

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

UNESP – Bauru/SP

Departamento de Engenharia Civil

2117 - ESTRUTURAS DE CONCRETO I

LAJES DE CONCRETO ARMADO

Prof. Dr. PAULO SÉRGIO BASTOS

(wwwp.feb.unesp.br/pbastos)

Bauru/SP
Fevereiro/2021

APRESENTAÇÃO

Este texto tem o objetivo de servir como notas de aula na disciplina 2117 – Estruturas de Concreto I, do curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia, da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Bauru/SP.

O texto apresentado está conforme as novas prescrições contidas na NBR 6118/2014 (“*Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*”) para o projeto e dimensionamento das lajes de Concreto Armado.

O texto apresenta o estudo das lajes maciças, das lajes nervuradas e lajes pré-fabricadas. Os esforços nas lajes maciças são determinados pela Teoria das Placas.

O autor agradece ao técnico Éderson dos Santos Martins pela confecção dos desenhos.

Críticas e sugestões serão bem-vindas.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. DEFINIÇÃO	1
3. LAJE MACIÇA.....	1
3.1 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À DIREÇÃO.....	1
3.2 VÃO EFETIVO.....	2
3.3 VINCULAÇÃO NAS BORDAS.....	3
3.4 AÇÕES A CONSIDERAR.....	6
3.4.1 Peso Próprio	6
3.4.2 Contrapiso	7
3.4.3 Revestimento Inferior da Laje.....	7
3.4.4 Piso.....	7
3.4.5 Parede.....	7
3.4.5.1 Laje Armada em Duas Direções.....	9
3.4.5.2 Laje Armada em Uma Direção.....	9
3.4.6 Ações Variáveis	10
3.5 ESPESSURA MÍNIMA.....	10
3.6 COBRIMENTO MÍNIMO	11
3.7 ESTIMATIVA DA ALTURA DA LAJE.....	13
3.8 MOMENTOS FLETORES SOLICITANTES.....	13
3.8.1 Laje Armada em Uma Direção	14
3.8.2 Laje Armada em Duas Direções	16
3.8.3 Compatibilização dos Momentos Fletores	17
3.8.4 Momentos Volventes	18
3.9 REAÇÕES DE APOIO.....	19
3.10 FLECHA.....	20
3.10.1 Verificação do Estádio	21
3.10.2 Flecha Imediata	22
3.10.3 Flecha Diferida no Tempo	23
3.10.4 Flechas Máximas Admitidas	24
3.10.5 Flecha Imediata	26
3.10.5.1 Laje Armada em Duas Direções.....	26
3.10.5.2 Laje Armada em Uma Direção.....	26
3.11 DIMENSIONAMENTO.....	26
3.11.1 Flexão.....	28
3.11.2 Força Cortante.....	29
3.11.2.1 Lajes sem Armadura para Força Cortante	29
3.11.2.2 Lajes com Armadura para Força Cortante.....	30
3.12 DETALHAMENTO DAS ARMADURAS.....	30
3.12.1 Armaduras Longitudinais Máximas e Mínimas	30
3.12.2 Diâmetro Máximo	31
3.12.3 Espaçamentos Máximo e Mínimo.....	31
3.12.4 Bordas Livres e Aberturas.....	32
3.12.5 Comprimento da Armadura Negativa nos Apoios com Continuidade de Lajes	33
3.12.6 Comprimento da Armadura Positiva.....	34
3.12.7 Armaduras Complementares	35
3.15 TABELAS DAS ARMADURAS.....	36
3.16.1 Pré-dimensionamento da Altura da Laje.....	36

