



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

GUILHERME PINHEIRO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE DOIS TIPOS DE LAJES COM ÊNFASE NA
INFLUÊNCIA DO VÃO E DO CARREGAMENTO NO ESTADO LIMITE DE
DEFORMAÇÕES EXCESSIVAS**

FLORIANÓPOLIS

2016

GUILHERME PINHEIRO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE DOIS TIPOS DE LAJES COM ÊNFASE NA
INFLUÊNCIA DO VÃO E DO CARREGAMENTO NO ESTADO LIMITE DE
DEFORMAÇÕES EXCESSIVAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Santa Catarina como
requisito para obtenção do grau de Engenheiro
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ivo José Padaratz

FLORIANÓPOLIS

2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Pinheiro, Guilherme

Análise comparativa de dois tipos de lajes com ênfase
na influência do vão e do carregamento no estado limite de
deformações excessivas / Guilherme Pinheiro ; orientador,
Ivo José Padaratz - Florianópolis, SC, 2016.
95 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

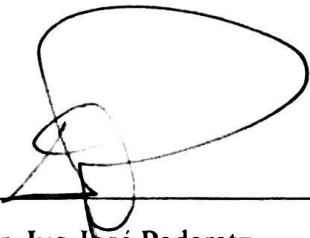
1. Engenharia Civil. 2. Lajes maciças. 3. Lajes
nervuradas. 4. Estado Limite de Serviço. 5. Flecha. I. José
Padaratz, Ivo. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

GUILHERME PINHEIRO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE DOIS TIPOS DE LAJES COM ÊNFASE NA
INFLUÊNCIA DO VÃO E DO CARREGAMENTO NO ESTADO LIMITE DE
DEFORMAÇÕES EXCESSIVAS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção de Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pela comissão examinadora e pelo Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Ivo José Padaratz
Orientador
Departamento de Engenharia Civil, UFSC

Prof. Dr. Jano D'Araujo Coelho
Departamento de Engenharia Civil, UFSC

Prof. Dr. Narbal Ataliba Marcellino
Departamento de Engenharia Civil, UFSC

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai Rildo Pinheiro e minha mãe Marisa Hauck Pinheiro por tornar tudo isso possível.

Ao meu irmão Daniel Pinheiro pelo bom humor e descontração.

À minha namorada Mariana Sprotte pelo companheirismo e compreensão.

Ao meu orientador professor Ivo José Padaratz pelo empenho, paciência e horas de conversa.

Aos mestres que durante a graduação não mediram esforços para transmitir todo o seu conhecimento.

*“A educação é a arma mais poderosa para
mudar o mundo”*

(NELSON MANDELA)

RESUMO

A verificação do desempenho em serviço das estruturas de concreto armado é de grande importância para o desempenho das lajes em serviço, realçando a necessidade de sua verificação na fase de projetos. Os diversos tipos de lajes possuem características diversas, que influenciam o comportamento durante a vida útil das lajes. Este trabalho tem como objetivo analisar o estado limite de serviço de deformações excessivas de lajes maciças e lajes nervuradas moldadas no local de acordo com a NBR6118:2014. Para a obtenção das flechas e dos momentos solicitantes foram utilizadas as tabelas de Bares. Para a inclusão do efeito da fissuração do concreto na inércia da estrutura foram utilizadas as fórmulas de Branson. O efeito da fluência foi considerado de acordo com o procedimento indicado na NBR6118:2014. Foi realizada a verificação do estado limite de deformações excessivas para diversos exemplos de lajes, variando a dimensão dos vãos e o carregamento acidental. Os resultados obtidos foram comparados e observou-se a diferença da altura necessária e do consumo de material necessário para atender ao estado limite de serviço.

Palavras-chave: Lajes maciças; Lajes nervuradas; Estado limite de serviço; Flecha.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vãos efetivos	17
Figura 2 – Vãos efetivos das lajes	18
Figura 3 – Casos de vinculação previstos para as tabelas de Bares.....	22
Figura 4 – Exemplo de discretização de laje em grelha equivalente	23
Figura 5 – Laje maciça apoiada em vigas.....	24
Figura 6 – Altura total e altura útil da seção.....	25
Figura 7 – Partes constituintes da laje nervurada	26
Figura 8 – Seção típica de laje nervurada com blocos cerâmicos	27
Figura 9 - Esquema característico da laje nervurada com enchimento de EPS..	28
Figura 10 - Acabamento da laje nervurada com a utilização de fôrmas reaproveitáveis.....	29
Figura 11 – Dimensões a serem observadas em lajes nervuradas	30
Figura 12 – Dimensões da seção “T”	36
Figura 13 – Efeito da fluência no decorrer do tempo	39
Figura 14 – Diagrama tensão-deformação do concreto.....	47
Figura 15 – Diagrama tensão-deformação do aço	49
Figura 16 – Seção tipo da laje.....	51
Figura 17 - Seção tipo da laje nervurada	67
Figura 18 – Momentos fletores para a laje 5x5 de acordo com o método 3.....	88
Figura 19 – Momentos fletores por analogia de grelha.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Deslocamento-limite em estruturas de concreto armado.....	33
Tabela 2 - Combinações últimas usuais.....	42
Tabela 3- Combinações usais de serviço	43
Tabela 4 – Fator γ_f	44
Tabela 5 – Cargas verticais mínimas em edificações	44
Tabela 6 – Pesos específicos aparentes	45
Tabela 7 - Módulo de elasticidade inicial e secante do concreto.....	48
Tabela 8 – Resistência característica e de cálculo para o aço.....	49
Tabela 9 – Fator α_f para diferentes tempos de escoramento	50
Tabela 10 - Dimensionamento no ELU das lajes maciças com carga acidental de 1,5 kN/m ²	58
Tabela 11 - Análise da fissuração das lajes maciças com carga acidental de 1,5 kN/m ²	59
Tabela 12 - Flechas finais para as lajes maciças com carga acidental de 1,5 kN/m ²	60
Tabela 13 - Dimensionamento no ELU das lajes maciças com carga acidental de 3,0 kN/m ²	61
Tabela 14 - Análise da fissuração das lajes maciças com carga acidental de 3,0 kN/m ²	62
Tabela 15 - Flechas finais para as lajes maciças com carga acidental de 3,0 kN/m ²	63
Tabela 16 - Dimensionamento no ELU das lajes maciças com carga acidental de 5,0 kN/m ²	64
Tabela 17 - Análise da fissuração das lajes maciças com carga acidental de 5,0 kN/m ²	65
Tabela 18 - Flechas finais para as lajes maciças com carga acidental de 5,0 kN/m ²	66
Tabela 19 - Dimensionamento no ELU das lajes nervuradas com carga acidental de 1,5 kN/m ²	72

Tabela 20 - Análise da fissuração das lajes nervuradas com carga acidental de 1,5 kN/m ²	73
Tabela 21 - Flechas finais para as lajes nervuradas com carga acidental de 1,5 kN/m ²	74
Tabela 22 - Dimensionamento no ELU das lajes nervuradas com carga acidental de 3,0 kN/m ²	75
Tabela 23 - Análise da fissuração das lajes nervuradas com carga acidental de 3,0 kN/m ²	76
Tabela 24 - Flechas finais para as lajes nervuradas com carga acidental de 3,0 kN/m ²	77
Tabela 25 - Dimensionamento no ELU das lajes nervuradas com carga acidental de 5,0 kN/m ²	78
Tabela 26 - Análise da fissuração das lajes nervuradas com carga acidental de 5,0 kN/m ²	79
Tabela 27- Flechas finais para as lajes nervuradas com carga acidental de 5,0 kN/m ²	80
Tabela 28 – Carregamento de serviço	81
Tabela 29 – Quantidade de armadura necessária.....	83
Tabela 30 – Posição da linha neutra (cm).....	84
Tabela 31 – Carregamento de serviço (kN/m ²) para as lajes nervuradas com diferentes geometrias de enchimentos.....	85
Tabela 32 – Momento máximo para diferentes modelos de cálculo	87
Tabela 33 – Momento fletor e flecha para diferentes métodos de cálculo	88
Tabela 34 – Flechas totais para dois métodos de cálculo	90
Tabela 35 – Momento fletor e flecha para diferentes seções de vigas	91
Tabela 36 - Coeficiente α para o cálculo de flechas elásticas.....	95
Tabela 37 – Coeficiente λ para o cálculo de momentos máximos em lajes retangulares.....	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPS	Poliestireno Expandido
ELU	Estado Limite Último
ELS	Estado Limite de Serviço

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	16
2.1. OBJETIVO GERAL	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1. LAJES DE CONCRETO ARMADO	16
3.1.1. Classificação quanto à direção	16
3.1.2. Vinculação das bordas.....	18
3.1.3. Métodos de cálculo.....	18
3.1.4. Lajes Maciças	23
3.1.5. Lajes nervuradas de concreto armado moldadas no local.....	25
3.2. ESTADOS LIMITES	31
3.2.1. Estado limite último.....	31
3.2.2. Estado limite de serviço de deformações excessivas	32
3.3. COMBINAÇÕES DE AÇÕES	41
3.3.1. Combinações últimas.....	41
3.3.2. Combinações de serviço	42
3.3.3. Coeficientes de ponderação.....	43
3.4. Cargas atuantes nas edificações	44
4. METODOLOGIA E MATERIAIS.....	45
4.1. PLANILHAS DE VERIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DO ELS	45
4.1.1. Comparação dos resultados	45
4.2. CONCRETO	45
4.2.1. Peso específico do concreto	46
4.2.2. Diagrama tensão-deformação e módulo de elasticidade	46
4.3. AÇO	49

4.4.	TEMPO DE ESCORAMENTO.....	50
5.	VERIFICAÇÕES DO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO	50
5.1.	LAJES MACIÇAS.....	50
5.1.1.	Laje maciça 3x3m com carga acidental de 1,5 kN/m ²	51
5.1.2.	Laje maciça 5x7 metros com carga acidental de 3,0 kN/m ²	53
5.1.3.	Resultados para várias dimensões de lajes maciças	56
5.2.	LAJES NERVURADAS.....	67
5.2.1.	Laje nervurada 5x8m com carga acidental de 3,0 kN/m ²	67
5.2.2.	Resultados para várias dimensões de lajes nervuradas	71
5.2.3.	Comparação do desempenho dos tipos de lajes	81
5.2.4.	Análises adicionais	86
6.	CONCLUSÕES.....	92
	REFERÊNCIAS.....	93
	ANEXOS.....	95

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento das lajes é uma importante etapa do projeto estrutural devido à grande participação destes elementos na composição do custo final da estrutura, consequência da grande participação na parcela do consumo de concreto. Para lajes maciças em edifícios de vários andares há um consenso que esta parcela gira em torno de um terço do volume total de concreto utilizado. Atualmente existem diversos tipos de lajes disponíveis no mercado, desde lajes moldadas no local até lajes pré-moldadas. A escolha do tipo mais adequado pelo engenheiro estrutural é de suma importância para o projeto de uma laje eficiente estruturalmente e viável economicamente. As variáveis que influenciam na decisão quanto ao tipo são diversas, desde fatores técnicos como, por exemplo, o vão da laje e o carregamento até fatores construtivos como a disponibilidade de mão de obra especializada na região.

Os avanços tecnológicos de ferramentas computacionais na área da engenharia de estruturas, junto com a tendência de construções com vãos cada vez maiores, realçam a importância da verificação do estado limite de serviço, uma vez que essas edificações estão sujeitas a deformações maiores.

A deformação em excesso das estruturas acarreta uma série de problemas em serviço, incluindo danos à elementos não estruturais e redução do conforto do usuário. Diante desta situação a NBR6118:2014 estabelece os limites de deformações que a estrutura deve respeitar.

Neste trabalho será realizada a verificação do estado limite de serviço para lajes maciças e lajes nervuradas com vãos variando de três metros até oito metros com incremento de um metro. A verificação será realizada utilizando-se as tabelas de Bares para a obtenção do momento solicitante máximo e das flechas elásticas. A inclusão do efeito da fissuração será realizada através da inércia equivalente de Branson. Para a verificação do estado limite de serviço não será considerada a deslocabilidade vertical dos apoios, tampouco a rigidez à torção dos apoios, supondo-se as lajes simplesmente apoiadas.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Analisar e comparar lajes maciças e lajes nervuradas com ênfase no estado limite de serviço de deformações excessivas. Analisar a influência dos vãos e do carregamento acidental na flecha final das lajes.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar o peso próprio necessário para atender à verificação do estado limite de serviço para lajes maciças e lajes nervuradas;
- Comparar a posição da linha neutra obtida em lajes maciças e nervuradas para um dado carregamento ao se variar o vão;
- Comparar a influência do material de enchimento em lajes nervuradas.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. LAJES DE CONCRETO ARMADO

Lajes são elementos estruturais onde duas dimensões (comprimento e largura), predominam sobre uma terceira (espessura). Normalmente, estes elementos são executados para suportar as cargas verticais transmitidas a um plano horizontal (piso dos edifícios), como também para servirem de cobertura de estruturas. As lajes são submetidas essencialmente à momentos fletores e forças cortantes decorrentes das ações verticais. As lajes também possuem um importante papel no esquema resistente para ações horizontais, comportando-se como diafragmas rígidos ou chapas, compatibilizando o deslocamento dos pilares de cada piso (SILVA, 2005).

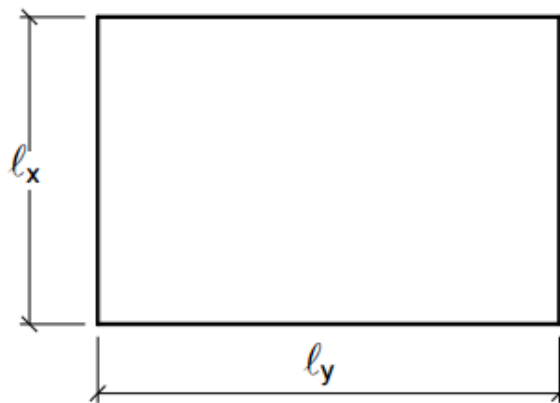
As lajes podem ser classificadas segundo diferentes critérios, como tipo construtivo, quanto à forma geométrica e relação dos apoios.

3.1.1. Classificação quanto à direção

Existem dois casos: laje armada em uma direção (ou unidirecionais) ou laje armada em duas direções (ou bidirecionais). Os vãos são definidos de acordo com a Figura 1. No caso da laje unidirecional a laje se comporta de modo semelhante a uma

viga, sendo a armadura principal distribuída segundo uma direção principal (menor vão) e a outra direção (maior vão) sendo armada com uma armadura secundária. Nas lajes bidirecionais existem duas direções principais e, portanto, a laje é armada com armadura principal nas duas direções.

Figura 1 – Vãos efetivos



Fonte: Autor, 2016.

Onde: l_x = vão efetivo do menor lado;

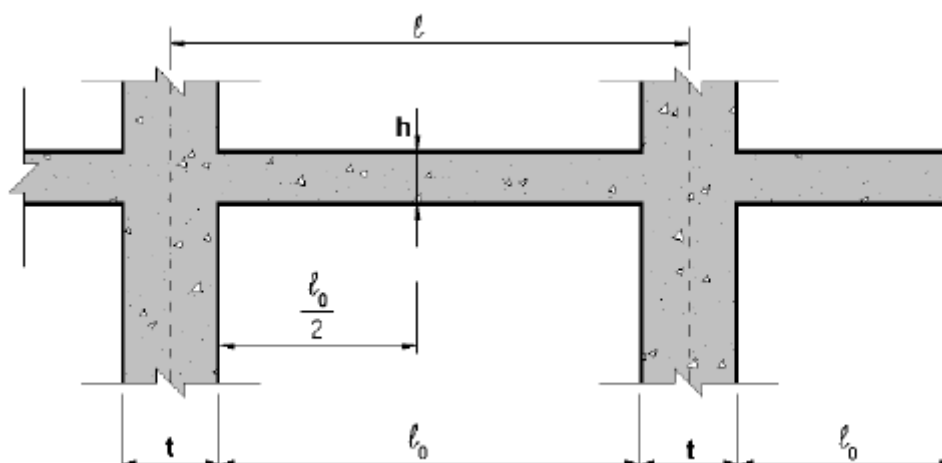
l_y =vão efetivo do maior lado.

De acordo com a NBR6118:2014 o vão efetivo de cada direção da laje pode ser calculado de acordo com a expressão:

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

Sendo a_1 igual ao menor valor entre $t_1/2$ e $0,3h$ e a_2 igual ao menor valor entre $t_2/2$ e $0,3h$ de acordo com a Figura 2.

Figura 2 – Vãos efetivos das lajes



Fonte: Pinheiro, 2010.

A partir do cálculo dos vãos efetivos considera-se a razão:

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

Se $\lambda > 2$ então a laje é considerada armada em uma direção

Se $\lambda < 2$ então a laje é considerada armada em duas direções.

3.1.2. Vinculação das bordas

Existem três tipos de vinculações das bordas em lajes. A borda livre se caracteriza basicamente pela ausência de apoio, apresentando deslocamento vertical. Na borda simplesmente apoiada não há deslocamento, havendo, entretanto, rotação. Já nas bordas engastadas não há deslocamento vertical e as rotações também são impedidas (PINHEIRO, 2010).

3.1.3. Métodos de cálculo

Há basicamente dois métodos de cálculo para as lajes; o elástico e o de ruptura. O primeiro se baseia na análise do comportamento do elemento sob cargas de serviço e concreto íntegro (não fissurado). O segundo procedimento se baseia nos mecanismos de ruptura das lajes. Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014) os dois procedimentos

anteriores têm deficiências em determinar os esforços solicitantes aos quais as lajes estão submetidas.

O método elástico segundo Timoshenko e Woinowsky-Krieger (1959), baseia-se nas equações de equilíbrio de um elemento infinitesimal de placa e nas relações de compatibilidade das deformações do mesmo.

Para a análise linear (elástica) são consideradas algumas hipóteses básicas:

- Material da placa é elástico, homogêneo e isotrópico;
- A placa indeformada é plana;
- A espessura da placa é pequena em relação às outras dimensões;
- Pequenas deformações;
- As cargas são perpendiculares às placas;
- Seção deformada permanece plana.

A equação fundamental das placas delgadas (obtida por equilíbrio e compatibilidade de deslocamentos de um elemento infinitesimal, relacionando momentos fletores com curvatura) submetidas a uma carga $p(x,y)$ é definida por:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 * \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = - \frac{p}{D} \quad (1)$$

Onde:

w – Deslocamento vertical

x,y – Coordenadas de um ponto genérico da placa

p – Carga atuante

E – Módulo de elasticidade do material da placa

D – Rigidez à flexão da placa, dada por:

$$D = - \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (2)$$

ν – Coeficiente de Poisson

h – Altura da placa

A análise elástica de placas fornece resultado analítico para poucos casos de geometria e condições de apoio, obtendo-se, portanto, os esforços solicitantes por outros procedimentos (PARK; GAMBLE, 2000).

Podem ser usados os seguintes procedimentos para a obtenção dos esforços:

- Diferenças finitas;
- Elementos finitos;
- Analogia de grelha equivalente;
- Utilização de séries trigonométricas para a representação do valor do carregamento $p(x,y)$.

O processo de cálculo de placas por séries permite a elaboração de quadros de coeficientes adimensionais que facilmente possibilitam determinar momentos fletores máximos e deslocamentos máximos (flechas) a partir da geometria e das condições de vinculação da placa (CARVALHO; PINHEIRO, 2009). Para isso, o pavimento deve ser discretizado, ou seja, cada laje deve ser tratada individualmente, de acordo com a sua vinculação às demais.

De acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2014), devido à impossibilidade de se resolver as placas com a equação fundamental, durante muito tempo, e mesmo ainda hoje, o cálculo de pavimentos de edifícios compostos de lajes e vigas de concreto armado é feito de maneira simplificada, considerando-se as lajes como elementos isolados apoiados em elementos rígidos. Entretanto, com o avanço da informática é possível analisar o comportamento de um pavimento com um todo, levando em consideração a influência da flexibilidade dos apoios e da rigidez à torção, tanto das lajes como das vigas, sendo ainda possível incluir na análise a não linearidade física do concreto armado.

Ainda segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014) é possível afirmar que o cálculo por meio de tabelas baseadas na teoria da elasticidade é útil para uma análise inicial ou um pré-dimensionamento, mas sempre que possível deveria se buscar procedimentos nos quais as simplificações possam ser desconsideradas.

3.1.3.1. Tabelas de Bares

Baseando-se na resolução das equações da teoria da elasticidade por séries trigonométricas, Bares (1972) desenvolveu tabelas para o cálculo de momentos em lajes. Para tal, foram admitidas algumas condições de contorno onde em todos os casos as vigas são consideradas indeformáveis. No Anexo I estão apresentadas as tabelas adaptadas para o coeficiente de Poisson de 0,2, definido pela NBR6118:2014.

