISTANCIA DO C.G. à		INÉRCIA		VOLUME DO VAZIO		PESO PRÓPRIO kN/m ²	VOLUME DE CONCRETO m ³ /m ²
			INFERIOR cm	SUPERIOR cm	MÉDIA cm		FACE SUPERIOR cm	FACE INFERIOR cm	INÉRCIA P/ NERV. cm ⁴	ALTURA EQUIVALENTE cm	m ³	m ² /m ²		
18,0	5,0	23,0	16,0	18,4	17,2	680	7,6	15,4	30604	17,1	0,058	0,106	3,10	0,124
	7,5	25,5				865	8,2	17,3	42202	19,0			3,73	0,149
	10,0	28,0				1050	9,1	18,9	56025	20,9			4,35	0,174
21,0	5,0	26,0	16,0	18,8	17,4	735	8,8	17,2	43908	19,2	0,067	0,123	3,43	0,137
	7,5	28,5				920	9,3	19,2	58992	21,2			4,05	0,162
	10,0	31,0				1105	10,0	21,0	76219	23,1			4,68	0,187
26,0	5,0	31,0	16,0	20,4	18,2	843	10,9	20,1	73869	22,9	0,081	0,148	4,05	0,162
	7,5	33,5				1028	11,2	22,3	96379	25,0			4,68	0,187
	10,0	36,0				1213	11,8	24,2	120847	27,0			5,30	0,212
30,0	5,0	35,0	16,0	22,0	19,0	940	12,6	22,4	105817	25,8	0,091	0,166	4,60	0,184
	7,5	37,5				1125	12,9	24,7	135706	28,0			5,23	0,209
	10,0	40,0				1310	13,4	26,6	167388	30,0			5,85	0,234
35,0	5,0	40,0	16,0	24,0	20,0	1070	14,8	25,2	157132	29,4	0,103	0,187	5,35	0,214
	7,5	42,5				1255	15,0	27,6	197966	31,8			5,98	0,239
	10,0	45,0				1440	15,4	29,6	240386	33,9			6,60	0,264
40,0	5,0	45,0	16,0	26,2	21,1	1214	17,0	28,0	223352	33,1	0,112	0,204	6,15	0,246
	7,5	47,5				1399	17,1	30,4	277047	35,5			6,78	0,271
	10,0	50,0				1584	17,5	32,5	332198	37,8			7,40	0,296
d1	ds	D	bi	bs	br	A	rs	ri	I	heq	V/V	CONCRETO 25kN/m ³		



ATEX 800

ALTURA DA FÓRMA	ESPESSURA DA LÂMINA	ALTURA TOTAL	LARGURA DA NERVURA			ÁREA DA SEÇÃO	DISTÂNCIA DO C.G. à			INÉRCIA		VOLUME DO VAZIO		PESO PRÓPRIO	VOLUME DE CONCRETO	
			INFERIOR	SUPERIOR	MÉDIA		FACE SUPERIOR	FACE INFERIOR	INÉRCIA P/ NERV.	ALTURA EQUIVALENTE	m ³	m ² /m ²				
cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ²	cm	cm	cm ⁴	cm	m ³	m ² /m ²	kN/m ²	m ³ /m ²		
20,0	5,0	25,0	12,5	15,6	14,0	681	7,5	17,5	34444	17,3	0,087	0,136	3,48	0,139		
	7,5	27,5				881	8,0	19,5	46395	19,1					4,10	0,164
	10,0	30,0				1081	8,8	21,2	60494	20,9					3,35	0,134
25,0	5,0	30,0	12,5	17,1	14,8	770	9,4	20,6	59543	20,7	0,106	0,166	3,98	0,159		
	7,5	32,5				970	9,7	22,8	77643	22,7					4,60	0,184
	10,0	35,0				1170	10,3	24,7	97633	24,5					3,98	0,159
30,0	5,0	35,0	12,5	20,0	16,3	888	11,5	23,5	95454	24,3	0,122	0,191	4,60	0,184		
	7,5	37,5				1088	11,6	25,9	122004	26,3					5,23	0,209
	10,0	40,0				1288	12,1	27,9	150167	28,2					4,65	0,186
35,0	5,0	40,0	12,5	22,5	17,5	1013	13,6	26,4	142988	27,8	0,137	0,214	5,28	0,211		
	7,5	42,5				1213	13,6	28,9	179875	30,0					5,90	0,236
	10,0	45,0				1413	14,0	31,0	218056	32,0					5,48	0,219
40,0	5,0	45,0	12,5	25,8	19,2	1166	15,8	29,2	205963	31,4	0,148	0,231	6,10	0,244		
	7,5	47,5				1366	15,8	31,7	255473	33,7					6,73	0,269
	10,0	50,0				1566	16,1	33,9	306124	35,8						
d1	ds	D	bi	bs	br	A	rs	ri	I	heq	V/V	CONCRETO 25kN/m ³				



ATEX 900

ALTURA DA FÓRMA	ESPESSURA DA LÂMINA	ALTURA TOTAL	LARGURA DA NERVURA			ÁREA DA SEÇÃO	DISTÂNCIA DO C.G. à			INÉRCIA		VOLUME DO VAZIO		PESO PRÓPRIO	VOLUME DE CONCRETO	
			INFERIOR	SUPERIOR	MÉDIA		FACE SUPERIOR	FACE INFERIOR	INÉRCIA P/ NERV.	ALTURA EQUIVALENTE	m ³	m ² /m ²				
cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm ²	cm	cm	cm ⁴	cm	m ³	m ² /m ²	kN/m ²	m ³ /m ²		
22,5	5,0	27,5	12,5	21,5	17,0	816	8,3	19,2	49561	18,8	0,116	0,143	3,30	0,132		
	7,5	30,0				1040	8,7	21,3	65670	20,6					3,93	0,157
	10,0	32,5				1266	9,5	23,0	84158	22,4					4,55	0,182
32,5	5,0	37,5	12,5	25,5	19,0	1043	12,2	25,3	125718	25,6	0,164	0,202	4,33	0,173		
	7,5	40,0				1268	12,3	27,7	159245	27,7					4,95	0,198
	10,0	42,5				1493	12,8	29,7	194449	29,6					5,58	0,223
42,5	5,0	47,5	12,5	29,5	21,0	1310	16,5	31,0	255029	32,4	0,203	0,250	5,63	0,225		
	7,5	50,0				1536	16,3	33,7	314390	34,7					6,25	0,250
	10,0	52,5				1761	16,5	36,0	374573	36,8					6,88	0,275
d1	ds	D	bi	bs	br	A	rs	ri	I	heq	V/V	CONCRETO 25kN/m ³				