3.16.2 Cálculo das Ações	37
3.16.3 Verificação das Flechas.....	37
3.16.4 Reações nas Vigas.....	37
3.16.5 Momentos Fletores e Dimensionamento.....	37
3.17 LAJE MACIÇA RETANGULAR COM UMA BORDA LIVRE.....	38
3.17.1 Detalhamento das Armaduras	39
3.17.1.1 Lajes com Três Bordas Apoiadas	39
3.17.1.2 Lajes com Três Bordas Engastadas	40
3.17.2 Exemplo Numérico de Aplicação	41
3.18 EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DE LAJES MACIÇAS DE UMA EDIFICAÇÃO	43
3.18.1 Vãos Efetivos e Vinculação nas Bordas.....	45
3.18.2 Pré-Dimensionamento da Altura das Lajes	45
3.18.3 Cálculo das Ações Atuantes.....	47
3.18.4 Reações de Apoio nas Vigas de Borda	49
3.18.5 Momentos Fletores e Dimensionamento das Armaduras Longitudinais de Flexão.....	51
3.18.6 Verificação de Flechas	55
3.18.6.1 Flecha na Laje L2	55
3.18.6.2 Flecha na Laje L1	57
3.18.6.3 Flecha na Laje L4	59
3.18.7 Verificação da Força Cortante	60
3.18.8 Detalhamentos das Armaduras Longitudinais de Flexão	61
4. LAJES NERVURADAS	64
4.1. DEFINIÇÃO	64
4.2. TIPOS	66
4.3. CÁLCULO SIMPLIFICADO.....	67
4.4 AÇÕES	69
4.5 MOMENTOS FLETORES NOS APOIOS INTERMEDIÁRIOS.....	70
4.6 DIMENSIONAMENTO.....	70
4.6.1 Flexão nas Nervuras.....	71
4.6.2 Força Cortante.....	71
4.7 EXEMPLO	71
4.7.1 Laje em Cruz (nervuras nas duas direções), $l_{cc} < 65$ cm.....	71
5. LAJES PRÉ-FABRICADAS	75
5.1 DEFINIÇÕES	75
5.2 LAJE TRELIÇA	76
5.2.1 Nervura Transversal	78
5.2.2 Armadura Complementar.....	79
5.2.3 Armadura de Distribuição.....	79
5.2.4 Parede Sobre Laje	79
5.2.5 Escolha da Laje	80
6. REFERÊNCIAS.....	81

1. INTRODUÇÃO

Neste texto serão estudadas as lajes denominadas usualmente como **maciças**, e as lajes **nervuradas**, moldadas no local ou com partes pré-fabricadas.¹

As lajes maciças de forma retangular, apoiadas sobre as quatro bordas, são as lajes mais comuns nas estruturas correntes de Concreto Armado. As lajes com uma e com duas bordas livres, menos comuns na prática, serão também estudadas.

O processo de cálculo das lajes maciças apresentado é aquele que foi desenvolvido no século passado, onde os esforços solicitantes atuantes e as flechas são determinados segundo a **Teoria das Placas**, desenvolvida com base na **Teoria da Elasticidade**. O cálculo é feito com auxílio de tabelas e pode ser desenvolvido manualmente, sem auxílio de programas computacionais. Tem o aval da NBR 6118/2014² e aplicação segura, demonstrada por milhares de edificações já executadas.

2. DEFINIÇÃO

As lajes são classificadas como elementos de superfície, planos e bidimensionais, que são aqueles onde duas dimensões (comprimento e largura) são da mesma ordem de grandeza e muito maiores que a terceira dimensão, a espessura. As lajes são também chamadas **placas**.

Destinam-se a receber a maioria das cargas aplicadas em uma edificação, normalmente de pessoas, móveis, máquinas e equipamentos, paredes, veículos, e os mais variados tipos de cargas que podem existir em função da finalidade arquitetônica do espaço que a laje faz parte. As cargas são comumente perpendiculares ao plano da laje, e podem ser divididas em distribuídas na área, distribuídas linearmente ou forças concentradas. Embora menos comuns, também podem ocorrer ações externas na forma de momentos fletores, normalmente aplicados nas bordas das lajes. As cargas são geralmente transmitidas para as vigas de apoio nas bordas da laje, mas eventualmente também podem ser transmitidas diretamente aos pilares, quando são chamadas lajes lisas, com ou sem capitel.

3. LAJE MACIÇA

Laje maciça é aquela onde toda a espessura é composta por concreto, contendo armaduras longitudinais de flexão e eventualmente armaduras transversais, e apoiada em vigas ou paredes ao longo das bordas. Lajes com uma ou mais bordas livres são casos particulares de lajes maciças. As lajes podem ser de Concreto Armado ou de Concreto Protendido, e neste texto são apresentadas apenas as lajes maciças retangulares de Concreto Armado.

A laje **lisa** e a laje **cogumelo** são também lajes maciças de concreto, porém, nessas lajes as cargas e outras ações são transferidas diretamente aos pilares, sem intermédio de apoios nas bordas. Por uma questão de tradição no Brasil é costume chamar a laje apoiada nas bordas como **laje maciça**.

Nas pontes e edifícios de múltiplos pavimentos e em edificações de grande porte, as lajes maciças são as mais comuns entre os diferentes tipos de laje existentes.