Utilizando-se os coeficientes obtidos das tabelas, os momentos positivos em ambas as direções são obtidos pelas seguintes equações:

$$M_x = \mu_x \cdot \frac{p l_x^2}{100} \quad (3)$$

$$M_y = \mu_y \cdot \frac{p l_y^2}{100} \quad (4)$$

Analogamente, para os momentos negativos:

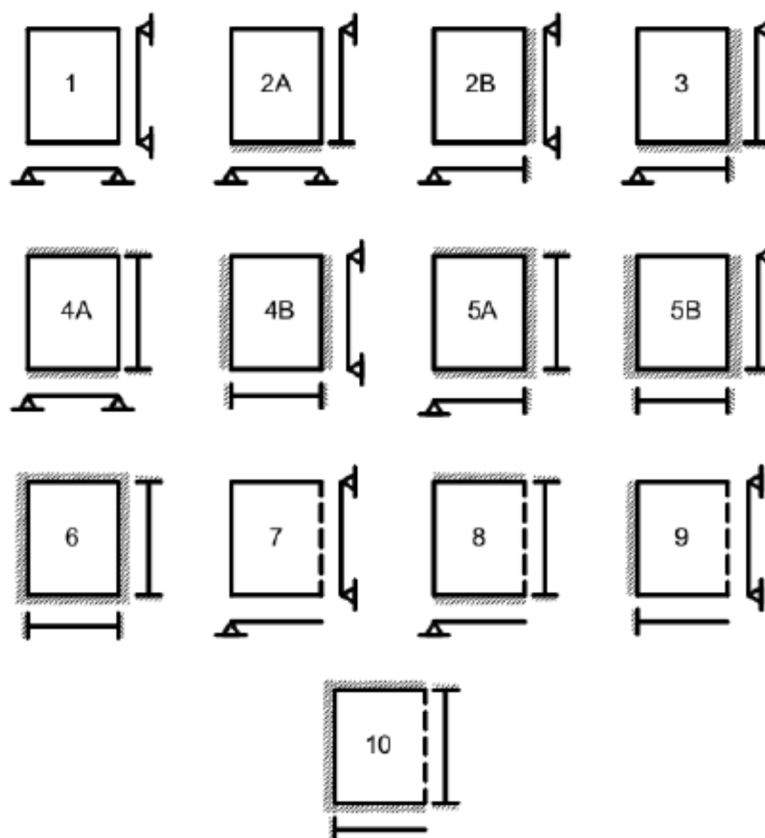
$$M_x^- = \mu_x^- \cdot \frac{p l_x^2}{100} \quad (5)$$

$$M_y^- = \mu_y^- \cdot \frac{p l_y^2}{100} \quad (6)$$

Os coeficientes μ_x , μ_y , μ_x^- e μ_y^- para obtenção dos momentos máximos são obtidos pelas tabelas de Bares em função do caso de vinculação da laje e da relação λ .

Os casos previstos para uso das tabelas de Bares são mostrados na Figura 3.

Figura 3 – Casos de vinculação previstos para as tabelas de Bares



Fonte: Carvalho e Figueiredo Filho, 2014.

Para o cálculo das flechas elásticas deve-se utilizar o coeficiente α obtido da tabela no Anexo I de acordo com o caso de vinculação da laje e a relação λ . A flecha elástica é dada por:

$$f = \frac{p l_x^4}{E h^3} \cdot \frac{\alpha}{100} \quad (7)$$

Onde:

- p – carregamento distribuído na placa;
- l_x – menor vão da placa;
- E – módulo de elasticidade do concreto;
- h – espessura da placa;

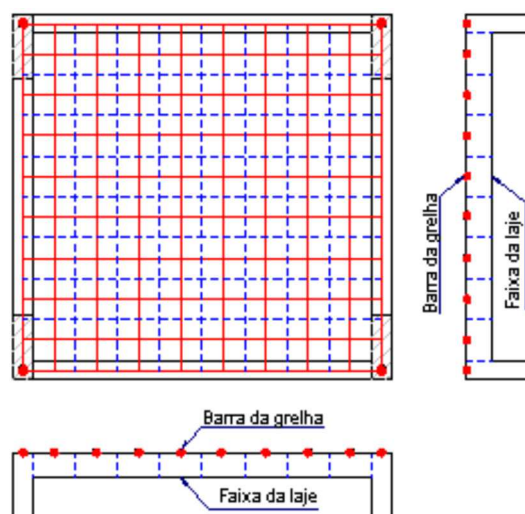
3.1.3.2. Analogia de grelha

O procedimento da analogia de grelha representa a laje por meio de uma grelha equivalente composta por barras ortogonais entre si de forma que as rigidezes longitudinais sejam concentradas nas barras nesta direção e as rigidezes transversais sejam concentradas nas barras na direção ortogonal (DUARTE, 1998).

Os carregamentos distribuídos são considerados como divididos e atuantes nas barras das grelhas de acordo com a faixa de influência de cada uma. As cargas também podem ser consideradas como cargas concentradas aplicadas diretamente nos nós. Para a análise a laje deve ser, portanto, discretizada com uma série de faixas com largura determinada que podem ser substituídas por elementos estruturais de barra situados em seus eixos. Em seguida é atribuída a cada barra uma inércia à flexão e à torção.

Um exemplo de discretização pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Exemplo de discretização de laje em grelha equivalente



Fonte: Puel, 2010.

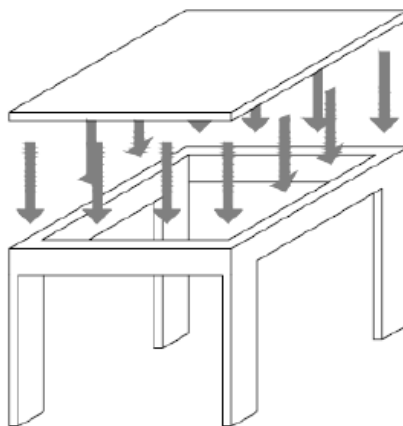
Para as análises envolvendo a analogia de grelha neste trabalho será utilizado o programa comercial EBERICK, da empresa AltoQi.

3.1.4. Lajes Maciças

Laje maciça é aquela onde toda a espessura é composta por concreto, contendo armaduras longitudinais de flexão e podendo eventualmente possuir armaduras

transversais. As bordas são geralmente apoiadas em vigas de contorno, como visto na Figura 5.

Figura 5 – Laje maciça apoiada em vigas



Fonte: Puel, 2010.

3.1.4.1. Espessuras mínimas

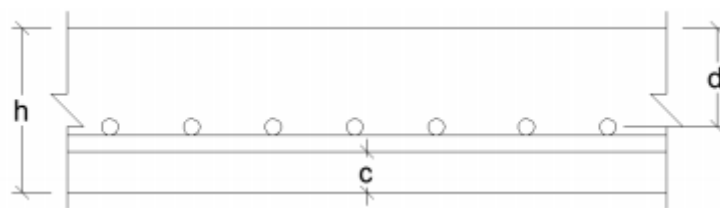
Conforme a NBR6118:2014 devem ser respeitadas as seguintes dimensões mínimas para as lajes maciças:

- 7 cm para lajes de cobertura não em balanço;
- 8 cm para lajes de piso não em balanço;
- 10 cm para lajes em balanço;
- 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN.

3.1.4.2. Dimensionamento das armaduras

O cálculo da quantidade de armadura longitudinal para o dimensionamento de peças de concreto submetidas à flexão é feita de maneira simples a partir do equilíbrio de forças atuantes na seção. Para seções transversais retangulares é necessário conhecer a resistência do concreto (f_{ck}), o cobrimento (c), a largura da seção (b_w), a altura útil (d) conforme visto na Figura 6 e o tipo de aço (f_{yd}) a ser especificado pelo projetista.

Figura 6 – Altura total e altura útil da seção



Fonte: Pinheiro, 2010.

A NBR6118:2014 estabelece uma relação limite entre a posição da linha neutra e a altura útil da seção. O objetivo é proporcionar um comportamento dúctil adequado em vigas e lajes.

$$x/d \leq 0,45 \text{ para concretos com } f_{ck} \leq 50 \text{ Mpa}$$

Resolvendo-se as equações de equilíbrio de uma seção transversal obtém-se a seguinte equação para o cálculo da posição da linha neutra:

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

Com a posição da linha neutra é possível encontrar a área necessária de armadura:

$$A_s = \frac{M_d}{f_{yd} * (d - 0,4x)} \quad (9)$$

3.1.5. Lajes nervuradas de concreto armado moldadas no local

3.1.5.1. Definição

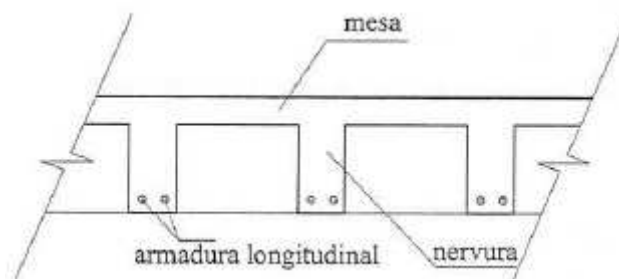
Segundo a NBR6118:2014 lajes nervuradas moldadas no local são as lajes cuja zona de tração para momentos positivos está localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte. Carvalho e Pinheiro (2009) pontuam que a ideia que levou ao surgimento desse tipo de laje veio da constatação de que em lajes apenas pequena

parte do concreto é comprimida. A partir deste fato surgiu a ideia de substituir a área tracionada por um material inerte, surgindo assim a laje nervurada.

As lajes nervuradas consideradas normais, ou seja, em que as nervuras estão localizadas na parte inferior, possuem uma mesa superior de concreto como pode ser visto na Figura 7. Nestas lajes os espaços entre as nervuras permanecem vazios ou preenchidos por material inerte não tendo, portanto, função estrutural. Estas lajes possuem uma seção transversal na forma de “T”, sendo eficientes para resistir aos esforços de compressão na parte superior (grande área de concreto) e econômicos em relação ao consumo de concreto na parte tracionada inferior.

Pode-se então deduzir que como diretriz inicial de projeto deve-se admitir as lajes nervuradas sem engastes totais no seu contorno de modo a reduzir os esforços fletores negativos. No caso de consideração de engastes totais ou parciais no contorno da laje devem ser previstas zonas maciças de concreto próximas aos apoios.

Figura 7 – Partes constituintes da laje nervurada



Fonte: Carvalho e Pinheiro, 2009.

3.1.5.2. Materiais de enchimento

O material de enchimento tem por objetivo substituir o concreto da região tracionada, uma vez que esse concreto não contribui com a resistência e acaba causando um aumento desnecessário no peso próprio da estrutura. O material de enchimento deve ser o mais leve possível, com resistência suficiente para suportar as operações de execução da laje. A resistência deste material de enchimento não é considerada no dimensionamento da laje. Diversos são os materiais que podem ser utilizados como enchimento, como por exemplo: blocos cerâmicos, blocos vazados de concreto, blocos EPS e fôrmas reaproveitáveis.

3.1.5.2.1. Blocos cerâmicos ou de concreto vazado

Este tipo de material de enchimento é geralmente utilizado em lajes nervuradas de vigas pré-moldadas, devido à facilidade de execução. É um material com isolamento térmico superior ao concreto maciço. O ponto negativo deste material é o peso próprio, que é elevado para um material de enchimento.

Seções típicas das lajes nervuradas com esse material de enchimento podem ser vistas na Figura 8.

Figura 8 – Seção típica de laje nervurada com blocos cerâmicos



Fonte: Carvalho e Pinheiro, 2009.

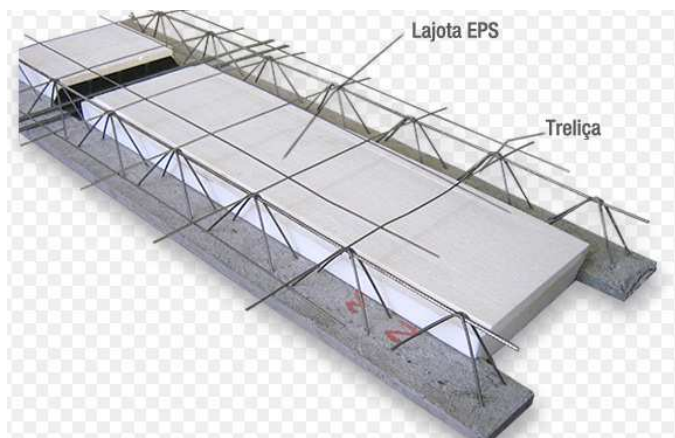
3.1.5.2.2. Blocos de EPS

Blocos de EPS são bastante utilizados, principalmente em associação com vigotas treliçadas pré-moldadas. Entre as vantagens deste material de enchimento, pode-se citar:

- Permite acabamento plano do teto;
- Material facilmente cortado com ferramentas convencionais;
- Boa resistência à operação de montagem;
- Baixo coeficiente de absorção, permitindo boa cura do concreto;
- Baixo módulo de elasticidade, permitindo boa distribuição das cargas;
- Bom isolante termo-acústico.

Uma seção característica de lajes nervuradas com enchimento de EPS pode ser observada na Figura 9.

Figura 9 - Esquema característico da laje nervurada com enchimento de EPS



Fonte: Lajes BIGLajes¹

3.1.5.2.3. Fôrmas reaproveitáveis

Outro tipo de enchimento são as fôrmas reaproveitáveis, geralmente constituídas de polipropileno ou de metal. As principais vantagens deste método é o vazio formado pela forma, zerando o peso próprio da parte inerte da seção. Como ponto negativo pode-se citar a questão arquitetônica. Após a execução, a retirada das fôrmas pode ser feita com a injeção de ar comprimido aumentando-se assim a quantidade de reaproveitamentos (CARVALHO; PINHEIRO, 2009).

Um exemplo do acabamento fornecido por esse material de enchimento pode ser visto na Figura 10.

¹ Disponível em: < http://www.biglajes.com/laje_eps_unidirecional.html >

Figura 10 - Acabamento da laje nervurada com a utilização de fôrmas reaproveitáveis



Fonte: ROTOMIX Brasil²

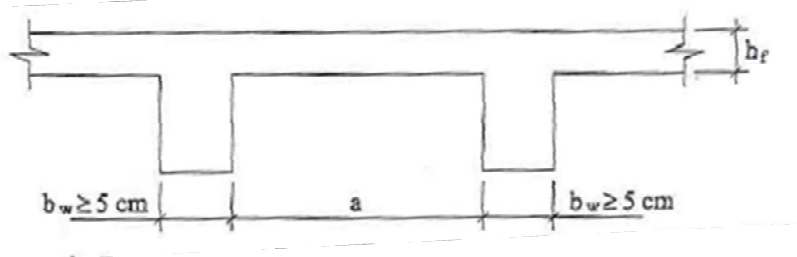
3.1.5.3. Dimensões mínimas

A NBR6118:2014 impõe valores mínimos para algumas dimensões (Figura 11) das lajes nervuradas:

- Espessura da mesa (h_f): Quando não houver tubulação embutida deve ser maior que 1/15 da distância entre as nervuras e não menor que 3 cm;
- Espessura das nervuras (b_w): Não deve ser inferior a 5 cm. Não é permitido o uso de armadura de compressão em nervuras de espessura inferior a 8 cm.
- Espaçamento entre as nervuras: Para lajes com espaçamento entre eixos menor que 65 cm dispensa-se a verificação da flexão da mesa.

² Disponível em: <<http://www.rotomixbrasil.com.br/forma-plastica-indispensavel-na-construcao-de-lajes-nervuradas/>>

Figura 11 – Dimensões a serem observadas em lajes nervuradas



Fonte: Carvalho e Pinheiro, 2009.

3.1.5.4. Análise estrutural

Segundo a NBR6118:2014 as lajes nervuradas moldadas no local podem ser calculadas para efeito de esforços solicitantes como lajes maciças, desde que respeitadas as dimensões expostas anteriormente. Entretanto, Carvalho e Pinheiro (2009) observam que essa aproximação é adequada somente para o pré-dimensionamento, enquanto que para o detalhamento seria mais adequado adotar outro método de análise estrutural mais avançado como a analogia de grelha ou então elementos finitos. Essa recomendação se deve ao fato de que as lajes nervuradas não conseguem desenvolver os mesmos momentos de torção de uma laje maciça e, portanto, tendem a apresentar momentos fletores e deslocamentos transversais maiores.

Hahn (1972) apresentou um coeficiente que visa corrigir o momento fletor obtido a partir de tabelas desenvolvidas para lajes maciças. Os esforços encontrados devem ser multiplicados pelo coeficiente δ da equação:

$$\delta = \frac{1}{1 - \left(\frac{5}{6} * \frac{\varepsilon^2}{1 + \varepsilon^4} \right)} \quad (10)$$

Onde:

$$\varepsilon = \frac{l_x}{l_y} = \frac{1}{\lambda} \quad (11)$$

Estudos mostram que esse coeficiente é muito a favor da segurança e, portanto, deve ser usado apenas para o pré-dimensionamento das lajes nervuradas (CARVALHO; PINHEIRO, 2009).

3.1.5.5. Dimensionamento

De acordo com a NBR6118:2014 o dimensionamento das lajes nervuradas deve ser feito de modo análogo ao de uma viga de seção “T”. Para isso, define-se a largura colaborante (b_f) como sendo:

$$b_f = b_w + 2 * b_1$$

Onde:

- b_w – largura da alma (nervura)
- $b_1 < 0,10 \cdot a$
- $b_1 < 0,50 \cdot b_2$
- a – vão efetivo
- b_2 - distância entre as faces da nervura

3.2. ESTADOS LIMITES

Conforme a NBR6118:2014 existem dois tipos de estados limites: estado limite último (ELU) e estado limite de serviço (ELS). O ELU é verificado no dimensionamento de estruturas de concreto armado e tem como referência a ruptura da estrutura. O ELS é verificado para evitar danos em serviço, deformações excessivas ou vibrações que comprometam a durabilidade ou aspecto estético das estruturas.

3.2.1. Estado limite último

Em estruturas de concreto armado o colapso é caracterizado pela ruptura do banzo comprimido do concreto – estado último de ruptura – ou então pelo alongamento excessivo da armadura tracionada – estado último de alongamento plástico excessivo. Por definição, o concreto atinge a ruptura quando seu encurtamento atinge determinado valor ε_{cu} , justificado experimentalmente. Ainda por definição, a ruptura acontece quando o alongamento da armadura atinge o valor convencional ε_{su} também justificado experimentalmente. A NBR6118:2014 define que para ser alcançado o estado limite último é necessário que o encurtamento do concreto ou o alongamento do aço atinja:

$$2‰ \leq \varepsilon_{cu} \leq 3,5‰$$

$$\varepsilon_{su} = 10‰$$

De acordo com a NBR6118:2014 as lajes maciças e nervuradas não necessitam de armadura transversal para resistir as forças de tração oriundas da força cortante, quando a força cortante de cálculo obedecer à expressão:

$$V_{sd} \leq V_{Rd1}$$

Onde:

- V_{Rd1} – força cortante de cálculo, relativa a elementos sem armadura para força cortante
- V_{sd} – força cortante solicitante de cálculo

Para o presente trabalho não será realizada a verificação ao cisalhamento das lajes.

3.2.2. Estado limite de serviço de deformações excessivas

A NBR6118:2014 estabelece que para a aceitabilidade sensorial devem ser respeitados os deslocamentos-limite das estruturas de concreto armado segundo a Tabela 1 . Para a obtenção dos deslocamentos devem ser utilizados modelos que levem em conta a rigidez efetiva das seções do elemento, ou seja, que considerem a presença de armadura, a existência de fissuras e as deformações diferidas no tempo.

Tabela 1 - Deslocamento-limite em estruturas de concreto armado

Tipo do 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 o nivelamento do equipamento	De acordo com a recomendação do fabricante do equipamento	
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	1/500 e 10 mm e $\theta = 0,0017$ rad
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	1/250 e 25 mm
		Movimento lateral dos edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente	H/1700 e H/850 entre pavimentos
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	1/400 e 15 mm
	Forros	Movimentos térmicos horizontais	Provocado por diferença de temperatura	H/500
		Revestimentos colados	Ocorrido após a construção do forro	1/350
		Revestimentos pendurados ou com junta	Deslocamento ocorrido após a construção do forro	1/175
Efeitos em elementos estruturais	Afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas	Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-os ao modelo estrutural adotado.		

Fonte: NBR6118:2014 (adaptado)

A NBR6118:2014 permite a verificação simplificada dos deslocamentos nas vigas e lajes, porém a mesma norma pontua que a deformação real da estrutura depende de uma série de fatores. O processo construtivo, as propriedades dos materiais durante a solicitação em serviço, o grau de fissuração, as propriedades de fluência e retração são fatores de grande variabilidade que possuem grande influência na flecha real da estrutura, portanto não se pode esperar grande precisão na flecha obtida pelo método indicado na norma.

Coelho (2011) mostrou que a variabilidade dos deslocamentos de elementos de concreto depende, entre diversos outros fatores, da razão entre o momento fletor na seção crítica e o momento de fissuração do elemento. A maior variabilidade ocorre quando os valores do momento fletor na seção crítica estão mais próximos dos valores do momento de fissuração. Outra conclusão é que a variabilidade tende a aumentar quando é diminuída a taxa de armadura de flexão. Taxas de armadura maiores são exigidas para momentos fletores elevados, quando a tendência de formação de fissuras é maior. O estudo também mostrou que quando diminuída a umidade de ar, os deslocamentos aumentam devido aos efeitos de fluência e retração do concreto.

3.2.2.1. Danos provocados pela deformação excessiva

Guarda (2005) pontua que os deslocamentos excessivos em um elemento estrutural podem causar diversos danos a elementos não estruturais que estejam ligados à estrutura. Problemas como estes raramente afetam a segurança estrutural da edificação, provocando apenas desconforto e desconfiança por parte dos usuários principalmente se visíveis a olho nu.

Moura e Marcellino (2013) elencam alguns dos danos mais comuns causados pelo deslocamento excessivo das lajes:

- Necessidade de nivelamento de superfícies que deveriam ser horizontais, causando um aumento no custo total da obra. Além disso, a carga de revestimento adicional pode aumentar a flecha existente.
- Em lajes de cobertura ou varandas pode ocorrer uma inversão da inclinação devido à flecha, interferindo na drenagem de águas pluviais.

- Paredes não estruturais apoiadas em lajes ou vigas com deformações excessivas podem sofrer fissuração. Essas fissuras surgem devido à grande rigidez dessas paredes, que não conseguem acompanhar a deformação de seus apoios.

- Deformações excessivas podem causar o mau funcionamento de esquadrias, principalmente de grandes vitrines.

- Aumenta a possibilidade de flambagem de paredes e pilares esbeltos.

- Vibrações excessivas podem causar desconforto ao usuário. Essas vibrações decorrem de deformações excessivas associadas à pequena rigidez.

- Deformação excessiva pode causar fissuras na própria peça estrutural, causando danos estéticos e problemas de durabilidade.

3.2.2.2. Fissuração

Segundo SILVA (1995), o maior problema em qualquer análise não-linear simplificada de estruturas de concreto armado é a escolha adequada dos valores da rigidez à flexão EI, sob várias condições de carregamento. Os erros resultantes do uso de métodos aproximados de calcular efeitos de segunda ordem ou carga crítica são, em geral, menores que os erros resultantes da escolha dos valores de EI.

PINTO *et. al.* (1998) acrescentam que os valores de EI são extremamente influenciados por diversos fatores que só podem ser corretamente avaliados por meio de uma análise estrutural mais sofisticada. BRANSON (1966) afirma que no caso de vigas de concreto armado, as diferentes quantidades de armadura e a distribuição variável de fissuração ao longo do vão fazem com que a rigidez à flexão EI não seja uma constante. Com base neste argumento, BRANSON (1966) apresenta uma expressão que permite determinar a rigidez efetiva em qualquer seção transversal particular:

$$(EI)_{eq} = E_c \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad (12)$$

Onde:

- E_{cs} o módulo de elasticidade secante do concreto;
- I_c o momento de inércia da seção bruta de concreto;
- I_{II} o momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II;

- M_a o momento fletor na seção crítica do vão considerado;
- M_r o momento de fissuração do elemento estrutural.

O momento de fissuração (M_r), correspondente ao momento causador da primeira fissura no concreto pode ser calculado por:

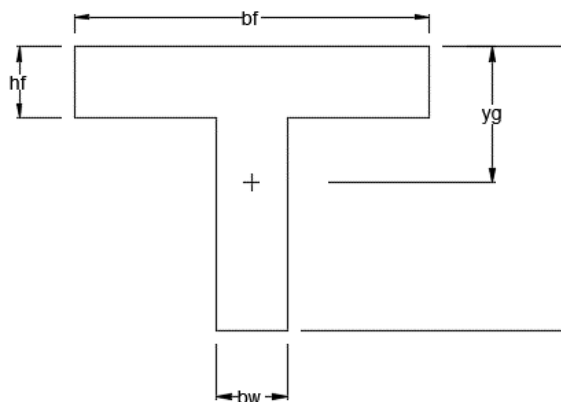
$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{y_t} \quad (13)$$

Sendo α igual a 1,5 para seções retangulares e 1,2 para seções T ou duplo T, y_t a distância do centro de gravidade à fibra mais tracionada, e f_{ct} a resistência à tração direta do concreto (NBR6118:2014).

3.2.2.3. Estádio I para lajes nervuradas

Para a laje nervurada, Carvalho e Figueiredo (2014) fornecem as características da seção “T” para o estágio I, segundo as dimensões vistas na Figura 12.

Figura 12 – Dimensões da seção “T”



Fonte: Carvalho e Figueiredo, 2014.

Centro de gravidade:

$$y_{cg} = \frac{(b_f - b_w) \left(\frac{h_f^2}{2} \right) + b_w \frac{h^2}{2}}{(b_f - b_w) h_f + b_w \cdot h} \quad (14)$$

Momento de inércia:

$$I_g = \frac{(b_f - b_w)h_f^3}{12} + \frac{b_w h^3}{12} + (b_f - b_w)h_f \left(y_{cg} - \frac{h_f}{2}\right)^2 + b_w h \left(y_{cg} - \frac{h}{2}\right)^2 \quad (15)$$

3.2.2.4. Estádio II para lajes maciças

O momento de inércia da peça totalmente fissurada I_{II} é dado pela equação:

$$I_{II} = \frac{b \cdot x_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s (d - x_{II})^2 \quad (16)$$

Desprezando todo o concreto da zona tracionada pode-se calcular a posição da linha neutra de acordo com a equação:

$$x_{II} = \frac{\alpha_e \cdot A_s}{b_w} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_e \cdot \rho}} \right] \quad (17)$$

Onde:

- x_{II} - Posição da linha neutra;
- α_e - Relação entre os módulos de deformação longitudinal do aço e do concreto;
- A_s - Área efetiva de armadura;
- ρ - Taxa de armadura.

3.2.2.5. Estádio II para lajes nervuradas

O momento de inércia da seção “T” no estágio II depende da posição da linha neutra. Se a mesma é inferior à espessura da mesa, a inércia no estágio II, quando a seção não possui armadura de compressão, é dado pela equação:

$$I_{x,II} = \frac{b_f x_{II}^3}{3} + \alpha_e A_s (x_{II} - d)^2 \quad (18)$$

Quando a linha neutra passa pela alma da seção a inércia no estágio II, quando a seção não possui armadura de compressão, é dado pela equação:

$$I_{x,II} = \frac{(b_f - b_w)h_f^3}{12} + \frac{b_w x_{II}^3}{3} + (b_f - b_w) \left(x_{II} - \frac{h_f}{2} \right)^2 + \alpha_e A_s (x_{II} - d)^2 \quad (19)$$

O cálculo da posição da linha neutra em vigas com seção “T” é feito por meio da equação de segundo grau:

$$a_1 x_{II}^2 + a_2 x_{II} + a_3 = 0 \quad (20)$$

Com os coeficientes a_1 , a_2 , a_3 iguais a:

$$a_1 = \frac{b_w}{2} \quad (21)$$

$$a_2 = h_f (b_f - b_w) \quad (22)$$

$$a_3 = -d \alpha_e A_s - \frac{h_f^2}{2} (b_f - b_w) \quad (23)$$

3.2.2.6. Flecha elástica

A flecha elástica pode ser calculada pela expressão:

$$f_{ime} = \frac{p l_x^4 \alpha}{E h^3 100} \quad (24)$$

Onde:

- p – carregamento uniformemente distribuído;
- α – coeficiente de Bares, disponível no anexo I;
- l_x – menor vão da laje;
- E – Módulo de elasticidade do concreto;
- h – altura ou espessura da laje.

Moura e Marcellino (2013) mostram que fazendo $EI = E \cdot bh^3/12$ a expressão 24 pode ser reescrita, considerando a inércia equivalente, como:

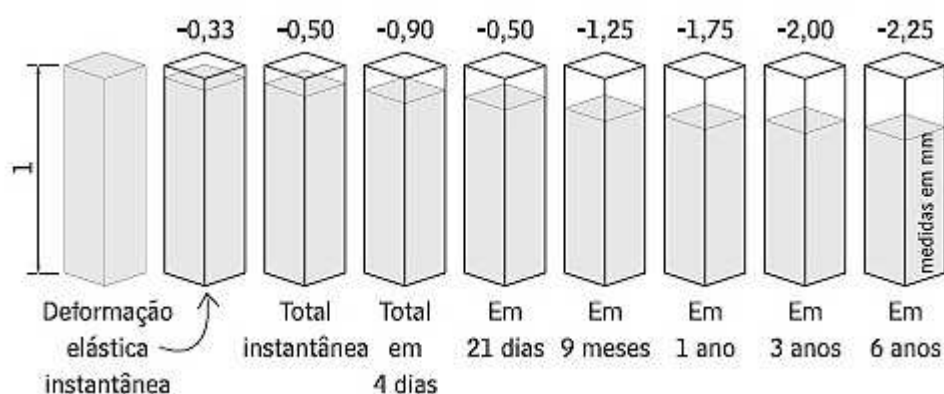
$$f_{eq} = \frac{\alpha \cdot b \cdot p \cdot l_x^4}{1200 (EI_{eq})} \quad (25)$$

3.2.2.7. Flecha diferida no tempo

A fluência do concreto é o fenômeno em que ocorre o gradual aumento da deformação de um elemento de concreto quando submetido a um estado de tensões permanentes ao longo do tempo. A taxa de crescimento dos deslocamentos da estrutura pela fluência do concreto é alta nos períodos do carregamento, diminuindo ao longo do tempo até se estabilizar em um valor máximo (CARVALHO, 2009).

Segundo Kuperman (2007) a aplicação de uma tensão constante em uma peça de concreto sob condições de umidade relativa de 100% leva a um aumento da deformação ao longo do tempo, chamada fluência básica. Considera-se que na fluência básica já está embutida a deformação autógena sofrida pelo concreto. A fluência adicional que ocorre quando a peça sob carga também está submetida a secagem é chamada fluência por secagem. Um exemplo do efeito da fluência ao decorrer do tempo em uma peça de dimensão unitária pode ser observado na Figura 13:

Figura 13 – Efeito da fluência no decorrer do tempo



Fonte: Revista Técnica³

De acordo com a NBR6118:2014 a flecha devido à fluência deve ser calculada de maneira aproximada multiplicando-se a flecha imediata pelo fator α_f dado pela equação:

$$\alpha_f = \frac{\Delta\xi}{1 + 50\rho'} \quad (26)$$

Com:

$$\rho' = \frac{A'_s}{b \cdot d} \quad (27)$$

Onde:

- A'_s - Armadura da área comprimida da seção;
- b – Largura da seção transversal;
- d – Altura útil;
- ξ – Coeficiente função do tempo

O coeficiente ξ pode ser obtido pela equação:

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0) \quad (28)$$

Onde:

- t – tempo, em meses, para o valor da flecha diferida;
- t_0 – idade, em meses, da aplicação da carga de longa duração;

Para tempos menores que 70 meses, $\xi(t)$ é calculado por:

$$\xi(t) = 0,68 \cdot (0,996^t) \cdot t^{0,32} \quad (29)$$

Para tempos maiores que 70 meses tem-se:

³ Disponível em: < <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/125/artigo285694-2.aspx> >

$$\xi(t) = 2 \quad (30)$$

Com isso pode-se calcular a flecha total a partir da equação:

$$f_{total} = (1 + \alpha_f) \cdot f_{eq} \quad (31)$$

3.2.2.8. Contraflecha

De acordo com a NBR6118:2014 os deslocamentos das lajes podem ser compensados por contraflechas especificadas em projeto. No entanto deve-se respeitar o limite máximo de $l/350$.

3.3. COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Segundo a NBR6118:2014 um carregamento é definido pela combinação das ações que têm probabilidade não desprezíveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura durante um período estabelecido. A verificação da segurança em relação aos estados limites últimos e aos estados limites de serviço deve ser realizada em função de combinações últimas e combinações de serviço, respectivamente.

3.3.1. Combinações últimas

As combinações últimas são classificadas em normas, especiais ou de construção e excepcionais. As combinações usuais de acordo com a NBR6118:2014 estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2 - Combinações últimas usuais

Combinações últimas (ELU)	Descrição	Cálculo das solicitações
Normais	Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de Concreto Armado ¹	$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{e2} F_{e2k} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \psi_{oj} F_{qjk}) + \gamma_{oc} \psi_{oc} F_{ck}$
	Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de Concreto Protendido	Deve ser considerada, quando necessário, a força de protensão como carregamento externo com os valores $P_{k,max}$ e $P_{k,min}$ para a força desfavorável e favorável, respectivamente, conforme definido na Seção 9
	Perda do equilíbrio como corpo rígido	$S(F_{sd}) \geq S(F_{nd})$ $F_{sd} = \gamma_{gs} G_{sk} + R_d$ $F_{nd} = \gamma_{gn} G_{nk} + \gamma_q Q_{nk} - \gamma_{qs} Q_{s,min}$, onde: $Q_{nk} = Q_{ik} + \sum \psi_{oj} Q_{jk}$
Especiais ou de construção ²	$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{e2} F_{e2k} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \psi_{oj} F_{qjk}) + \gamma_{oc} \psi_{oc} F_{ck}$	
Excepcionais ²	$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{e2} F_{e2k} + F_{q1exc} + \gamma_q \sum \psi_{oj} F_{qjk} + \gamma_{oc} \psi_{oc} F_{ck}$	
<p>onde:</p> <p>F_d = valor de cálculo das ações para combinação última ; F_{gk} = representa as ações permanentes diretas F_{ck} = representa as ações indiretas permanentes como a retração F_{e2k} e variáveis como a temperatura F_{e2k} F_{qk} = representa as ações variáveis diretas das quais F_{q1k} é escolhida principal $\gamma_g, \gamma_{e2}, \gamma_q, \gamma_{oc}$ – ver Tabela 3.5 ; ψ_{oj}, ψ_{oc} – ver Tabela 3.6 F_{sd} = representa as ações estabilizantes ; F_{nd} = representa as ações não estabilizantes G_{sk} = valor característico da ação permanente estabilizante R_d = esforço resistente considerado estabilizante, quando houver G_{nk} = valor característico da ação permanente instabilizante</p> $Q_{nk} = Q_{ik} + \sum_{j=2}^m \psi_{oj} Q_{jk}$ <p>Q_{ik} = valor característico das ações variáveis instabilizantes Q_{ik} = valor característico da ação variável instabilizante considerada principal ψ_{oj} e Q_{jk} = são as demais ações variáveis instabilizantes, consideradas com seu valor reduzido $Q_{s,min}$ = valor característico mínimo da ação variável estabilizante que acompanha obrigatoriamente uma ação variável instabilizante</p> <p>1. No caso geral, devem ser consideradas inclusive combinações onde o efeito favorável das cargas permanentes seja reduzido pela consideração de $\gamma_g = 1,0$. No caso de estruturas usuais de edifícios, essas combinações que consideram γ_g reduzido (1,0) não precisam ser consideradas. 2. Quando F_{q1k} ou F_{q1exc} atuarem em tempo muito pequeno ou tiverem probabilidade de ocorrência muito baixa, ψ_{oj} pode ser substituído por ψ_{2j}. Este pode ser o caso para ações sísmicas e situação de incêndio.</p>		

Fonte: NBR6118:2014

3.3.2. Combinações de serviço

Segundo a NBR6118:2014 as combinações de serviço são classificadas de acordo com o tempo de permanência na estrutura:

- Quase permanentes: atuam durante grande parte da vida útil da estrutura e sua consideração pode ser necessária no ELS.
- Frequentes: repetem-se muitas vezes durante a vida útil da estrutura e sua consideração pode ser necessária no ELS.
- Raras: ocorrem algumas vezes durante a vida útil da estrutura e sua verificação pode ser necessária no ELS de fissuras.

As combinações de serviço usuais podem ser verificadas na Tabela 3.

Tabela 3- Combinações usais de serviço

Combinações de serviço (ELS)	Descrição	Cálculo das solicitações
Combinações quase permanentes de serviço (CQP)	Nas combinações quase permanentes de serviço, todas as ações variáveis são consideradas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + \sum \psi_2 F_{qj,k}$
Combinações frequentes de serviço (CF)	Nas combinações frequentes de serviço, a ação variável principal F_{q1} é tomada com seu valor frequente $\psi_1 F_{q1k}$ e todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \sum F_{gik} + \psi_1 F_{q1k} + \sum \psi_2 F_{qjk}$
Combinações raras de serviço (CR)	Nas combinações raras de serviço, a ação variável principal F_{q1} é tomada com seu valor característico F_{q1k} e todas as demais ações são tomadas com seus valores frequentes $\psi_1 F_{qk}$	$F_{d,ser} = \sum F_{gik} + F_{q1k} + \sum \psi_1 F_{qjk}$
<p>onde</p> <p>$F_{d,ser}$ é o valor de cálculo das ações para combinações de serviço;</p> <p>F_{q1k} é o valor característico das ações variáveis principais diretas;</p> <p>ψ_1 é o fator de redução de combinação frequente para ELS;</p> <p>ψ_2 é o fator de redução de combinação quase permanente para ELS.</p>		

Fonte: NBR6118:2014

3.3.3. Coeficientes de ponderação

Os fatores de redução utilizados para o cálculo das combinações das ações são definidos pela Tabela 4.

Tabela 4 – Fator γ_f

Ações		γ_f		
		ψ_0	ψ_1	ψ_2
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	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

Fonte: NBR6118:2014

3.4. Cargas atuantes nas edificações

A NBR6180:1980 estabelece cargas verticais acidentais mínimas que devem ser adotadas para o dimensionamentos das estruturas. Algumas das cargas podem ser vistas na Tabela 5.

Tabela 5 – Cargas verticais mínimas em edificações

Local	Carga (KN/m ²)
Edifícios residenciais	1,5
Escritórios	2
Galerias de lojas	3

Fonte: NBR6180:1980

As cargas permanentes podem ser calculadas adotando-se os pesos específicos fornecidos pela Tabela 6.

Tabela 6 – Pesos específicos aparentes

Material	Peso específico aparente (KN/m ³)
Argamassa de cimento e areia	21
Concreto armado	25

Fonte: NBR6120:1980

4. METODOLOGIA E MATERIAIS

A metodologia utilizada para este trabalho foi a análise comparativa de lajes maciças e nervuradas como relação à verificação do ELS, adotando-se diversos valores de vãos e três carregamentos acidentais.

4.1. PLANILHAS DE VERIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DO ELS

Serão elaboradas planilhas de cálculo automático para a obtenção da seção mínima de laje necessária para atender ao estado limite de serviço. Para as lajes maciças a principal variável será a altura da seção da laje. Para a laje nervurada moldada no local as variáveis são a largura da nervura e a espessura da mesa de concreto. As lajes nervuradas serão consideradas com enchimento de EPS de seção de 40x40x10cm.

Serão adotados três casos de carregamentos acidentais: 1,5 kN/m², 3,0 kN/m² e 5,0 kN/m².

Para a obtenção dos momentos solicitantes serão utilizadas as tabelas de Bares e as lajes serão consideradas simplesmente apoiadas em seu contorno.

4.1.1. Comparação dos resultados

Após a verificação automática das lajes no ELS estarão disponíveis para comparação as seções das lajes maciças e nervuradas. Será realizada a comparação do carregamento de serviço das lajes, da posição da linha neutra e da armadura necessária.

4.2. CONCRETO

O concreto é um material composto de água, cimento e agregados. Associando estes materiais, o resultado é:

- Pasta: cimento + água;
- Argamassa: pasta + agregado miúdo;
- Concreto: Argamassa + agregado graúdo;
- Microconcreto: concreto em que o agregado graúdo tem dimensões reduzidas;
- Concreto de alto desempenho: considera-se, em geral, o concreto em que a resistência à compressão supera os 50 MPa.

Para utilização estrutural, o concreto sozinho não é adequado como elemento resistente, pois, enquanto tem uma boa resistência à compressão, pouco resiste à tração (cerca de 1/10 da resistência à compressão), embora esse tipo de solicitação quase sempre esteja presente nas estruturas das construções usuais.

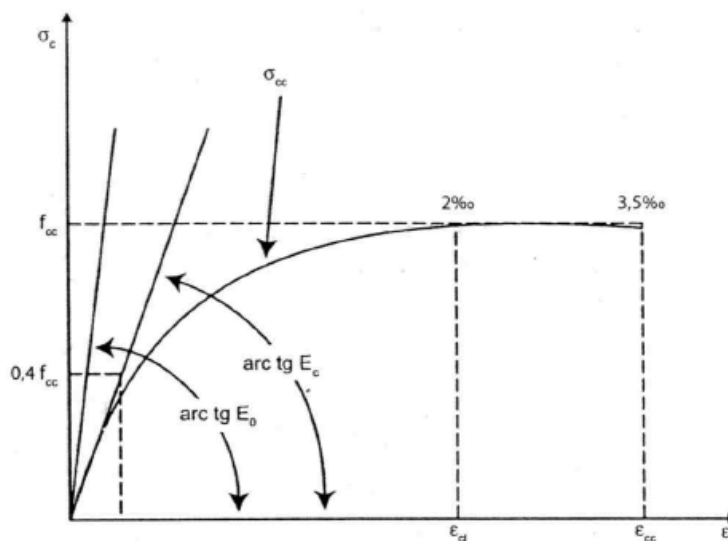
4.2.1. Peso específico do concreto

De acordo com a NBR6118:2014 se a massa específica real não for conhecida, para efeito de cálculo, pode-se adotar para o concreto simples o valor de 2400 kg/m^3 e para o concreto armado 2500 kg/m^3 .