As lajes maciças de concreto, com espessuras que normalmente variam de 8 a 15 cm, são projetadas para os mais variados tipos de edificações, como edifícios de múltiplos pavimentos (residenciais, comerciais, etc.), muros de arrimo, escadas, reservatórios, edificações de grande porte, como escolas, indústrias, hospitais, pontes e viadutos, etc. De modo geral, não são aplicadas em edificações residenciais e outras de pequeno porte, pois nesses tipos de edificação as lajes nervuradas pré-fabricadas apresentam vantagens nos aspectos custo e facilidade de construção.

3.1 CLASSIFICAÇÃO QUANTO À DIREÇÃO

As lajes maciças podem ser classificadas segundo diferentes critérios, como em relação à forma geométrica, dos tipos de vínculos nos apoios, quanto à direção, etc.

As formas geométricas podem ter as mais variadas formas possíveis, porém, a forma retangular é a grande maioria dos casos da prática. Hoje em dia, com os avançados programas computacionais existentes, as lajes podem ser facilmente calculadas e dimensionadas, segundo quaisquer formas geométricas e carregamentos que tiverem.

Uma classificação muito importante das lajes maciças é aquela referente à direção ou direções da armadura principal. Existem dois casos: laje armada em uma direção ou laje armada em duas direções.

¹ As lajes pré-fabricadas são também chamadas lajes mistas.

² ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*, NBR 6118. ABNT, 2014, 238p.

a) Laje armada em uma direção

As lajes armadas em uma direção tem relação entre o lado maior e o lado menor superior a dois, isto é:

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

l_x = vão menor (Figura 1);

l_y = vão maior.

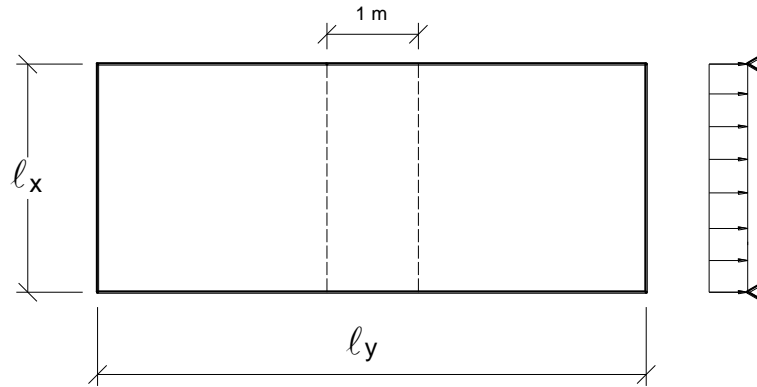


Figura 1 – Vãos da laje retangular armada em uma direção.

Os esforços solicitantes de maior magnitude ocorrem segundo a direção do menor vão, chamada direção principal. Na outra direção, chamada secundária, os esforços solicitantes são muito menores, e por isso são comumente desprezados nos cálculos. Os esforços solicitantes e as flechas são calculados supondo-se a laje como uma viga com largura de 1 m, segundo a direção principal da laje.

b) Laje armada em duas direções (em cruz)

Nas lajes armadas em duas direções os esforços solicitantes são importantes segundo as duas direções principais da laje. A relação entre os lados é menor que dois, tal que:

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

l_x = lado menor (Figura 2);

l_y = lado maior.

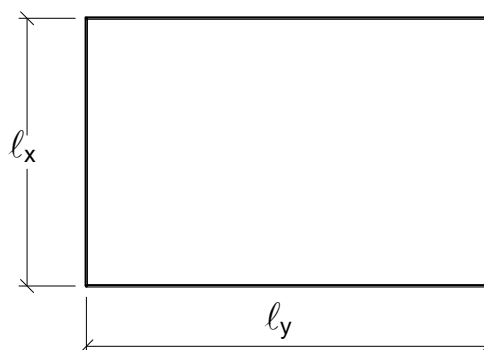


Figura 2 – Vãos da laje retangular armada em duas direções.

3.2 VÃO EFETIVO

Os vãos efetivos das lajes nas direções principais (NBR 6118, item 14.6.2.4), considerando que os apoios são suficientemente rígidos na direção vertical, devem ser calculados pela expressão:

$$\ell_{ef} = \ell_0 + a_1 + a_2 \quad \text{Eq. 3}$$

com:

$$a_1 \leq \begin{cases} t_1/2 \\ 0,3 h \end{cases} \quad \text{e} \quad a_2 \leq \begin{cases} t_2/2 \\ 0,3 h \end{cases} \quad \text{Eq. 4}$$

As dimensões ℓ_0 , t_1 , t_2 e h estão indicadas na Figura 3.