4.2.2. Diagrama tensão-deformação e módulo de elasticidade

Mostra as relações entre tensões e deformações específicas do concreto na compressão. É obtido por ensaios dos corpos de prova à compressão centrada e apresenta uma parte inicial sensivelmente retilínea e uma parte final parabólica. Para a utilização na prática o diagrama é simplificado em uma reta inclinada inicial com comportamento aproximadamente elástico seguido de um patamar correspondente à tensão de compressão máxima do concreto. Podem-se definir então as seguintes características elásticas (Figura 14):

Figura 14 – Diagrama tensão-deformação do concreto



Fonte: Carvalho; Figueiredo Filho, 2014

- Módulo tangente: seu valor é variável em cada ponto e é obtido pela inclinação da reta tangente à curva nesse ponto;
- Módulo de deformação tangente na origem (E_0) ou módulo de elasticidade inicial: é obtido pela inclinação da reta tangente à curva na origem;
- Módulo secante (módulo de elasticidade ou módulo de deformação longitudinal à compressão E_c): seu valor é variável em cada ponto e é obtido pela inclinação da reta que une a origem a esse ponto.

O módulo de elasticidade inicial (E_{ci}) deve ser obtido segundo o ensaio estabelecido na NBR8522, sendo considerado o módulo de deformação tangente inicial, obtido aos 28 dias de idade.

Quando não forem realizados ensaios, a NBR6118:2014 permite estimar o valor do módulo de elasticidade inicial usando as expressões:

$$E_{ci} = \alpha_e 5600 \sqrt{f_{ck}} \text{ para } f_{ck} \text{ de 20 MPa a 50 MPa} \quad (32)$$

Onde:

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

$\alpha_e = 1,0$ para granito e gnaisse;

$\alpha_e = 0,9$ para calcário;

$\alpha_e = 0,7$ para arenito;

O módulo de deformação secante pode ser estimado pela expressão:

$$E_{cs} = \alpha_i E_{ci} \quad (33)$$

Onde:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0 \quad (34)$$

A classe do concreto define sua resistência característica. O principal impacto da classe do concreto é no módulo de elasticidade do concreto. Este módulo terá impacto na flecha final das lajes, uma vez que quanto maior o módulo de elasticidade maior a rigidez da peça e menor sua deformação. Os módulos de elasticidade para os concretos C25, C30 e C35 utilizando agregados de granito podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 - Módulo de elasticidade inicial e secante do concreto

Classe	fck	Eci (Mpa)	Ecs (Mpa)
C25	25	28000	24150
C30	30	30672	26838
C35	35	33130	29403

Fonte: Autor, 2016.

Observa-se que o módulo de elasticidade do concreto C35 é cerca de 22% maior que o do C25. Para o presente estudo será utilizado o concreto C30.

4.3. AÇO

Os tipos, as características e outros itens sobre barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado são definidos pela norma NBR7480:2007. As características mais importantes do aço são obtidas a partir de ensaios de tração: resistência característica de escoamento, limite de resistência e alongamento na ruptura.

As resistências características e de cálculo dos aços CA25, CA50 e CA60 podem ser observadas na Tabela 8. Para os aços, o coeficiente de redução aplicado para a obtenção da resistência de cálculo é de 1,15.

Tabela 8 – Resistência característica e de cálculo para o aço

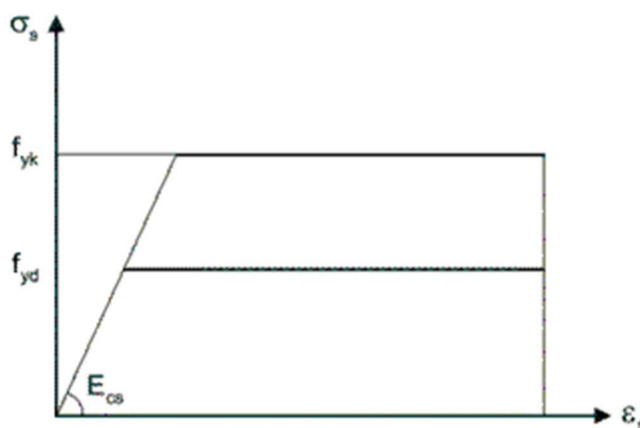
Aço	f_{yk} (Mpa)	f_{yd} (Mpa)
CA25	250	217
CA50	500	435
CA60	600	522

Fonte: NBR7480:2007

Para o presente estudo será utilizado o aço CA50.

Na Figura 15 está representado o diagrama de tensão-deformação simplificado do aço. Este diagrama é caracterizado por uma reta inicial inclinada e um patamar horizontal correspondente à resistência do aço.

Figura 15 – Diagrama tensão-deformação do aço



Fonte: Carvalho; Figueiredo, 2014.

4.4. TEMPO DE ESCORAMENTO

O tempo de escoramento é a variável fundamental para a obtenção do fator de multiplicação no processo simplificado da obtenção da flecha diferida no tempo. Maiores tempos de escoramento significam uma menor flecha devido à fluência. Para o presente trabalho foi considerado que não existe armadura na parte comprimida da seção. Os fatores obtidos para diferentes tempos de escoramento podem ser observados na Tabela 5:

Tabela 9 – Fator α_f para diferentes tempos de escoramento

Tempo de escoramento (dias)	Fator α_f
14	1,47
21	1,40
30	1,32
60	1,16
100	1,01

Fonte: Autor, 2016.

Observa-se que quanto maior o tempo de escoramento menor a flecha diferida no tempo. Ao se aumentar o tempo de escoramento da estrutura de 14 dias para 30 dias pode-se obter uma redução de cerca de 8% na flecha diferida.

Para este estudo será utilizado um tempo de escoramento de 21 dias.

5. VERIFICAÇÕES DO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO

5.1. LAJES MACIÇAS

Para a correta avaliação da flecha com a inclusão da fissuração é necessário dimensionar as lajes de modo a obter a armadura, e conseqüentemente a taxa de armadura. Para os casos onde o momento de fissuração da seção é maior que o momento solicitante não é necessário o dimensionamento no ELU para a verificação do estado limite de serviço.

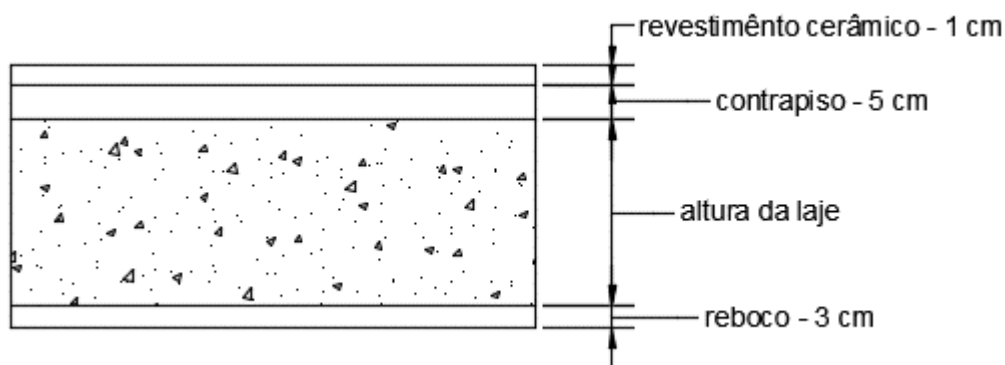
Serão adotadas diversas dimensões de vãos, variando de 1 em 1 metro. A dimensão mínima do vão será de 3 metros e a máxima será de 8 metros. O estudo

abordará somente lajes armadas nas duas direções, com a relação limite entre os vãos de 2.

De acordo com a NBR6118:2014 para a obtenção do momento solicitante para o ELU deve-se utilizar a combinação última normal e para o ELS a combinação quase permanente.

Para o cálculo do peso próprio será utilizada a seção da laje, com contrapiso, revestimento cerâmico e reboco da face inferior de acordo com as medidas apresentadas na Figura 16.

Figura 16 – Seção tipo da laje



Fonte: Autor, 2016.

5.1.1. Laje maciça 3x3m com carga acidental de 1,5 kN/m²

Será realizado o dimensionamento e verificação de uma quadrada de lado 3m com carregamento acidental de 1,5 kN/m². Será considerado que não há predominância de equipamentos e nem elevadas concentrações de pessoas. Será adotada a espessura mínima da laje de 8 cm.

O peso próprio do revestimento será igual para todas as lajes maciças, que é calculado com as medidas da seção padrão da Figura 16:

$$g_{rev} = 0,03 * 21 + 0,05 * 21 + 0,01 * 19 = 1,87 \text{ kN/m}^2$$

Para a obtenção do peso próprio total, adiciona-se a parcela referente ao concreto da laje:

$$g = \gamma_{concreto} * h + 1,87 = 25 * 0,08 + 1,87 = 3,87 \text{ kN/m}^2$$

O peso total é obtido somando-se a carga do peso próprio com a carga acidental, que neste caso é de 1,5 kN/m²:

$$p = 3,87 + 1,5 = 5,37 \text{ kN/m}^2$$

Para a combinação quase permanente sem concentração de equipamentos e pessoas temos:

$$p_{serv.} = 3,87 + 0,3 * 1,5 = 4,32 \text{ kN/m}^2$$

Para calcular o momento de serviço é necessário obter o coeficiente da tabela de Bares. Com os vãos de 3m temos:

$$\lambda = \frac{3}{3} = 1$$

Por se tratar de uma laje simplesmente apoiada em seu contorno, segundo a Figura 3 trata-se do caso 1.

Da tabela de Bares no Anexo I temos que:

$$\mu_x = 4,41$$

Em seguida é obtido o momento de serviço:

$$M_{serviço} = \mu_x \cdot \frac{p l_x^2}{100} = 4,41 * \frac{4,32 * 3^2}{100} = 1,77 \text{ kN.m}$$

É necessário saber se há fissuração ou não na seção crítica da laje e para isso calcula-se o momento de fissuração.

Inércia da seção bruta:

$$I_b = \frac{b_w h^3}{12} = \frac{1 * 0,08^3}{12} = 4,3E^{-5} \text{ m}^4$$

Resistência à tração do concreto C30:

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} = 0,3 * 30^{2/3} = 2,90 \text{ MPa}$$

Momento de fissuração, com $\alpha=1,5$ para seções retangulares:

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{y_t} = \frac{1,5 * 2,90 * 10^3 * 4,3E^{-5}}{0,04} = 4,63 \text{ kN.m}$$

Como o valor do momento de fissuração é maior que o valor do momento em serviço a laje quadrada de 3 m e 8 cm de espessura não sofrerá fissuração. A estrutura estará trabalhando no estágio I, sem a influência da fissuração.

Procede-se então com o cálculo da flecha elástica:

$$f_{ime} = \frac{p l_x^4 \alpha}{E h^3 100} = \frac{4,47 * 3^4 * 4,67}{26838000 * 0,08^3 * 100} = 0,0012 \text{ m} = 0,12 \text{ cm}$$

Considerando-se escoramento de 21 dias, temos uma flecha total de:

$$f_{total} = (1 + \alpha_f) f_{ime} = (1 + 1,4) 0,12 = 0,30 \text{ cm}$$

O valor limite do deslocamento é dado por:

$$f_{lim} = \frac{l_x}{250} = \frac{300}{250} = 1,2 \text{ cm}$$

Como o valor da flecha total é menor que o valor da flecha limite, a laje armada em duas direções de 3x3 metros de 8 cm de espessura está atende ao estado limite de serviço.

5.1.2. Laje maciça 5x7 metros com carga acidental de 3,0 kN/m²

Será verificado o estado limite de serviço para uma laje armada em duas direções de 5x7 metros, com altura de 12 cm, simplesmente apoiada com carregamento acidental de 3,0 kN/m².

O processo de cálculo para a laje de 4x6 metros é análogo ao do exemplo anterior, obtendo-se os seguintes resultados:

- $p = 7,87 \text{ kN/m}^2$
- $p_{\text{ser}} = 6,07 \text{ kN.m/m}$
- $M_{\text{ser}} = 11,00 \text{ kN.m/m}$
- $M_r = 10,43 \text{ kN.m/m}$

Observa-se que o momento de fissuração é menor que o momento em serviço e, portanto, ocorre fissuração e torna-se necessário o cálculo da inércia equivalente.

O momento de cálculo é calculado conforme indicado nas tabelas de Bares, para o caso 1 (quatro apoios simples):

$$M_{dx} = \mu_x \cdot \frac{p l_x^2}{100} = 1,4 * 7,25 * \frac{7,87 * 5^2}{100} = 19,97 \text{ KN/m}^2$$

Com o momento solicitante determina-se a posição da linha neutra. A altura útil será calculada considerando-se um cobrimento de 2,5 cm e a laje armada nas duas direções com barras de $\varnothing 8\text{mm}$. O concreto utilizado neste exemplo é o C30.

$$\begin{aligned} x &= 1,25 * d \left[1 - \sqrt{1 - \frac{Md}{0,425 * b_w * f_{cd} * d^2}} \right] \\ &= 1,25 * 0,083 \left[1 - \sqrt{1 - \frac{19,97}{0,425 * 1 * \frac{30E3}{1,4 * 0,083^2}}} \right] \\ &= 0,0181\text{m} = 1,81\text{cm} \end{aligned}$$

A armadura necessária é:

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{M_d}{f_{yd} * (d - 0,4x)} = \frac{19,97}{500E3/1,15 * (0,083 - 0,4 * 0,0181)} = 6,06E-4\text{m}^2 \\ &= 6,06\text{cm}^2 \end{aligned}$$

O parâmetro α_e é dado por:

$$\alpha_e = \frac{E_{aço}}{E_{concreto}} = \frac{210000}{26838} = 7,824$$

A taxa de armadura ρ é dada por:

$$\rho = \frac{6,06E-4}{1 * 0,09} = 0,00505$$

A posição da linha neutra no estágio II é dada por:

$$\begin{aligned} x_{II} &= \frac{\alpha_e \cdot A_s}{b_w} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_e \cdot \rho}} \right] = \frac{7,824 * 6,06E-4}{1} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2}{7,828 * 0,00505}} \right] \\ &= 0,0293 \text{ m} = 2,93 \text{ cm} \end{aligned}$$

Calcula-se então a inércia da laje no estágio II:

$$\begin{aligned} I_{II} &= \frac{b \cdot x_{II}^3}{3} + \alpha_e \cdot A_s (d - x_{II})^2 = \frac{1 * 0,0293^3}{3} + 7,824 * 6,06E-4 (0,083 - 0,0293)^2 \\ &= 8,9E-6 \text{ m}^{-4} \end{aligned}$$

Finalmente obtém-se a inércia equivalente:

$$\begin{aligned} (EI)_{eq} &= E_c \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \\ &= 26838000 \left\{ \left(\frac{10,45}{11,00} \right)^3 1,4E-4 + \left[1 - \left(\frac{10,45}{11,00} \right)^3 \right] 8,9E-6 \right\} \\ &= 3325,86 \text{ kN} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

Procede-se com o cálculo da flecha equivalente:

$$f_{eq} = \frac{\alpha \cdot b \cdot p \cdot l_x^4}{1200 (EI)_{eq}} = \frac{8,14 * 1 * 5,32 * 5^4}{1200 (3325,86)} = 0,0058 \text{ m} = 0,58 \text{ cm}$$

A flecha total, para um escoramento de 21 dias é dada por:

$$f_{total} = (1 + \alpha_f) f_{ime} = (1 + 1,4) 0,58 = 1,40 \text{ cm}$$

A flecha limite é dada por:

$$f_{lim} = \frac{l_x}{250} = \frac{500}{250} = 2 \text{ cm}$$

5.1.3. Resultados para várias dimensões de lajes maciças

A seguir serão apresentados os resultados do dimensionamento de lajes com valores de vãos variáveis. A determinação da espessura da laje maciça foi feita de modo a respeitar a espessura mínima determinada pela NBR6118:2014 e também sendo a menor espessura que atenda aos requisitos do estado limite de serviço. Será realizado o dimensionamento para lajes com carga acidental de 1,5 kN/m², 3,0 kN/m² e 5 kN/m².

Para todas as lajes foram considerados os seguintes critérios iniciais:

- Concreto C30;
- Lajes simplesmente apoiadas em seu contorno;
- Carga uniformemente distribuída;
- Duração do escoramento de 21 dias.

Para a verificação automática do estado limite de serviço serão utilizadas três planilhas de cálculo. O primeiro passo será o dimensionamento no estado limite último, obtendo-se a área de aço necessária para resistir aos esforços. As áreas de aço necessárias serão utilizadas na segunda planilha, quando necessário, para o cálculo da inércia equivalente. A segunda planilha consiste da verificação da fissuração na seção. Nesta planilha são comparados os valores do momento de serviço e momento de fissuração e nos casos nos quais a fissuração ocorre é calculada a inércia equivalente. A terceira planilha calcula a flecha elástica e a flecha total, além da flecha limite.

Todas as planilhas dependem das mesmas variáveis iniciais:

- Geometria (vão);
- Seção;
- Carregamento.

Para o cálculo carregamento foi utilizada a seção tipo vista na Figura 16.

O modo que as planilhas foram criadas garantem que quando uma variável destas três variáveis é alterada, a mesma variável é alterada nas outras planilhas garantindo assim a iteração dos cálculos. Para se obter a seção ótima da laje que atenda ao estado limite de serviço, a altura da seção foi alterada a cada iteração com um incremento de 1 cm a partir da espessura mínima até o momento que a laje atenda à verificação.

5.1.3.1. Lajes com carga acidental de 1,5 kN/m²

Tabela 10 - Dimensionamento no ELU das lajes maciças com carga acidental de 1,5 kN/m²

lx (m)	ly (m)	λ	α	h (m)	p (kN/m ²)	Mxd (kNm/m)	Myd (kNm/m)	d (m)	x (cm)	As (cm ²)
3	3	1	4,41	0,08	5,37	2,98	2,98	0,043	0,50	1,67
3	4	1,33	6,76	0,08	5,37	4,57	4,57	0,043	0,79	2,64
3	5	1,67	8,48	0,08	5,37	5,74	5,74	0,043	1,01	3,39
3	6	2,00	10	0,08	5,37	6,77	6,77	0,043	1,22	4,08
4	4	1	4,41	0,08	5,37	5,30	5,30	0,043	0,93	3,10
4	5	1,25	6,27	0,08	5,37	7,54	7,54	0,043	1,38	4,63
4	6	1,50	7,86	0,09	5,62	9,89	9,89	0,053	1,44	4,82
4	7	1,75	9,06	0,10	5,87	11,91	11,91	0,063	1,43	4,78
4	8	2,00	12,57	0,12	6,37	17,94	17,94	0,083	1,61	5,39
5	5	1	4,41	0,09	5,62	8,67	8,67	0,053	1,24	4,15
5	6	1,20	5,9	0,10	5,87	12,12	12,12	0,063	1,45	4,88
5	7	1,40	7,25	0,12	6,37	16,16	16,16	0,083	1,44	4,81
5	8	1,60	8,34	0,13	6,62	19,32	19,32	0,093	1,53	5,11
6	6	1	4,41	0,11	6,12	13,60	13,60	0,073	1,38	4,64
6	7	1,17	5,73	0,13	6,62	19,12	19,12	0,093	1,51	5,06
6	8	1,33	6,76	0,14	6,87	23,41	23,41	0,103	1,67	5,59
7	7	1	4,41	0,13	6,62	20,03	20,03	0,093	1,59	5,32
7	8	1,14	5,56	0,15	7,12	27,16	27,16	0,113	1,76	5,89

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 11 - Análise da fissuração das lajes maciças com carga acidental de 1,5 kN/m²

lx (m)	ly (m)	h (m)	p serv. (kN/m ²)	M serv. (kN.m/m)	Mr (kN.m)	Status	EI (kN.m ²)	EI eq (kN.m ²)
3	3	0,08	4,47	1,77	4,63	Não fissura	1145,11	-
3	4	0,08	4,47	2,72	4,63	Não fissura	1145,11	-
3	5	0,08	4,47	3,41	4,63	Não fissura	1145,11	-
3	6	0,08	4,47	4,02	4,63	Não fissura	1145,11	-
4	4	0,08	4,47	3,15	4,63	Não fissura	1145,11	-
4	5	0,08	4,47	4,48	4,63	Não fissura	1145,11	-
4	6	0,09	4,72	5,94	5,87	Fissura	-	1576,83
4	7	0,10	4,97	7,20	7,24	Não fissura	2236,53	-
4	8	0,12	5,47	11,00	10,43	Fissura	-	3321,21
5	5	0,09	4,72	5,20	5,87	Não fissura	1630,43	-
5	6	0,1	4,97	7,33	7,24	Fissura	-	2160,30
5	7	0,12	5,47	9,91	10,43	Não fissura	3864,73	-
5	8	0,13	5,72	11,93	12,24	Não fissura	4913,66	-
6	6	0,11	5,22	8,29	8,76	Não fissura	2976,83	-
6	7	0,13	5,72	11,80	12,24	Não fissura	4913,66	-
6	8	0,14	5,97	14,53	14,19	Fissura	-	5739,91
7	7	0,13	5,72	12,36	12,24	Fissura	-	4775,41
7	8	0,15	6,22	16,95	16,29	Fissura	-	6745,85
8	8	0,16	6,47	18,26	18,54	Não fissura	9160,84	-

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 12 - Flechas finais para as lajes maciças com carga acidental de 1,5 kN/m²

lx (m)	ly (m)	h (m)	p serviço (kN/m ²)	λ	α	f ime (cm)	f fluência (cm)	f total (cm)	f lim (cm)
3	3	0,08	4,32	1,00	4,67	0,12	0,17	0,29	1,20
3	4	0,08	4,32	1,33	7,56	0,19	0,27	0,46	1,20
3	5	0,08	4,32	1,67	10	0,25	0,36	0,61	1,20
3	6	0,08	4,32	2,00	11,68	0,30	0,42	0,71	1,20
4	4	0,08	4,32	1,00	4,67	0,38	0,53	0,90	1,60
4	5	0,08	4,32	1,25	7,56	0,61	0,85	1,46	1,60
4	6	0,09	4,57	1,50	10	0,62	0,87	1,48	1,60
4	7	0,10	4,82	1,75	11,68	0,54	0,75	1,29	1,60
4	8	0,12	5,32	2,00	15,35	0,52	0,73	1,26	1,60
5	5	0,09	4,57	1,00	4,67	0,68	0,95	1,64	2,00
5	6	0,10	4,82	1,20	6,52	0,76	1,06	1,82	2,00
5	7	0,12	5,32	1,40	8,14	0,58	0,82	1,40	2,00
5	8	0,13	5,57	1,60	9,54	0,56	0,79	1,35	2,00
6	6	0,11	5,07	1,00	4,67	0,86	1,20	2,06	2,40
6	7	0,13	5,57	1,17	6,31	0,77	1,08	1,85	2,40
6	8	0,14	5,82	1,33	7,56	0,83	1,16	1,99	2,40
7	7	0,13	5,57	1,00	4,67	1,09	1,53	2,62	2,80
7	8	0,15	6,07	1,14	6,09	1,10	1,53	2,63	2,80
8	8	0,16	6,32	1,00	4,67	1,10	1,54	2,64	3,20

Fonte: Autor, 2016.

5.1.3.2. Lajes com carga acidental de 3,0 kN/m²

Tabela 13 - Dimensionamento no ELU das lajes maciças com carga acidental de 3,0 kN/m²

lx	ly	λ	α	h (m)	p (kN/m ²)	Mxd (kNm/m)	d (m)	x (cm)	As (cm ²)
3	3	1	4,41	0,08	6,87	3,82	0,043	0,65	2,17
3	4	1,33	6,76	0,08	6,87	5,85	0,043	1,03	3,46
3	5	1,67	8,48	0,08	6,87	7,34	0,043	1,34	4,48
3	6	2,00	10	0,08	6,87	8,66	0,043	1,63	5,46
3	7	2,33	12,57	0,09	7,12	11,28	0,053	1,67	5,60
3	8	2,67	12,57	0,09	7,12	11,28	0,053	1,67	5,60
4	4	1	4,41	0,08	6,87	6,79	0,043	1,22	4,10
4	5	1,25	6,27	0,09	7,12	10,00	0,053	1,45	4,87
4	6	1,50	7,86	0,1	7,37	12,98	0,063	1,57	5,26
4	7	1,75	9,06	0,11	7,62	15,46	0,073	1,59	5,34
4	8	2,00	12,57	0,13	8,12	22,86	0,093	1,83	6,14
5	5	1	4,41	0,09	7,12	10,99	0,053	1,62	5,43
5	6	1,20	5,9	0,11	7,62	15,74	0,073	1,62	5,44
5	7	1,40	7,25	0,12	7,87	19,97	0,083	1,81	6,06
5	8	1,60	8,34	0,13	8,12	23,70	0,093	1,91	6,39
6	6	1	4,41	0,12	7,87	17,49	0,083	1,56	5,24
6	7	1,17	5,73	0,14	8,37	24,17	0,103	1,73	5,79
6	8	1,33	6,76	0,15	8,62	29,37	0,113	1,91	6,41
7	7	1	4,41	0,14	8,37	25,32	0,103	1,82	6,08
7	8	1,14	5,56	0,16	8,87	33,83	0,123	2,02	6,77
8	8	1	4,41	0,17	9,12	36,04	0,133	1,98	6,63

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 14 - Análise da fissuração das lajes maciças com carga acidental de 3,0 kN/m²

lx (m)	ly (m)	h (m)	p serv. (kN/m ²)	M serv. (kN.m/m)	Mr (kN.m)	Status	EI (kN.m ²)	EI eq (kN.m ²)
3	3	0,08	5,07	2,01	4,63	Não fissura	1145,11	-
3	4	0,08	5,07	3,08	4,63	Não fissura	1145,11	-
3	5	0,08	5,07	3,87	4,63	Não fissura	1145,11	-
3	6	0,08	5,07	4,56	4,63	Não fissura	1145,11	-
3	7	0,09	5,32	6,02	5,87	Fissura	-	1518,97
3	8	0,09	5,32	6,02	5,87	Fissura	-	1518,97
4	4	0,08	5,07	3,58	4,63	Não fissura	1145,11	-
4	5	0,09	5,32	5,34	5,87	Não fissura	1630,43	-
4	6	0,1	5,57	7,00	7,24	Não fissura	2236,53	-
4	7	0,11	5,82	8,44	8,76	Não fissura	2976,83	-
4	8	0,13	6,32	12,71	12,24	Fissura	-	4414,96
5	5	0,09	5,32	5,87	5,87	Não fissura	1630,43	-
5	6	0,11	5,82	8,58	8,76	Não fissura	2976,83	-
5	7	0,12	6,07	11,00	10,43	Fissura	-	3325,86
5	8	0,13	6,32	13,18	12,24	Fissura	-	3994,08
0	0	0		0,00				
6	6	0,12	6,07	9,64	10,43	Não fissura	3864,73	-
6	7	0,14	6,57	13,55	14,19	Não fissura	6137,05	-
6	8	0,15	6,82	16,60	16,29	Fissura	-	7160,54
7	7	0,14	6,57	14,20	14,19	Fissura	-	6131,52
7	8	0,16	7,07	19,26	18,54	Fissura	-	8214,64
8	8	0,17	7,32	20,66	20,93	Não fissura	10988,09	-

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 15 - Flechas finais para as lajes maciças com carga acidental de 3,0 kN/m²

lx (m)	ly (m)	h (m)	p serviço (kN/m ²)	1,1428571	α	f ime (cm)	f fluência (cm)	f total (cm)	f lim (cm)
3	3	0,08	4,77	1,00	4,67	0,13	0,18	0,32	1,20
3	4	0,08	4,77	1,33	7,56	0,21	0,30	0,51	1,20
3	5	0,08	4,77	1,67	10	0,28	0,39	0,67	1,20
3	6	0,08	4,77	2,00	11,68	0,33	0,46	0,79	1,20
3	7	0,09	5,02	2,33	15,35	0,34	0,48	0,82	1,20
3	8	0,09	5,02	2,67	15,35	0,34	0,48	0,82	1,20
4	4	0,08	4,77	1,00	4,67	0,42	0,58	1,00	1,60
4	5	0,09	5,02	1,25	7,56	0,50	0,70	1,19	1,60
4	6	0,10	5,27	1,50	10	0,50	0,70	1,21	1,60
4	7	0,11	5,52	1,75	11,68	0,46	0,65	1,11	1,60
4	8	0,13	6,02	2,00	15,35	0,45	0,63	1,07	1,60
5	5	0,09	5,02	1,00	4,67	0,75	1,05	1,80	2,00
5	6	0,11	5,52	1,20	6,52	0,63	0,88	1,51	2,00
5	7	0,12	5,77	1,40	8,14	0,74	1,03	1,77	2,00
5	8	0,13	6,02	1,60	9,54	0,75	1,05	1,80	2,00
6	6	0,12	5,77	1,00	4,67	0,75	1,05	1,81	2,40
6	7	0,14	6,27	1,17	6,31	0,70	0,97	1,67	2,40
6	8	0,15	6,52	1,33	7,56	0,74	1,04	1,78	2,40
7	7	0,14	6,27	1,00	4,67	0,96	1,34	2,29	2,80
7	8	0,16	6,77	1,14	6,09	1,00	1,41	2,41	2,80
8	8	0,17	7,02	1,00	4,67	1,02	1,43	2,44	3,20

Fonte: Autor, 2016.

5.1.3.3. Lajes com carga acidental de 5,0 kN/m

Tabela 16 - Dimensionamento no ELU das lajes maciças com carga acidental de 5,0 kN/m²

lx (m)	ly (m)	λ	α	h (m)	p (kN/m ²)	Mxd (kNm/m)	d (m)	x (cm)	As (cm ²)
3	3	1	4,41	0,08	8,87	4,93	0,043	0,85	2,86
3	4	1,33	6,76	0,08	8,87	7,56	0,043	1,38	4,64
3	5	1,67	8,48	0,08	8,87	9,48	0,043	1,82	6,10
3	6	2,00	10	0,09	9,12	11,49	0,053	1,71	5,72
3	7	2,33	12,57	0,1	9,37	14,84	0,063	1,83	6,13
3	8	2,67	12,57	0,1	9,37	14,84	0,063	1,83	6,13
				0					
4	4	1	4,41	0,08	8,87	8,76	0,043	1,65	5,54
4	5	1,25	6,27	0,1	9,37	13,16	0,063	1,60	5,35
4	6	1,50	7,86	0,11	9,62	16,94	0,073	1,76	5,91
4	7	1,75	9,06	0,12	9,87	20,03	0,083	1,81	6,08
4	8	2,00	12,57	0,14	10,37	29,20	0,103	2,12	7,11
				0					
5	5	1	4,41	0,1	9,37	14,46	0,063	1,78	5,95
5	6	1,20	5,9	0,12	9,87	20,38	0,083	1,85	6,20
5	7	1,40	7,25	0,14	10,37	26,31	0,103	1,89	6,34
5	8	1,60	8,34	0,14	10,37	30,27	0,103	2,21	7,39
				0					
6	6	1	4,41	0,13	10,12	22,49	0,093	1,80	6,03
6	7	1,17	5,73	0,14	10,37	29,95	0,103	2,18	7,31
6	8	1,33	6,76	0,16	10,87	37,03	0,123	2,23	7,47
				0					
7	7	1	4,41	0,15	10,62	32,13	0,113	2,11	7,07
7	8	1,14	5,56	0,17	11,12	42,41	0,133	2,36	7,89
				0					
8	8	1	4,41	0,18	11,37	44,93	0,143	2,30	7,72

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 17 - Análise da fissuração das lajes maciças com carga acidental de 5,0 kN/m²

lx (m)	ly (m)	h (m)	p serv. (kN/m ²)	M serv. (kN.m/m)	Mr (kN.m)	Status	EI (kN.m ²)	EI eq (kN.m ²)
3	3	0,08	5,87	2,33	4,63	Não fissura	1145,11	-
3	4	0,08	5,87	3,57	4,63	Não fissura	1145,11	-
3	5	0,08	5,87	4,48	4,63	Não fissura	1145,11	-
3	6	0,09	6,12	5,51	5,87	Não fissura	1630,43	-
3	7	0,1	6,37	7,21	7,24	Não fissura	2236,53	-
3	8	0,1	6,37	7,21	7,24	Não fissura	2236,53	-
4	4	0,08	5,87	4,14	4,63	Não fissura	1145,11	-
4	5	0,1	6,37	6,39	7,24	Não fissura	2236,53	-
4	6	0,11	6,62	8,33	8,76	Não fissura	2976,83	-
4	7	0,12	6,87	9,96	10,43	Não fissura	3864,73	-
4	8	0,14	7,37	14,82	14,19	Fissura	-	5434,17
5	5	0,1	6,37	7,02	7,24	Não fissura	2236,53	-
5	6	0,12	6,87	10,13	10,43	Não fissura	3864,73	-
5	7	0,14	7,37	13,36	14,19	Não fissura	6137,05	-
5	8	0,14	7,37	15,37	14,19	Fissura	-	4920,93
6	6	0,13	7,12	11,30	12,24	Não fissura	4913,66	-
6	7	0,14	7,37	15,20	14,19	Fissura	-	5067,19
6	8	0,16	7,87	19,15	18,54	Fissura	-	8353,91
7	7	0,15	7,62	16,47	16,29	Fissura	-	7325,53
7	8	0,17	8,12	22,12	20,93	Fissura	-	9395,05
8	8	0,18	8,37	23,62	23,46	Fissura	-	12789,92

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 18 - Flechas finais para as lajes maciças com carga acidental de 5,0 kN/m²

lx (m)	ly (m)	h (m)	p serviço (kN/m ²)	1,1428571	α	f ime (cm)	f fluência (cm)	f total (cm)	f lim (cm)
3	3	0,08	5,37	1,00	4,67	0,15	0,21	0,35	1,20
3	4	0,08	5,37	1,33	7,56	0,24	0,34	0,57	1,20
3	5	0,08	5,37	1,67	10	0,32	0,44	0,76	1,20
3	6	0,09	5,62	2,00	11,68	0,27	0,38	0,65	1,20
3	7	0,10	5,87	2,33	15,35	0,27	0,38	0,65	1,20
3	8	0,10	5,87	2,67	15,35	0,27	0,38	0,65	1,20
4	4	0,08	5,37	1,00	4,67	0,47	0,65	1,12	1,60
4	5	0,1	5,87	1,25	7,56	0,42	0,59	1,02	1,60
4	6	0,11	6,12	1,50	10	0,44	0,61	1,05	1,60
4	7	0,12	6,37	1,75	11,68	0,41	0,57	0,99	1,60
4	8	0,14	6,87	2,00	15,35	0,41	0,58	0,99	1,60
5	5	0,10	5,87	1,00	4,67	0,64	0,89	1,53	2,00
5	6	0,12	6,37	1,20	6,52	0,56	0,78	1,34	2,00
5	7	0,14	6,87	1,40	8,14	0,47	0,66	1,14	2,00
5	8	0,14	6,87	1,60	9,54	0,69	0,97	1,66	2,00
6	6	0,13	6,62	1,00	4,67	0,68	0,95	1,63	2,40
6	7	0,14	6,87	1,17	6,31	0,92	1,29	2,22	2,40
6	8	0,16	7,37	1,33	7,56	0,72	1,01	1,73	2,40
7	7	0,15	7,12	1,00	4,67	0,91	1,27	2,18	2,80
7	8	0,17	7,62	1,14	6,09	0,99	1,38	2,37	2,80
8	8	0,18	7,87	1,00	4,67	0,98	1,37	2,35	3,20

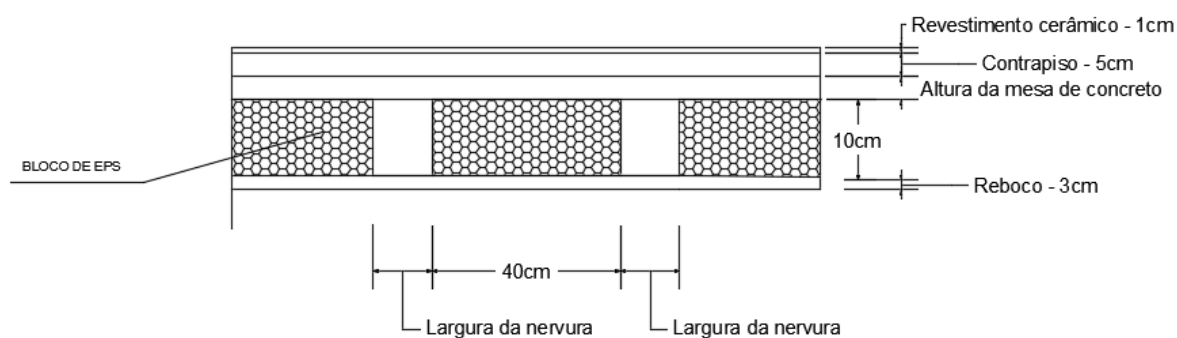
Fonte: Autor, 2016.

5.2. LAJES NERVURADAS

De modo semelhante às lajes maciças, serão adotadas diversas dimensões de vãos, variando de 3 a 8 metros. A laje nervurada utilizada será a com preenchimento em EPS. O mercado possui dimensões padronizadas de blocos de EPS para lajes nervuradas. A dimensão do bloco de EPS utilizado será de 40x40x10 cm.

A seção tipo da laje nervurada pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 - Seção tipo da laje nervurada



Fonte: Autor, 2016.

Assim como para lajes maciças, os esforços e deslocamentos serão obtidos com a ajuda da tabela de Bares, considerando a laje como simplesmente apoiada em todos os bordos.

5.2.1. Laje nervurada 5x8m com carga acidental de 3,0 kN/m²

Serão adotadas nervuras de 7 cm de largura e uma mesa de concreto com 4 cm de espessura totalizando 14 cm de altura.

De acordo com a seção padrão da Figura 17 o peso do revestimento é calculado por:

$$g_{rev} = 0,03 * 21 + 0,05 * 21 + 0,01 * 19 = 1,87 \text{ kN/m}^2$$

O peso da laje nervurada é dado por:

$$g_{laje} = \frac{((0,40 + 0,07)^2 * 0,14 - (0,40^2 * 0,10))}{(0,40 + 0,07)^2} * 25 = 1,69 \text{ kN/m}^2$$

Para a carga total ainda é acrescentada a carga acidental, neste caso de 3,0 kN/m².

$$p = 1,87 + 1,69 + 3,0 = 6,56 \text{ kN/m}^2$$

Para a combinação quase permanente sem concentração de equipamentos e pessoas temos:

$$p_{serv.} = 1,87 + 1,69 + 0,3 * 3,0 = 4,46 \text{ kN/m}^2$$

Para os vãos tem-se a relação:

$$\lambda = \frac{8}{5} = 1,6$$

O momento solicitante de serviço é calculado por:

$$M_{serv.} = \mu_x \cdot \frac{p l_x^2}{100} = 10 * \frac{4,46 * 5^2}{100} = 11,15 \text{ kNm/m}$$

Considerando a largura do EPS de 40 cm e o vão de 5m, define-se a largura colaborante:

$$b_f = b_w + 2 * b_1$$

A variável b_1 deve ser menor que:

$$0,10 * a = 0,10 * 5 = 0,50 \text{ m}$$

$$0,50 * b_2 = 0,5 * 0,4 = 0,20 \text{ m}$$

Portanto:

$$b_f = 0,07 + 2 * 0,2 = 0,47$$

Calcula-se a solicitação por nervura:

$$M_{dx} = 11,15 * 0,47 = 5,24 \text{ kNm/nervura}$$

Como as lajes nervuradas não conseguem desenvolver a mesma rigidez à torção que as lajes maciças um ajuste se faz necessário. Aplicando o critério de Hahn, temos:

$$\varepsilon = \frac{l_x}{l_y} = \frac{5}{8} = 0,625$$

$$\delta = \frac{1}{1 - \left(\frac{5}{6} * \frac{\varepsilon^2}{1 + \varepsilon^4} \right)} = \frac{1}{1 - \left(\frac{5}{6} * \frac{0,625^2}{1 + 0,625^4} \right)} = 1,39$$

O momento solicitante de serviço final por nervura é:

$$M_{dx} = 5,24 * 1,39 = 7,30 \text{ kN.m/nervura}$$

Aplicando as expressões para as características da seção T no estágio I mostradas na seção 3.2.2.3 temos:

$$y_{cg} = 0,0448 \text{ m}$$

$$I_b = 4,35\text{E-}05 \text{ m}^{-4}$$

Calcula-se o momento de fissuração:

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{y_t} = \frac{1,2 * 0,3 * \sqrt[3]{30^2} * 4,35\text{E-}5}{(0,14 - 0,0448)} = 1,59 \text{ kNm/nervura}$$

Comparando o momento de serviço com o momento de fissuração conclui-se que parte da laje nervurada estará trabalhando no estágio II e para a correta avaliação da flecha é necessário o cálculo da inércia equivalente.

Para o cálculo da inércia equivalente é necessário o dimensionamento da seção no ELU.