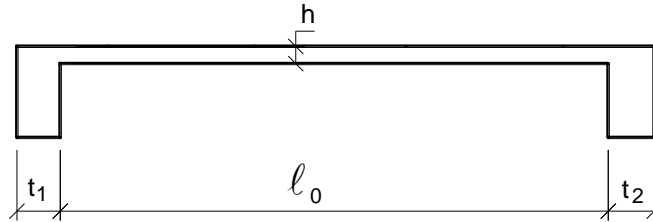


Figura 3 – Dimensões consideradas no cálculo do vão efetivo das lajes.

3.3 VINCULAÇÃO NAS BORDAS

De modo geral são três os tipos de apoio das lajes: paredes (de alvenaria ou de concreto), vigas e pilares de concreto. Dentre eles, as vigas de borda formam o tipo de apoio mais comum nas lajes das edificações.

Para o cálculo dos esforços solicitantes e das deformações nas lajes torna-se necessário estabelecer os vínculos da laje com os apoios, sejam eles pontuais como os pilares, ou lineares como as vigas de borda. Devido à complexidade do problema devem ser feitas algumas simplificações, de modo a possibilitar o cálculo manual.

Os três tipos comuns de vínculo das lajes são o **apoio simples**, o **engaste perfeito** e o **engaste elástico**. Como as tabelas usuais para cálculo das lajes só admitem apoios simples, engaste perfeito e apoios pontuais, a vinculação nas bordas deve se resumir apenas a esses três tipos. Com a utilização de programas computacionais é possível admitir também o engaste elástico.

A idealização teórica de apoio simples ou engaste perfeito, nas lajes correntes das estruturas, raramente ocorre na realidade. No entanto, segundo Cunha e Souza (1994), o erro cometido é pequeno, não superando os 10 %.

a) bordas simplesmente apoiadas

O apoio simples surge nas bordas onde não existe ou não se admite a continuidade da laje com outras lajes vizinhas. O apoio pode ser uma parede de alvenaria ou uma viga de concreto.

No caso de vigas de concreto de dimensões correntes, a rigidez da viga à torção é pequena, de modo que a viga gira e deforma-se, acompanhando as pequenas rotações da laje, o que acaba garantindo a concepção teórica do apoio simples (Figura 4).

Cuidado especial há de se tomar na ligação de lajes com vigas de alta rigidez à torção. Pode ser mais adequado engastar perfeitamente a laje na viga, dispondo-se uma armadura, geralmente negativa, na ligação com a viga. Os esforços de torção daí decorrentes devem ser obrigatoriamente considerados no projeto da viga de borda.

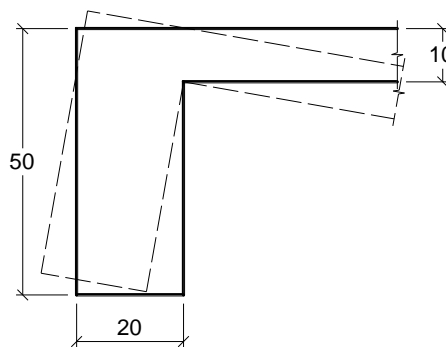


Figura 4 – Viga de borda como apoio simples para a laje.

b) engaste perfeito

O engaste perfeito surge no caso de lajes em balanço, como marquises, varandas, etc. (Figura 5). É considerado também nas bordas onde há continuidade entre duas lajes vizinhas.

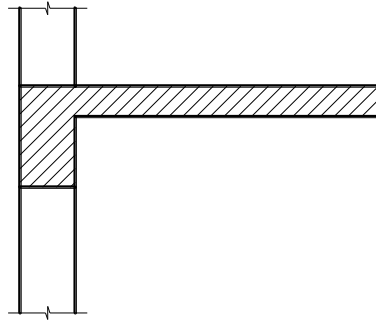


Figura 5 – Laje em balanço engastada na viga de apoio.

Quando duas lajes contínuas têm espessuras muito diferentes, como mostrado na Figura 6, pode ser mais adequado considerar a laje de menor espessura (L2) engastada na de maior espessura (L1), mas a laje com maior espessura pode ser considerada apenas apoiada na borda comum as duas lajes.