Dimensionando a seção “T” com as características determinadas obtém-se:

$$x = 2,23 \text{ cm}$$

$$A_s = 3,53 \text{ cm}^2/\text{nervura}$$

Com o dimensionamento no ELU realizado, pode-se partir para a verificação do estado limite em serviço.

Com o concreto C30, temos:

$$\alpha_e = \frac{E_{aço}}{E_{concreto}} = \frac{210000}{26838} = 7,824$$

Obtêm-se as características da seção no estágio II de acordo com a seção 3.2.2.5:

Primeiramente calcula-se a posição da linha neutra no estágio II:

$$x_{II} = 0,0310 \text{ m}$$

A linha neutra no estágio II está localizada na mesa da seção, assim calcula-se a inércia da peça no estágio II:

$$I_{x,II} = 2,06\text{E-}5 \text{ m}^{-4}$$

Finalmente, a inércia equivalente é dada por:

$$\begin{aligned} I_{eq} &= \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} = \left\{ \left(\frac{1,59}{7,30} \right)^3 4,35\text{E-}5 + \left[1 - \left(\frac{1,59}{7,30} \right)^3 \right] 2,06\text{E-}5 \right\} \\ &= 2,08\text{E-}5 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

A flecha elástica para a seção de 15 cm de altura no estágio não fissurado é dado por:

$$f_{ime} = \frac{p l_x^4 \alpha}{E h^3 100} = \frac{4,46 * 5^4 * 9,54}{26838 * 0,15^3 * 100} = 0,0036 \text{ cm} = 0,36 \text{ cm}$$

De modo aproximado temos que a flecha com a consideração da fissuração é:

$$f_{fiss.} = \frac{I_c}{I_m} * f_{elast.} = \frac{4,35\text{E-}5}{2,08\text{E-}5} = 2,09 * 0,36 = 0,75 \text{ cm}$$

A flecha diferida no tempo é:

$$f_{total} = (1 + \alpha_f) f_{ime} = (1 + 1,4) 0,75 = 1,81 \text{ cm}$$

A flecha limite é dada por:

$$f_{lim} = \frac{l_x}{250} = \frac{500}{250} = 2 \text{ cm}$$

A laje nervurada 5x8m com nervura de 7 cm e mesa de espessura de 4 cm atende ao estado limite de serviço.

5.2.2. Resultados para várias dimensões de lajes nervuradas

A seguir serão apresentados os resultados da verificação das lajes nervuradas com valores de vãos variáveis. Todas as lajes nervuradas analisadas possuirão a mesma seção-tipo, que pode ser vista na Figura 17. Será realizado o dimensionamento para lajes com carga acidental de 1,5 kN/m², 3,0 kN/m² e 5 kN/m².

Para todas as lajes foram considerados os seguintes critérios iniciais:

- Concreto C30;
- Lajes simplesmente apoiadas em seu contorno;
- Carga uniformemente distribuída;
- Duração do escoramento de 21 dias.

Para a verificação automática do estado limite de serviço foram utilizadas três planilhas de cálculo interligadas. A primeira consiste do dimensionamento no ELU, a segunda a verificação da fissuração e a terceira se refere ao cálculo das flechas propriamente ditas.

A seção das lajes nervuradas possui basicamente três variáveis: geometria do material de enchimento, largura da nervura e espessura da mesa de concreto. A otimização da seção a fim de atender ao estado limite de serviço não é trivial. Para este estudo serão fixadas duas das três variáveis da seção: geometria do material de enchimento e largura da nervura. Serão adotadas as seguintes dimensões:

- Geometria do material de enchimento: 40x40x10cm (EPS);
- Largura da nervura: 7 cm.

5.2.2.1. Lajes nervuradas com carga acidental de 1,5 kN/m²

Tabela 19 - Dimensionamento no ELU das lajes nervuradas com carga acidental de 1,5 kN/m²

lx (m)	ly (m)	λ	α	h (m)	hf (m)	bw (m)	bf (m)	p (kN/m ²)	Mxd (kNm/m)	M por nervura (kN/m)	Hahn	Mxd (kNm/nervura)	d (m)	x (m)	As / nervura (m ²)
3	3	1	4,41	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	2,67	1,26	1,71	2,15	0,097	0,00329	5,18E-05
3	4	1,33	6,76	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	4,10	1,93	1,55	2,99	0,097	0,00459	7,23E-05
3	5	1,67	8,48	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	5,14	2,42	1,36	3,29	0,097	0,00506	7,96E-05
3	6	2,00	10	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	6,06	2,85	1,24	3,54	0,097	0,00546	8,59E-05
4	4	1	4,41	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	4,75	2,23	1,71	3,83	0,097	0,00591	9,30E-05
4	5	1,25	6,76	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	7,28	3,42	1,61	5,51	0,097	0,00859	1,35E-04
4	6	1,50	8,48	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	9,14	4,29	1,45	6,22	0,097	0,00975	1,54E-04
4	7	1,75	10	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	10,77	5,06	1,33	6,71	0,097	0,01057	1,66E-04
4	8	2,00	12,57	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	13,54	6,36	1,24	7,92	0,097	0,01257	1,98E-04
5	5	1	4,41	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	7,42	3,49	1,71	5,98	0,097	0,00936	1,48E-04
5	6	1,20	6,76	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	11,38	5,35	1,64	8,77	0,097	0,01402	2,21E-04
5	7	1,40	8,48	0,14	0,03	0,07	0,47	5,06	15,02	7,06	1,51	10,65	0,107	0,01542	2,43E-04
5	8	1,60	10	0,14	0,04	0,07	0,47	5,06	17,71	8,32	1,39	11,60	0,107	0,01689	2,66E-04
6	6	1	4,41	0,14	0,04	0,07	0,47	5,06	11,24	5,29	1,71	9,06	0,107	0,01300	2,05E-04
6	7	1,17	6,76	0,14	0,04	0,07	0,47	5,06	17,24	8,10	1,66	13,45	0,107	0,01982	3,12E-04
6	8	1,33	8,48	0,15	0,05	0,07	0,47	5,31	22,69	10,66	1,55	16,56	0,117	0,02238	3,53E-04
7	7	1	4,41	0,16	0,06	0,07	0,47	5,56	16,82	7,90	1,71	13,55	0,127	0,01643	2,59E-04
7	8	1,14	6,76	0,17	0,07	0,07	0,47	5,81	26,94	12,66	1,67	21,18	0,137	0,02430	3,83E-04
8	8	1	4,41	0,19	0,09	0,07	0,47	6,31	24,93	11,72	1,71	20,09	0,157	0,01967	3,10E-04

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 20 - Análise da fissuração das lajes nervuradas com carga acidental de 1,5 kN/m²

lx (m)	ly (m)	h (m)	hf (m)	bw (m)	bf (m)	p (kN/m ²)	M serviço (kN.m/m)	M nerv. (kN.m)	Mr (kN.m)	Status	I b (m ⁴)	I ii (m ⁴)	I m (m ⁴)
3	3	0,13	0,03	0,07	0,47	3,76	1,49	1,20	1,05	Fissura	2,79E-05	3,35E-06	1,97E-05
3	4	0,13	0,03	0,07	0,47	3,76	2,29	1,67	1,07	Fissura	2,84E-05	4,43E-06	1,08E-05
3	5	0,13	0,03	0,07	0,47	3,76	2,87	1,84	1,08	Fissura	2,86E-05	4,81E-06	9,66E-06
3	6	0,13	0,03	0,07	0,47	3,76	3,38	1,98	1,09	Fissura	2,87E-05	5,13E-06	9,06E-06
4	4	0,13	0,03	0,07	0,47	3,76	2,65	2,14	1,10	Fissura	2,89E-05	5,49E-06	8,65E-06
4	5	0,13	0,03	0,07	0,47	3,76	4,07	3,07	1,14	Fissura	2,99E-05	7,55E-06	8,70E-06
4	6	0,13	0,03	0,07	0,47	3,76	5,10	3,47	1,16	Fissura	3,03E-05	8,40E-06	9,22E-06
4	7	0,13	0,03	0,07	0,47	3,76	6,01	3,75	1,18	Fissura	3,06E-05	8,99E-06	9,66E-06
4	8	0,13	0,03	0,07	0,47	3,76	7,56	4,42	1,21	Fissura	3,13E-05	1,04E-05	1,08E-05
5	5	0,13	0,03	0,07	0,47	3,76	4,14	3,34	1,16	Fissura	3,02E-05	8,12E-06	9,03E-06
5	6	0,13	0,03	0,07	0,47	3,76	6,35	4,90	1,24	Fissura	3,18E-05	1,14E-05	1,17E-05
5	7	0,14	0,03	0,07	0,47	4,01	8,50	6,03	1,46	Fissura	4,02E-05	1,52E-05	1,56E-05
5	8	0,14	0,04	0,07	0,47	4,01	10,02	6,56	1,48	Fissura	4,12E-05	1,65E-05	1,67E-05
6	6	0,14	0,04	0,07	0,47	4,01	6,37	5,13	1,41	Fissura	3,95E-05	1,33E-05	1,38E-05
6	7	0,14	0,04	0,07	0,47	4,01	9,76	7,61	1,54	Fissura	4,24E-05	1,87E-05	1,89E-05
6	8	0,15	0,05	0,07	0,47	4,26	13,00	9,49	1,82	Fissura	5,35E-05	2,52E-05	2,54E-05
7	7	0,16	0,06	0,07	0,47	4,51	9,74	7,85	1,93	Fissura	6,12E-05	2,40E-05	2,46E-05
7	8	0,17	0,07	0,07	0,47	4,76	15,76	12,40	2,41	Fissura	7,96E-05	3,89E-05	3,92E-05
8	8	0,19	0,09	0,07	0,47	5,26	14,84	11,96	2,95	Fissura	1,08E-04	4,72E-05	4,81E-05

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 21 - Flechas finais para as lajes nervuradas com carga acidental de 1,5 kN/m²

lx (m)	ly (m)	λ	α	h (m)	hf (m)	bw (m)	b1	bf (m)	p serviço (kN/m ²)	lb / lii	f ela. (cm)	f fissur. (cm)	f total (cm)	f lim (cm)
3	3	1	4,67	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	3,76	1,42	0,02	0,03	0,08	1,20
3	4	1,33	7,46	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	3,76	2,63	0,04	0,10	0,24	1,20
3	5	1,67	10	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	3,76	2,96	0,05	0,15	0,37	1,20
3	6	2,00	11,68	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	3,76	3,17	0,06	0,19	0,46	1,20
4	4	1	4,67	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	3,76	3,34	0,08	0,25	0,61	1,60
4	5	1,25	6,95	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	3,76	3,44	0,11	0,39	0,94	1,60
4	6	1,50	8,87	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	3,76	3,29	0,14	0,48	1,14	1,60
4	7	1,75	10,43	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	3,76	3,17	0,17	0,54	1,29	1,60
4	8	2,00	11,68	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	3,76	2,89	0,19	0,55	1,32	1,60
5	5	1	4,67	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	3,76	3,34	0,19	0,62	1,49	2,00
5	6	1,20	6,52	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	3,76	2,72	0,26	0,71	1,82	2,00
5	7	1,40	8,14	0,14	0,03	0,07	0,2	0,47	4,01	2,58	0,28	0,71	1,71	2,00
5	8	1,60	9,54	0,14	0,04	0,07	0,2	0,47	4,01	2,46	0,32	0,80	1,92	2,00
6	6	1	4,67	0,14	0,04	0,07	0,2	0,47	4,01	2,85	0,33	0,94	2,26	2,40
6	7	1,17	6,3	0,14	0,04	0,07	0,2	0,47	4,01	2,24	0,44	1,00	2,39	2,40
6	8	1,33	7,46	0,15	0,05	0,07	0,2	0,47	4,26	2,11	0,45	0,96	2,30	2,40
7	7	1	4,67	0,16	0,06	0,07	0,2	0,47	4,51	2,49	0,46	1,15	2,75	2,80
7	8	1,14	6,09	0,17	0,07	0,07	0,2	0,47	4,76	2,03	0,53	1,07	2,57	2,80
8	8	1	4,67	0,19	0,09	0,07	0,2	0,47	5,26	2,25	0,55	1,23	2,95	3,20

Fonte: Autor, 2016.

5.2.2.2. Lajes nervuradas com carga acidental de 3,0 kN/m²

Tabela 22 - Dimensionamento no ELU das lajes nervuradas com carga acidental de 3,0 kN/m²

lx (m)	ly (m)	λ	α	h (m)	hf (m)	bw (m)	bf (m)	p (kN/m ²)	Mxd (kNm/m)	M por nervura (kN/m)	Hahn	Mxd (kNm/nervura)	d (m)	x (m)	As / nervura (m ²)
3	3	1	4,41	0,13	0,03	0,07	0,47	6,31	3,51	1,65	1,71	2,82	0,097	0,00433	6,82E-05
3	4	1,33	6,76	0,13	0,03	0,07	0,47	6,31	5,37	2,53	1,55	3,92	0,097	0,00606	9,54E-05
3	5	1,67	8,48	0,13	0,03	0,07	0,47	6,31	6,74	3,17	1,36	4,31	0,097	0,00668	1,05E-04
3	6	2,00	10	0,13	0,03	0,07	0,47	6,31	7,95	3,74	1,24	4,65	0,097	0,00721	1,14E-04
4	4	1	4,41	0,13	0,03	0,07	0,47	6,31	6,23	2,93	1,71	5,02	0,097	0,00781	1,23E-04
4	5	1,25	6,76	0,13	0,03	0,07	0,47	6,31	9,55	4,49	1,61	7,22	0,097	0,01141	1,80E-04
4	6	1,50	8,48	0,13	0,03	0,07	0,47	6,31	11,98	5,63	1,45	8,15	0,097	0,01297	2,04E-04
4	7	1,75	10	0,13	0,03	0,07	0,47	6,31	14,13	6,64	1,33	8,81	0,097	0,01408	2,22E-04
4	8	2,00	12,57	0,13	0,03	0,07	0,47	6,31	17,76	8,35	1,24	10,39	0,097	0,01680	2,65E-04
5	5	1	4,41	0,13	0,03	0,07	0,47	6,31	9,74	4,58	1,71	7,85	0,097	0,01245	1,96E-04
5	6	1,20	6,76	0,13	0,03	0,07	0,47	6,31	14,93	7,02	1,64	11,51	0,097	0,01878	2,96E-04
5	7	1,40	8,48	0,14	0,03	0,07	0,47	6,56	19,47	9,15	1,51	13,81	0,107	0,02040	3,21E-04
5	8	1,60	10	0,14	0,04	0,07	0,47	6,56	22,96	10,79	1,39	15,04	0,107	0,02239	3,53E-04
6	6	1	4,41	0,14	0,04	0,07	0,47	6,56	14,58	6,85	1,71	11,75	0,107	0,01713	2,70E-04
6	7	1,17	6,76	0,14	0,04	0,07	0,47	6,56	22,35	10,50	1,66	17,44	0,107	0,02640	4,16E-04
6	8	1,33	8,48	0,15	0,05	0,07	0,47	6,81	29,10	13,68	1,55	21,24	0,117	0,02948	4,64E-04
7	7	1	4,41	0,16	0,06	0,07	0,47	7,06	21,36	10,04	1,71	17,21	0,127	0,02120	3,34E-04
7	8	1,14	6,76	0,17	0,07	0,07	0,47	7,31	33,90	15,93	1,67	26,65	0,137	0,03126	4,92E-04
8	8	1	4,41	0,19	0,09	0,07	0,47	7,81	30,86	14,50	1,71	24,86	0,157	0,02467	3,89E-04

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 23 - Análise da fissuração das lajes nervuradas com carga acidental de 3,0 kN/m²

lx (m)	ly (m)	h (m)	hf (m)	bw (m)	bf (m)	p (kN/m ²)	M serviço (kN.m/m)	M nerv. (kN.m)	Mr (kN.m)	Status	I b (m4)	I ii (m4)	Im (m4)
3	3	0,13	0,03	0,07	0,47	4,21	1,67	1,35	1,07	Fissura	2,83E-05	4,22E-06	1,63E-05
3	4	0,13	0,03	0,07	0,47	4,21	2,56	1,87	1,10	Fissura	2,90E-05	5,61E-06	1,03E-05
3	5	0,13	0,03	0,07	0,47	4,21	3,21	2,06	1,11	Fissura	2,92E-05	6,09E-06	9,72E-06
3	6	0,13	0,03	0,07	0,47	4,21	3,79	2,21	1,12	Fissura	2,94E-05	6,50E-06	9,45E-06
4	4	0,13	0,03	0,07	0,47	4,21	2,97	2,39	1,13	Fissura	2,96E-05	6,96E-06	9,34E-06
4	5	0,13	0,03	0,07	0,47	4,21	4,55	3,44	1,19	Fissura	3,09E-05	9,58E-06	1,05E-05
4	6	0,13	0,03	0,07	0,47	4,21	5,71	3,89	1,22	Fissura	3,14E-05	1,07E-05	1,13E-05
4	7	0,13	0,03	0,07	0,47	4,21	6,73	4,20	1,24	Fissura	3,18E-05	1,14E-05	1,19E-05
4	8	0,13	0,03	0,07	0,47	4,21	8,47	4,95	1,28	Fissura	3,27E-05	1,32E-05	1,35E-05
5	5	0,13	0,03	0,07	0,47	4,21	4,64	3,74	1,21	Fissura	3,13E-05	1,03E-05	1,10E-05
5	6	0,13	0,03	0,07	0,47	4,21	7,11	5,48	1,32	Fissura	3,34E-05	1,44E-05	1,47E-05
5	7	0,14	0,03	0,07	0,47	4,46	9,45	6,71	1,56	Fissura	4,22E-05	1,91E-05	1,94E-05
5	8	0,14	0,04	0,07	0,47	4,46	11,15	7,30	1,59	Fissura	4,35E-05	2,06E-05	2,08E-05
6	6	0,14	0,04	0,07	0,47	4,46	7,08	5,70	1,49	Fissura	4,13E-05	1,66E-05	1,71E-05
6	7	0,14	0,04	0,07	0,47	4,46	10,85	8,47	1,67	Fissura	4,52E-05	2,34E-05	2,36E-05
6	8	0,15	0,05	0,07	0,47	4,71	14,38	10,49	1,97	Fissura	5,71E-05	3,12E-05	3,14E-05
7	7	0,16	0,06	0,07	0,47	4,96	10,72	8,63	2,05	Fissura	6,43E-05	2,92E-05	2,97E-05
7	8	0,17	0,07	0,07	0,47	5,21	17,26	13,57	2,59	Fissura	8,45E-05	4,69E-05	4,72E-05
8	8	0,19	0,09	0,07	0,47	5,71	16,11	12,98	3,11	Fissura	1,13E-04	5,52E-05	5,60E-05

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 24 - Flechas finais para as lajes nervuradas com carga acidental de 3,0 kN/m²

lx (m)	ly (m)	λ	α	h (m)	hf (m)	bw (m)	b1	bf (m)	p serviço (kN/m ²)	lb / lii	f ela. (cm)	f fissur. (cm)	f total (cm)	f lim (cm)
3	3	1	4,67	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,21	1,74	0,03	0,05	0,11	1,20
3	4	1,33	7,46	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,21	2,80	0,04	0,12	0,29	1,20
3	5	1,67	10	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,21	3,00	0,06	0,17	0,42	1,20
3	6	2,00	11,68	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,21	3,11	0,07	0,21	0,50	1,20
4	4	1	4,67	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,21	3,17	0,09	0,27	0,65	1,60
4	5	1,25	6,95	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,21	2,95	0,13	0,37	0,90	1,60
4	6	1,50	8,87	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,21	2,78	0,16	0,45	1,08	1,60
4	7	1,75	10,43	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,21	2,67	0,19	0,51	1,22	1,60
4	8	2,00	11,68	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,21	2,42	0,21	0,52	1,24	1,60
5	5	1	4,67	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,21	2,84	0,21	0,59	1,42	2,00
5	6	1,20	6,52	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,21	2,27	0,29	0,66	1,59	2,00
5	7	1,40	8,14	0,14	0,03	0,07	0,2	0,47	4,46	2,18	0,31	0,67	1,61	2,00
5	8	1,60	9,54	0,14	0,04	0,07	0,2	0,47	4,46	2,09	0,36	0,75	1,81	2,00
6	6	1	4,67	0,14	0,04	0,07	0,2	0,47	4,46	2,42	0,37	0,89	2,13	2,40
6	7	1,17	6,3	0,14	0,04	0,07	0,2	0,47	4,46	1,91	0,49	0,95	2,27	2,40
6	8	1,33	7,46	0,15	0,05	0,07	0,2	0,47	4,71	1,82	0,50	0,92	2,20	2,40
7	7	1	4,67	0,16	0,06	0,07	0,2	0,47	4,96	2,16	0,51	1,09	2,63	2,80
7	8	1,14	6,09	0,17	0,07	0,07	0,2	0,47	5,21	1,79	0,58	1,03	2,72	2,80
8	8	1	4,67	0,19	0,09	0,07	0,2	0,47	5,71	2,02	0,59	1,20	3,11	3,20

Fonte: Autor, 2016.

5.2.2.3. Lajes nervuradas com carga acidental de 5,0 kN/m²

Tabela 25 - Dimensionamento no ELU das lajes nervuradas com carga acidental de 5,0 kN/m²

lx (m)	ly (m)	λ	α	h (m)	hf (m)	bw (m)	bf (m)	p (kN/m ²)	Mxd (kNm/m)	M por nervura (kN/m)	Hahn	Mxd (kNm/nervura)	d (m)	x (m)	As / nervura (m ²)
3	3	1	4,41	0,13	0,03	0,07	0,47	8,31	4,62	2,17	1,71	3,72	0,097	0,00574	9,03E-05
3	4	1,33	6,76	0,13	0,03	0,07	0,47	8,31	7,08	3,33	1,55	5,17	0,097	0,00804	1,27E-04
3	5	1,67	8,48	0,13	0,03	0,07	0,47	8,31	8,88	4,17	1,36	5,68	0,097	0,00888	1,40E-04
3	6	2,00	10	0,13	0,03	0,07	0,47	8,31	10,47	4,92	1,24	6,12	0,097	0,00959	1,51E-04
4	4	1	4,41	0,13	0,03	0,07	0,47	8,31	8,21	3,86	1,71	6,61	0,097	0,01040	1,64E-04
4	5	1,25	6,76	0,13	0,03	0,07	0,47	8,31	12,58	5,91	1,61	9,51	0,097	0,01528	2,41E-04
4	6	1,50	8,48	0,13	0,03	0,07	0,47	8,31	15,78	7,42	1,45	10,74	0,097	0,01742	2,74E-04
4	7	1,75	10	0,13	0,03	0,07	0,47	8,31	18,61	8,75	1,33	11,60	0,097	0,01894	2,98E-04
4	8	2,00	12,57	0,13	0,03	0,07	0,47	8,31	23,40	11,00	1,24	13,68	0,097	0,02272	3,58E-04
5	5	1	4,41	0,14	0,04	0,07	0,47	8,56	13,21	6,21	1,71	10,64	0,107	0,01541	2,43E-04
5	6	1,20	6,76	0,14	0,04	0,07	0,47	8,56	20,25	9,52	1,64	15,61	0,107	0,02334	3,68E-04
5	7	1,40	8,48	0,15	0,05	0,07	0,47	8,81	26,15	12,29	1,51	18,54	0,117	0,02534	3,99E-04
5	8	1,60	10	0,16	0,06	0,07	0,47	9,06	31,71	14,90	1,39	20,77	0,127	0,02601	4,10E-04
6	6	1	4,41	0,14	0,04	0,07	0,47	8,56	19,02	8,94	1,71	15,33	0,107	0,02287	3,60E-04
6	7	1,17	6,76	0,15	0,05	0,07	0,47	8,81	30,01	14,11	1,66	23,42	0,117	0,03293	5,19E-04
6	8	1,33	8,48	0,15	0,05	0,07	0,47	8,81	37,65	17,70	1,55	27,48	0,117	0,03968	6,25E-04
7	7	1	4,41	0,17	0,07	0,07	0,47	9,31	28,16	13,24	1,71	22,69	0,137	0,02619	4,12E-04
7	8	1,14	6,76	0,17	0,07	0,07	0,47	9,31	43,17	20,29	1,67	33,94	0,137	0,04111	6,48E-04
8	8	1	4,41	0,22	0,1	0,07	0,47	10,56	41,72	19,61	1,71	33,62	0,187	0,02792	4,40E-04

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 26 - Análise da fissuração das lajes nervuradas com carga acidental de 5,0 kN/m²

lx (m)	ly (m)	h (m)	hf (m)	bw (m)	bf (m)	p (kN/m ²)	M serviço (kN.m/m)	M nerv. (kN.m)	Mr (kN.m)	Status	I b (m4)	I ii (m4)	Im (m4)
3	3	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	1,91	1,54	1,09	Fissura	2,88E-05	5,35E-06	1,38E-05
3	4	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	2,93	2,14	1,13	Fissura	2,97E-05	7,14E-06	1,05E-05
3	5	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	3,67	2,35	1,15	Fissura	3,00E-05	7,76E-06	1,04E-05
3	6	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	4,33	2,53	1,16	Fissura	3,02E-05	8,29E-06	1,04E-05
4	4	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	3,39	2,73	1,17	Fissura	3,05E-05	8,87E-06	1,06E-05
4	5	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	5,20	3,93	1,26	Fissura	3,22E-05	1,22E-05	1,29E-05
4	6	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	6,53	4,44	1,29	Fissura	3,29E-05	1,36E-05	1,41E-05
4	7	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	7,69	4,80	1,32	Fissura	3,34E-05	1,45E-05	1,49E-05
4	8	0,13	0,03	0,07	0,47	4,81	9,67	5,65	1,38	Fissura	3,46E-05	1,68E-05	1,70E-05
5	5	0,14	0,04	0,07	0,47	5,06	5,58	4,49	1,45	Fissura	4,05E-05	1,53E-05	1,61E-05
5	6	0,14	0,04	0,07	0,47	5,06	8,55	6,59	1,61	Fissura	4,39E-05	2,13E-05	2,16E-05
5	7	0,15	0,05	0,07	0,47	5,31	11,26	7,98	1,88	Fissura	5,51E-05	2,78E-05	2,81E-05
5	8	0,16	0,06	0,07	0,47	5,56	13,90	9,10	2,16	Fissura	6,72E-05	3,42E-05	3,46E-05
6	6	0,14	0,04	0,07	0,47	5,06	8,03	6,47	1,60	Fissura	4,37E-05	2,10E-05	2,13E-05
6	7	0,15	0,05	0,07	0,47	5,31	12,92	10,08	2,04	Fissura	5,88E-05	3,39E-05	3,42E-05
6	8	0,15	0,05	0,07	0,47	5,31	16,21	11,83	2,19	Fissura	6,20E-05	3,90E-05	3,92E-05
7	7	0,17	0,07	0,07	0,47	5,81	12,55	10,11	2,46	Fissura	8,09E-05	4,11E-05	4,17E-05
7	8	0,17	0,07	0,07	0,47	5,81	19,24	15,13	2,84	Fissura	9,11E-05	5,75E-05	5,77E-05
8	8	0,22	0,10	0,07	0,47	7,06	19,92	16,05	4,17	Fissura	1,77E-04	8,79E-05	8,95E-05

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 27- Flechas finais para as lajes nervuradas com carga acidental de 5,0 kN/m²

lx (m)	ly (m)	λ	α	h (m)	hf (m)	bw (m)	b1	bf (m)	p serviço (kN/m ²)	lb / lii	f ela. (cm)	f fissur. (cm)	f total (cm)	f lim (cm)
3	3	1	4,67	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,81	2,09	0,03	0,06	0,17	1,20
3	4	1,33	7,46	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,81	2,83	0,05	0,14	0,37	1,20
3	5	1,67	10	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,81	2,90	0,07	0,19	0,51	1,20
3	6	2,00	11,68	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,81	2,91	0,08	0,22	0,59	1,20
4	4	1	4,67	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,81	2,88	0,10	0,28	0,74	1,60
4	5	1,25	6,95	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,81	2,51	0,15	0,36	0,96	1,60
4	6	1,50	8,87	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,81	2,34	0,19	0,43	1,15	1,60
4	7	1,75	10,43	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,81	2,24	0,22	0,49	1,29	1,60
4	8	2,00	11,68	0,13	0,03	0,07	0,2	0,47	4,81	2,04	0,24	0,50	1,31	1,60
5	5	1	4,67	0,14	0,04	0,07	0,2	0,47	5,06	2,51	0,20	0,50	1,85	2,00
5	6	1,20	6,52	0,14	0,04	0,07	0,2	0,47	5,06	2,03	0,28	0,57	1,50	2,00
5	7	1,40	8,14	0,15	0,05	0,07	0,2	0,47	5,31	1,96	0,30	0,58	1,54	2,00
5	8	1,60	9,54	0,16	0,06	0,07	0,2	0,47	5,56	1,94	0,30	0,59	1,93	2,00
6	6	1	4,67	0,14	0,04	0,07	0,2	0,47	5,06	2,05	0,42	0,85	2,25	2,40
6	7	1,17	6,3	0,15	0,05	0,07	0,2	0,47	5,31	1,72	0,48	0,82	2,18	2,40
6	8	1,33	7,46	0,15	0,05	0,07	0,2	0,47	5,31	1,58	0,57	0,90	2,37	2,40
7	7	1	4,67	0,17	0,07	0,07	0,2	0,47	5,81	1,94	0,49	0,96	2,53	2,80
7	8	1,14	6,09	0,17	0,07	0,07	0,2	0,47	5,81	1,58	0,64	1,02	2,69	2,80
8	8	1	4,67	0,22	0,10	0,07	0,2	0,47	7,06	1,97	0,47	0,93	2,46	3,20

Fonte: Autor, 2016.

5.2.3. Comparação do desempenho dos tipos de lajes

5.2.3.1. Carregamento de serviço

A variação da seção dos dois tipos de laje a atender o ELS impacta no peso próprio das lajes. Para este estudo, no caso das lajes maciças, a variação do peso próprio é causada pelo aumento da altura da laje. Nas lajes nervuradas a variação do peso próprio se deve ao aumento da espessura da mesa de concreto. Dos resultados das verificações da seção 5.1.3 e 5.2.2 foram retirados os carregamentos de serviço das diversas lajes e tabelados para comparação. Analisou-se também a diferença percentual entre o peso da laje maciça e da laje nervurada.

Tabela 28 – Carregamento de serviço

lx	ly	q = 1,5 kN/m ²			q = 3,0 kN/m ²			q = 5,0 kN/m ²				
		maciça	nerv.	DIF	maciça	nerv.	DIF	maciça	nerv.	DIF		
3	3	4,32	3,76	13,0%	4,77	4,21	11,8%	5,37	4,81	10%		
3	4	4,32	3,76	13,0%	4,77	4,21	11,8%	5,37	4,81	10%		
3	5	4,32	3,76	13,0%	4,77	4,21	11,8%	5,37	4,81	10%		
3	6	4,32	3,76	13,0%	4,77	4,21	11,8%	5,62	4,81	14%		
4	4	4,32	3,76	13,0%	4,77	4,21	11,8%	5,37	4,81	10%		
4	5	4,32	3,76	13,0%	5,02	4,21	16,2%	5,87	4,81	18%		
4	6	4,57	3,76	17,7%	5,27	4,21	20,1%	6,12	4,81	21%		
4	7	4,82	3,76	22,0%	5,52	4,21	23,7%	6,37	4,81	25%		
4	8	5,32	3,76	29,3%	6,02	4,21	30,1%	6,87	4,81	30%		
5	5	4,57	3,76	17,7%	5,02	4,21	16,2%	5,87	5,06	14%		
5	6	4,82	3,76	22,0%	5,52	4,21	23,7%	6,37	5,06	21%		
5	7	5,32	4,01	24,6%	5,77	4,46	22,7%	6,87	5,31	23%		
5	8	5,57	4,01	28,0%	6,02	4,46	25,9%	6,87	5,56	19%		
6	6	5,07	4,01	20,9%	5,77	4,46	22,7%	6,62	5,06	24%		
6	7	5,57	4,01	28,0%	6,27	4,46	28,9%	6,87	5,31	23%		
6	8	5,82	4,26	26,8%	6,52	4,71	27,8%	7,37	5,31	28%		
7	7	5,57	4,51	19,0%	6,27	4,96	20,9%	7,12	5,81	18%		
7	8	6,07	4,76	21,6%	6,77	5,21	23,1%	7,62	5,81	24%		
8	8	6,32	5,26	16,8%	7,02	5,71	18,7%	7,87	7,06	10%		
		Média:			19,6%				20,0%			18,6%

Fonte: Autor, 2016.

Observa-se que para todos os casos o carregamento da laje maciça é maior quando comparado ao da laje nervurada. A média da variação do carregamento para cada carregamento acidental é praticamente a mesma, em torno de 19,4%.

O menor carregamento transmitido da laje nervurada acarreta uma menor carga nas vigas nas quais a laje se apoia e por consequência uma menor carga transmitida para os pilares e fundações. Este carregamento menor representa uma economia para o sistema estrutural da edificação, uma vez que para solicitações menores são necessárias seções resistentes menores. A diferença do carregamento refere-se justamente a parte da seção da laje nervurada ocupada pelo material de enchimento.

As lajes maciças e nervuradas de 7x8m com carga acidental de 5 kN/m² necessitaram da mesma altura da seção para atender ao ELS: 17 cm. O carregamento de serviço para essas lajes foi de:

- Laje maciça: 7,62 kN/m²
- Laje nervurada: 5,81 kN/m²

Uma vez que as duas lajes possuem o mesmo carregamento acidental e também o mesmo peso próprio do revestimento, a diferença de carregamento corresponde somente ao peso do concreto. Neste caso, por m² foram substituídos 1,81 kN de concreto por material inerte.

5.2.3.2. Quantidade de armadura

A distribuição da armadura nos dois tipos de lajes se dá de maneira diferente. Enquanto as armaduras nas lajes maciças estão dispostas de maneira uniforme em toda a seção nas lajes nervuradas as armaduras se encontram concentradas nas almas das nervuras. Para comparar a quantidade de armadura necessária para a seção que atende ao estado limite de serviço é necessário transformar a área de armadura necessária de uma nervura para uma faixa de um metro, dividindo a mesma pela largura colaborante.

Tabela 29 – Quantidade de armadura necessária

lx (m)	ly (m)	q = 1,5 kN/m ²			q = 3,0 kN/m ²			q = 5,0 kN/m ²		
		maciça	nerv.	DIF	maciça	nerv.	DIF	maciça	nerv.	DIF
3	3	1,67	1,10	34,2%	2,17	1,36	37,2%	2,86	1,81	36,9%
3	4	2,64	1,54	41,8%	3,46	1,91	44,9%	4,64	2,53	45,4%
3	5	3,39	1,69	50,0%	4,48	2,10	53,1%	6,10	2,80	54,2%
3	6	4,08	1,83	55,2%	5,46	2,27	58,4%	5,72	3,02	47,2%
4	4	3,10	1,98	36,3%	4,10	2,46	39,9%	5,54	3,28	40,8%
4	5	4,63	2,88	37,8%	4,87	3,59	26,3%	5,35	4,81	9,9%
4	6	4,82	3,27	32,2%	5,26	4,09	22,3%	5,91	5,49	7,1%
4	7	4,78	3,54	25,9%	5,34	4,43	16,9%	6,08	5,97	1,9%
4	8	5,39	4,21	21,8%	6,14	5,29	13,8%	7,11	7,16	-0,7%
5	5	4,15	3,14	24,4%	5,43	3,92	27,8%	5,95	4,86	18,4%
5	6	4,88	4,70	3,7%	5,44	5,92	-8,7%	6,20	7,35	-18,6%
5	7	4,81	5,17	-7,4%	6,06	6,43	-6,0%	6,34	7,98	-25,9%
5	8	5,11	5,66	-10,7%	6,39	7,05	-10,5%	7,39	8,19	-10,8%
6	6	4,64	4,36	6,1%	5,24	5,40	-2,9%	6,03	7,21	-19,5%
6	7	5,06	6,64	-31,4%	5,79	8,32	-43,8%	7,31	10,38	-42,0%
6	8	5,59	7,50	-34,2%	6,41	9,29	-44,8%	7,47	12,50	-67,4%
7	7	5,32	5,51	-3,6%	6,08	6,68	-9,8%	7,07	8,25	-16,7%
7	8	5,89	8,14	-38,2%	6,77	9,85	-45,4%	7,89	12,95	-64,1%
8	8	5,77	6,59	-14,3%	6,63	7,77	-17,3%	7,72	8,79	-13,9%

Fonte: Autor, 2016.

Percebe-se que a quantidade de armadura necessária para as lajes nervuradas é maior a partir de um menor vão de 5 metros. Analisando o caso de uma laje 6x7 m para um carregamento acidental de 3 kN/m² temos as seguintes alturas para as lajes:

- Laje maciça - h= 14 cm;
- Laje nervurada – h=14 cm.

As lajes possuem a mesma altura total, entretanto a laje nervurada necessita de 43,8% a mais de armadura. Essa relação pode indicar que a seção da laje nervurada adotada não está otimizada.

Para comparar o desempenho dos dois tipos de lajes quanto à efetiva utilização do concreto como material resistente na compressão, foi comparada a posição da linha neutra. A linha neutra no momento do serviço não é constante para as lajes que sofrem fissuração, já que a laje estará trabalhando parcialmente no estágio I e parcialmente no estágio II. Para esta comparação será utilizada a posição da linha neutra no estágio I.

Tabela 30 – Posição da linha neutra (cm)

lx (m)	ly (m)	q = 1,5 kN/m ²		q = 3,0 kN/m ²		q = 5,0 kN/m ²	
		maciça	nerv.	maciça	nerv.	maciça	nerv.
3	3	0,50	0,33	0,65	0,43	0,85	0,57
3	4	0,79	0,46	1,03	0,61	1,38	0,80
3	5	1,01	0,51	1,34	0,67	1,82	0,89
3	6	1,22	0,55	1,63	0,72	1,71	0,96
4	4	0,93	0,59	1,22	0,78	1,65	1,04
4	5	1,38	0,86	1,45	1,14	1,60	1,53
4	6	1,44	0,97	1,57	1,30	1,76	1,74
4	7	1,43	1,06	1,59	1,41	1,81	1,89
4	8	1,61	1,26	1,83	1,68	2,12	2,27
5	5	1,24	0,94	1,62	1,25	1,78	1,54
5	6	1,45	1,40	1,62	1,88	1,85	2,33
5	7	1,44	1,54	1,81	2,04	1,89	2,53
5	8	1,53	1,69	1,91	2,24	2,21	2,60
6	6	1,38	1,30	1,56	1,71	1,80	2,29
6	7	1,51	1,98	1,73	2,64	2,18	3,29
6	8	1,67	2,24	1,91	2,95	2,23	3,97
7	7	1,59	1,64	1,82	2,12	2,11	2,62
7	8	1,76	2,43	2,02	3,13	2,36	4,11
8	8	1,72	1,97	2,30	1,98	2,47	2,79

Fonte: Autor, 2016.

Na Tabela 30 percebe-se que independentemente da carga acidental, até um menor vão na ordem de 5m as lajes maciças apresentam uma posição da linha neutra maior que as lajes nervuradas. Em primeira análise esse dado poderia ser interpretado como um melhor aproveitamento da seção de concreto para as lajes maciças em vãos menores, porém, não se pode esquecer que as lajes maciças apresentam uma seção maciça de concreto armado. Levando em conta a seção maciça, percebe-se que apenas uma pequena parte do concreto realmente contribui para a resistência. A análise da posição da linha neutra mostra que independentemente da carga acidental a ideia da substituição de parte da seção de concreto por material inerte nas lajes nervuradas é justificada.

5.2.3.3. Variação do material de enchimento nas lajes nervuradas

Na seção 5.2.3.2 foi mostrado que o material de enchimento utilizado para as lajes verificadas poderia não estar otimizado para as lajes com vãos maiores que 6 metros. Para se analisar a influência do material de enchimento nas lajes nervuradas foi refeito o dimensionamento para lajes nervuradas com enchimento de EPS com dimensões de 40x40x16cm, portanto diferindo do material de enchimento primeiramente usado apenas na altura. Para a comparação foi utilizada a verificação do estado limite de serviço com carga acidental de 3 kN/m² e como parâmetro de comparação foi utilizado o carregamento de serviço da laje. Não foi realizado o dimensionamento para vãos menores que 5 metros. Para melhor avaliar a influência dos vãos foi realizada a verificação do ELS para vãos de até 10 metros.

Tabela 31 – Carregamento de serviço (kN/m²) para as lajes nervuradas com diferentes geometrias de enchimentos

		p serv. (kN/m ²)	
lx (m)	ly (m)	EPS2 h=10cm	EPS h=16cm
5	5	4,21	4,62
5	6	4,21	4,62
5	7	4,46	4,62
5	8	4,46	4,62
6	6	4,46	4,62
6	7	4,46	4,62
6	8	4,71	4,62
7	7	4,96	4,62
7	8	5,21	4,62
8	8	5,71	4,62
8	9	5,71	4,87
9	9	6,21	5,12
9	10	6,46	5,12
10	10	6,96	5,85
10	11	7,21	5,85

Fonte: Autor, 2016.

Na Tabela 31 nota-se que até vãos de 7 metros as lajes com preenchimento de EPS de 10 cm de altura possuem um carregamento de serviço menor que as lajes com EPS de 20 cm de altura. A partir de 7 metros a lógica se inverte e as lajes com EPS de 20 cm de altura passam a oferecer um carregamento de serviço menor. Essa relação se justifica pela variável da seção que foi utilizada na verificação do estado limite de serviço: a altura da mesa de concreto. Com o preenchimento de EPS com 10 cm de altura, a partir de um vão de aproximadamente 6 metros, foi necessário aumento da espessura da mesa para se atender à verificação. Esse aumento da espessura da mesa resulta em um peso adicional de concreto, mas não necessariamente em uma parcela significativa de concreto resistente adicional. O aumento da mesa de concreto serviu muito mais para o aumento da altura da seção, fornecendo mais inércia à flexão, do que o aumento da seção resistente efetiva de concreto. Com o preenchimento de EPS de 20 cm a seção com uma mesa de concreto de 3 cm já possui uma altura suficiente que fornecerá rigidez para atender à verificação do ELS. Conseqüentemente, sem a necessidade de se aumentar a espessura da mesa de concreto o peso próprio da seção não se altera.

5.2.4. Análises adicionais

Para a verificação do estado limite de serviço das lajes neste trabalho, foi sempre considerado que se tratava de lajes simplesmente apoiadas em vigas indeslocáveis verticalmente. No entanto, os apoios reais possuem rigidez de acordo com suas características e são deformáveis. Para as lajes, os apoios deformáveis podem representar uma variação no momento fletor solicitante e nas flechas finais. A consideração da deslocabilidade dos apoios não é trivial e não possui solução analítica direta pelo modelo elástico.

Para se comparar a variabilidade do momento fletor nas lajes serão obtidos os momentos máximos solicitantes para algumas lajes maciças quadradas através de três métodos:

- Método 1 – laje será considerada simplesmente apoiada em vigas indeslocáveis em seu contorno e os momentos serão obtidos através das tabelas de Bares;

- Método 2 – laje será considerada simplesmente apoiada em vigas indeslocáveis em seu contorno e os momentos serão obtidos através de elementos finitos;
- Método 3 – laje será considerada apoiada em vigas deformáveis de altura $H/10$, onde H é o vão da laje, e largura 15cm. As vigas de apoio possuem 15% da inércia à torção, segundo a NBR6118:2014. Os momentos serão obtidos através de elementos finitos.

Tabela 32 – Momento máximo para diferentes modelos de cálculo

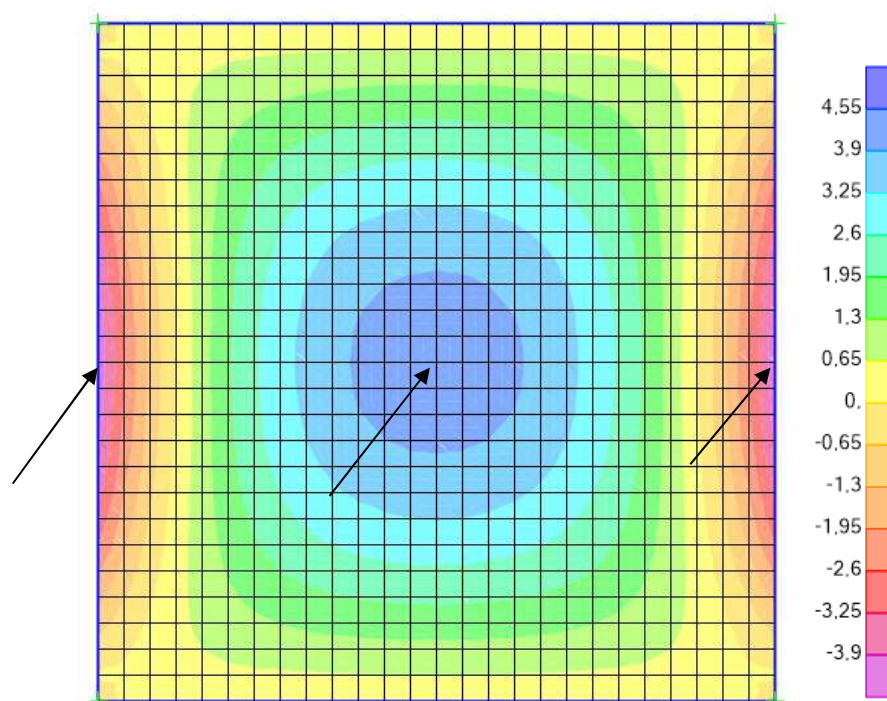
lx = ly (m)	h (cm)	p (KN/m ²)	Modelo			
			1	2	3	
3	8	5	1,98	1,99	2,05	-1,72
4	8	5	3,53	3,54	2,72	-2,87
5	9	5,25	5,79	5,81	4,26	-4,32
6	11	5,75	9,13	9,16	7,45	-5,55
7	13	6,25	13,51	13,55	11,95	-6,51
8	16	7	19,76	19,82	17,65	-6,20

Fonte: Autor, 2016.

Na Tabela 32 observa-se que os métodos 1 e 2 fornecem valores de momentos fletores praticamente iguais. Esse fato já era esperado uma vez que as tabelas de Bares são resoluções analíticas da teoria da elasticidade, na qual o programa SAP2000 se baseia. O modelo 3 além de fornecer para lajes quadradas momentos fletores positivos menores, fornece também momentos fletores negativos. Esses momentos negativos são decorrentes da consideração de uma estrutura monolítica, ou seja, que a viga irá restringir a rotação da laje através de sua rigidez à torção.

Na Figura 18 está demonstrado um detalhe da posição do máximo momento positivo e negativo na direção x para a laje 5x5 de acordo com o método 3. O máximo momento negativo está, assim como esperado, na viga de contorno enquanto o momento positivo se encontra no meio da laje.

Figura 18 – Momentos fletores para a laje 5x5 de acordo com o método 3



Fonte: Autor

A consideração da deformação vertical das vigas de apoio também impacta na flecha final da laje. Para verificar a influência dessa deformação, serão comparadas duas lajes nervuradas. A primeira laje será considerada como apoiada em apoios indeslocáveis e a segunda como sendo apoiada em uma viga deformável. A laje escolhida para comparar será a de 7x8 metros com carga acidental de 3,0 kN/m². O tipo de laje adotado será a laje nervurada, com enchimento de EPS 40x40x16cm. Para a análise com a deformação dos apoios será utilizada a analogia de grelha.

Tabela 33 – Momento fletor e flecha para diferentes métodos de cálculo

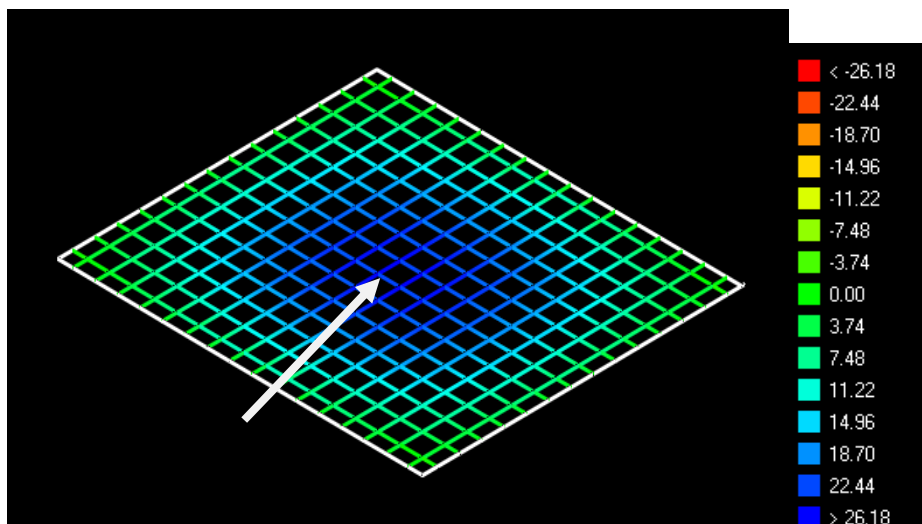
Tabela de Bares		Analogia de grelha	
Mxd (kNm/m)	f total (cm)	Mxd (kNm/m)	f total (cm)
31,18	1,97	33,95	3,88

Fonte: Autor, 2016.

Na Tabela 33 pode-se perceber que o valor do momento fletor na menor direção dos dois métodos de análise diferem 8% enquanto as flechas totais diferem 49%. Para este modelo foram utilizadas vigas com 15 cm de largura e 70 cm de altura. Para a laje 7x8m o deslocamento vertical máximo permitido é de 2,80 cm. Considerando as flechas

totais obtidas pelos dois métodos de cálculo pode-se concluir que neste caso a utilização das tabelas de Bares resultaria em uma errônea avaliação de que a laje atende ao ELS.

Figura 19 – Momentos fletores por analogia de grelha



Fonte: Autor

Na Figura 19 pode-se observar a posição do momento fletor positivo máximo, que ocorre no centro da laje.

Para se comparar a diferença da verificação do ELS por meio das tabelas de Bares e analogia de grelha foi realizada a verificação das lajes nervuradas com enchimento de 16 cm da Tabela 31 através do método de analogia de grelha.

Os resultados podem ser observados na Tabela 34. Para a verificação por meio do método da analogia de grelha foram utilizadas as mesmas características da seção utilizadas para a verificação por meio das tabelas de Bares. As vigas de apoio foram consideradas com base de 15 cm e altura de 1/10 do vão. O comprimento máximo das vigas foi adotado com sendo 7 m. A partir de um vão maior de 7 metros foi introduzido um pilar intermediário quadrado de seção 40x40 cm no meio do vão. Este pilar adicional visa melhor representar as situações encontradas na prática, onde vigas mais longas que 7 metros não são usuais.

Tabela 34 – Flechas totais para dois métodos de cálculo

		Flecha total (cm)	
lx (m)	ly (m)	Tabela de bares	Analogia de grelha
5	5	1,42	2,22
5	6	1,59	3,31
5	7	1,61	4,12
5	8	1,81	3,41
6	6	2,13	4,80
6	7	2,27	5,43
6	8	2,20	5,21
7	7	2,63	6,04
7	8	2,72	6,26
8	8	2,88	6,76
8	9	3,18	6,77
9	9	3,46	8,79
9	10	3,43	8,45
10	10	3,82	10,32
10	11	3,89	11,29

Fonte: Autor, 2016.

Na Tabela 34 percebe-se que os resultados das flechas totais para os dois métodos diferem. Para as lajes quadradas de 5, 7 e 10 metros de vão a diferença é de, respectivamente, 56%, 229% e 270%. A diferença cresce à medida que os vãos aumentam. A diferença pode ser explicada pela crescente influência das vigas de apoio e pela não alteração das seções dos pilares de apoio. Quanto maior o vão maior a deformação das vigas de apoio e maior o momento solicitante. Com o aumento do momento solicitante transmitido aos pilares menor se torna a capacidade dos mesmos em restringir a rotação das vigas, aumentando as deflexões das vigas.

A seção das vigas influencia na rigidez das mesmas, o que acarreta a alteração da inércia à flexão e conseqüentemente a deflexão. Para se verificar a influência da alteração da inércia das vigas na deflexão das lajes serão realizadas verificações do ELS alterando-se a seção das vigas de apoio.

Na Tabela 35 estão os resultados das novas verificações da laje nervurada 7x8 metros por analogia de grelha, alterando-se a seção das vigas de apoio.

Tabela 35 – Momento fletor e flecha para diferentes seções de vigas

Viga 15x60cm		Viga 15x70cm		Viga 15x80cm	
Mxd (kNm/m)	f total (cm)	Mxd (kNm/m)	f total (cm)	Mxd (kNm/m)	f total (cm)
33,85	3,95	33,95	3,88	34,02	3,83

Fonte: Autor, 2016.

A diminuição da rigidez das vigas de apoio acarreta em uma diminuição do momento fletor na menor direção da laje e um aumento da flecha total da laje. Para as análises da Tabela 35 as lajes foram consideradas apoiadas em pilares quadrados 20x20 cm em seus cantos. A alteração da seção e orientação destes pilares resultaria em diferenças nas flechas finais das lajes.

6. CONCLUSÕES

O avanço da tecnologia aplicada à análise estrutural permitiu a redução das simplificações dos modelos e o refinamento dos resultados obtidos. No caso das lajes, a possibilidade da consideração do efeito da deformação dos apoios permite uma análise muito mais criteriosa do ELS.

A verificação do ELS para os exemplos de lajes maciças e nervuradas analisadas mostrou que, assim como esperado, apenas uma pequena parcela do concreto da seção é realmente utilizada. A principal característica da seção que influencia na flecha final é a inércia à flexão. Nas lajes maciças e lajes nervuradas o acréscimo na altura da seção, visando o aumento da inércia à flexão, acarreta no incremento do peso próprio. Em comparação com as lajes nervuradas, o peso próprio das lajes maciças foi maior para todos os casos de lajes analisadas. Isso se deve ao fato de que parte do concreto tracionado na seção das lajes nervuradas é substituído por material de enchimento.

A vantagem das lajes nervuradas está em se ter uma maior altura da seção, e consequentemente a maior inércia à flexão, através da alteração da geometria do material de enchimento. Para menores vãos ou carregamentos menores é possível usar enchimentos com alturas menores e para maiores vãos ou grandes carregamentos utilizar enchimentos mais altos sem um grande acréscimo de peso de concreto.

A análise da deformabilidade dos apoios mostrou que principalmente para vãos maiores a consideração da deformação dos apoios é de grande importância. A análise onde se alterou a seção das vigas de apoio demonstra a importância da análise das estruturas de maneira unificada. Comparando-se os resultados das flechas totais utilizando as tabelas de bares e analogia de grelha é possível dizer que para atender ao ELS é necessário considerar não só a laje em questão, mas também seus apoios.

Do ponto de vista estrutural as lajes nervuradas obtém vantagem frente às lajes maciças devido ao menor carregamento transmitido ao resto da estrutura, visto o seu menor peso próprio. Essa diferença de carregamento pode significar uma economia financeira, visto que as seções de vigas e pilares podem diminuir. Entretanto, não foi analisada a diferença de custos de construção das lajes nervuradas e maciças. Sabe-se que lajes maciças são de fácil execução e não necessitam de mão de obra especializada. As lajes nervuradas demandam uma mão de obra mais especializada e também possuem custos adicionais de fôrmas e escoramento.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6120: **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980, p.5.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2014, p.238.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7480: **Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – especificação**. Rio de Janeiro, 2007. 13 p.

BRANSON, D.E. (1966). **Deflections of reinforced concrete flexural members**. Journal of the American Concrete Institute, n.6331, p.637-667.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 4. ed. São Carlos: Edufscar, 2014, p.415.

CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: volume 2**. São Paulo: Pini, 2009, p.585.

COELHO, J. D. **Confiabilidade de vigas de concreto armado no estado limite de serviço**. 2011. 272 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

DUARTE, H. **Aspectos da análise estrutural das lajes de edifícios de concreto armado**. 1998. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

EBERICK. Sistema para projetos em edificações em concreto armado – Manual do usuário, Versão V10, Florianópolis, 2016.

FRANCA, A.B.M.; FUSCO, P.B. **As lajes nervuradas na moderna construção de edifícios**. São Paulo, AFALA & ABRAPEX, 1997.

GUARDA, M.C.C. **Cálculo de deslocamentos em pavimentos de edifícios de concreto armado**. 2005. 253p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

KUPERMAN, S. C. **Considerações sobre fluência de concretos**. 2007. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/125/artigo285694-2.aspx>>. Acesso em: 03 set. 2016.

MAGNANI, R. **Cálculo e desenho de concreto armado**. Araraquara: Roberto Magnani, 1999, p.205.

MOURA, M. W.; MARCELLINO, N. A. **Avaliação da deformação em lajes bidirecionais de concreto armado**. Disponível em:

<<http://repositorio.furg.br/handle/1/6338>>. Acesso em: 03 jul. 2016.

PARK, R.; GAMBLE, W. L.. **Reinforced Concrete slabs**. 2. ed. Denver: John Wiley And Sons, Inc, 2000, p.716.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. 2010. Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PINTO, R.S.; RAMALHO, M.A.; CORRÊA, M.R.S. (1998). **Consideração simplificada da não-linearidade física no projeto de edifícios de concreto armado**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40., Rio de Janeiro. Anais.

PUEL, A. **Diferença de flechas entre lajes de um pavimento simétrico**. 2010. Disponível em: <<http://faq.altoqi.com.br/content/274/668/pt-br/diferença-de-flechas-entre-lajes-de-um-pavimento-simetrico.html>>. Acesso em: 13 maio 2016.

SILVA, M. A. F. **Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado**. 2005. 239 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

SILVA, R M. **Análise não-linear de pórticos planos de concreto armado: modelagem numérica e avaliação dos métodos aproximados**. 1991. 1 v. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

TIMOSHENKO, S.P; WOINOWSKY-KRIEGER,S. **Theory of plates and shells**. McGraw-Hell Kogakusha, Ltda, 1959.

ANEXOS

ANEXO 01 - TABELA DE BARES

Tabela 36 - Coeficiente α para o cálculo de flechas elásticas

λ	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9
1,00	4,67	3,20	3,20	2,42	2,21	2,21	1,81	1,81	1,46
1,05	5,17	3,61	3,42	2,67	2,55	2,31	2,04	1,92	1,60
1,10	5,64	4,04	3,63	2,91	2,92	2,41	2,27	2,04	1,74
1,15	6,09	4,47	3,82	3,12	3,29	2,48	2,49	2,14	1,87
1,20	6,52	4,91	4,02	3,34	3,67	2,56	2,72	2,24	1,98
1,25	6,95	5,34	4,18	3,55	4,07	2,63	2,95	2,33	2,10
1,30	7,36	5,77	4,35	3,73	4,48	2,69	3,16	2,42	2,20
1,35	7,76	6,21	4,50	3,92	4,92	2,72	3,36	2,48	2,30
1,40	8,14	6,62	4,65	4,08	5,31	2,75	3,56	2,56	2,37
1,45	8,51	7,02	4,78	4,23	5,73	2,80	3,73	2,62	2,45
1,50	8,87	7,41	4,92	4,38	6,14	2,84	3,91	2,68	2,51
1,55	9,22	7,81	5,00	4,53	6,54	2,86	4,07	2,53	2,57
1,60	9,54	8,17	5,09	4,65	6,93	8,87	4,22	2,87	2,63
1,65	9,86	8,52	5,13	4,77	7,33	2,87	4,37	2,78	2,68
1,70	10,15	8,87	5,17	4,88	7,70	2,88	4,51	2,79	2,72
1,75	10,43	9,19	5,26	4,97	8,06	2,88	4,63	2,81	2,76
1,80	10,71	9,52	5,36	5,07	8,43	2,89	4,75	2,83	2,80
1,85	10,96	9,82	5,43	5,16	8,77	2,89	4,87	2,85	2,83
1,90	11,21	10,11	5,50	5,23	9,08	2,90	4,98	2,87	2,85
1,95	11,44	10,39	5,58	5,31	9,41	2,90	5,08	2,89	2,88
2,00	11,68	10,68	5,66	5,39	9,72	2,91	5,19	2,91	2,91
∞	15,35	15,35	6,38	6,38	15,35	3,07	6,38	3,07	3,07

Fonte: Carvalho e Figueiredo, 2014.

Tabela 37 – Coeficiente λ para o cálculo de momentos máximos em lajes retangulares

λ	Caso 1		Caso 2			Caso 3		
1,00	4,41	4,41	3,07	3,66	8,40	3,94	8,52	2,91
1,05	4,80	4,45	3,42	3,78	8,19	4,19	8,51	2,84
1,10	5,18	4,49	3,77	3,90	9,18	4,43	9,30	2,76
1,15	5,56	4,49	4,14	3,97	9,53	4,64	9,63	2,68
1,20	5,90	4,48	4,51	4,05	9,88	4,85	9,95	2,59
125	6,27	4,45	4,88	4,10	10,16	5,03	10,22	2,51
1,30	6,60	4,42	5,25	4,15	10,41	5,20	10,48	2,42
1,35	6,93	4,37	5,60	4,18	10,64	5,36	10,71	2,34
1,40	7,25	4,33	5,95	4,21	10,86	5,51	10,92	2,25
1,45	7,55	4,30	6,27	4,19	11,05	5,64	11,10	2,19
1,50	7,86	4,25	6,60	4,18	11,23	5,77	11,27	2,12
1,55	8,12	4,20	6,90	4,17	11,39	5,87	11,42	2,04
160	8,34	3,14	7,21	4,14	11,55	5,98	11,55	1,95
1,65	8,62	4,07	7,42	4,12	11,67	6,07	11,97	1,87
1,70	8,86	4,00	7,62	4,09	11,79	6,16	11,80	1,79
1,75	9,06	3,96	7,66	4,05	11,88	6,24	11,92	1,74
1,80	9,27	3,91	7,69	3,99	11,96	6,31	12,04	1,38
1,85	9,45	3,83	8,22	3,97	12,03	6,38	12,14	1,34
1,90	9,63	3,75	8,74	3,94	12,14	6,43	12,24	1,59
1,95	9,77	3,71	8,97	3,88	12,17	6,47	12,29	1,54
2,00	10,00	3,64	9,18	3,80	12,20	6,51	12,34	1,48
∞	12,57	3,77	9,18	3,80	12,20	7,61	12,76	1,48

Fonte: Carvalho e Figueiredo, 2014.