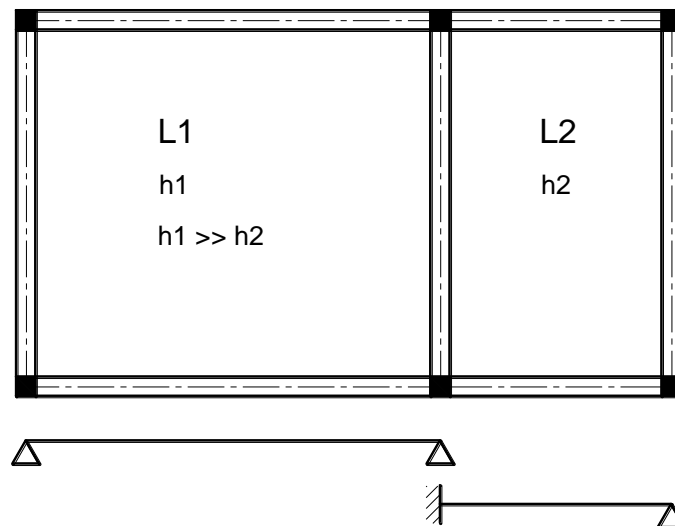


Figura 6 – Lajes adjacentes com espessuras muito diferentes.

No caso onde as lajes não têm continuidade ao longo de toda a borda comum, o critério simplificado para se considerar a vinculação é o seguinte (Figura 7):

se $a \geq \frac{2}{3} L$ → a laje L1 pode ser considerada com a borda engastada na laje L2;

se $a < \frac{2}{3} L$ → a laje L1 fica com a borda simplesmente apoiada (apoio simples).

Eq. 5

Em qualquer dos casos, a laje L2 tem a borda engastada na laje L1.

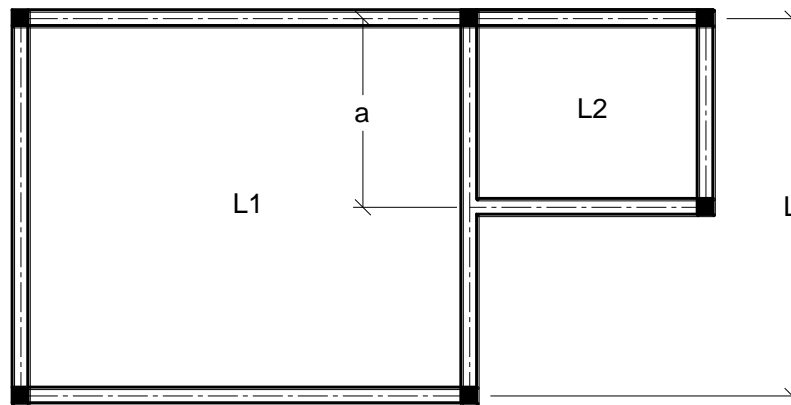


Figura 7 – Lajes parcialmente contínuas.

c) engaste elástico

No caso de apoios intermediários de lajes contínuas surgem momentos fletores negativos devido à continuidade das lajes. A ponderação feita entre os diferentes valores dos momentos fletores que surgem nesses apoios conduz ao engastamento elástico (Figura 8). No entanto, para efeito de cálculo inicial dos momentos fletores M_{L1} e M_{L2} , as lajes que apresentam continuidade devem ser consideradas perfeitamente engastadas nos apoios intermediários.

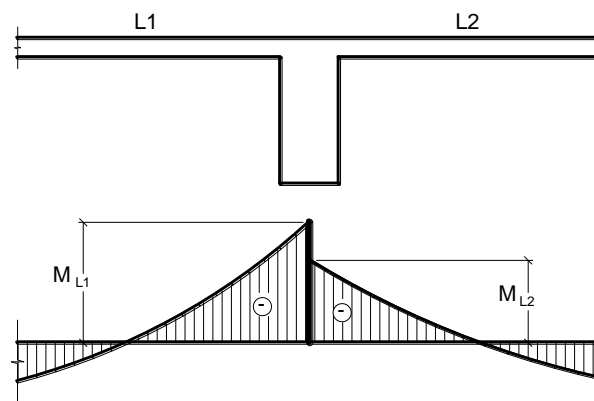


Figura 8 – Engastamento elástico na continuidade das lajes decorrente dos momentos fletores negativos diferentes.

Conforme as tabelas de BARÉS que serão utilizadas neste texto (ver tabelas nos anexos) para cálculo das lajes maciças retangulares, a convenção de vinculação é feita com diferentes estilos de linhas, como mostrado na Figura 9.

	engaste perfeito
	apoio simples
	livre

Figura 9 – Convenção de estilo de linha para os vínculos engaste perfeito, apoio simples e borda livre.

Em função das várias combinações possíveis de vínculos nas quatro bordas das lajes retangulares, as lajes recebem uma numeração, de modo a diferenciar as combinações de vínculos. A numeração mostrada na Figura 10 é a sugerida nas tabelas de Barés.³

³ Em tabelas de cálculo de lajes de outros autores a numeração pode ser diferente da indicada por Barés.

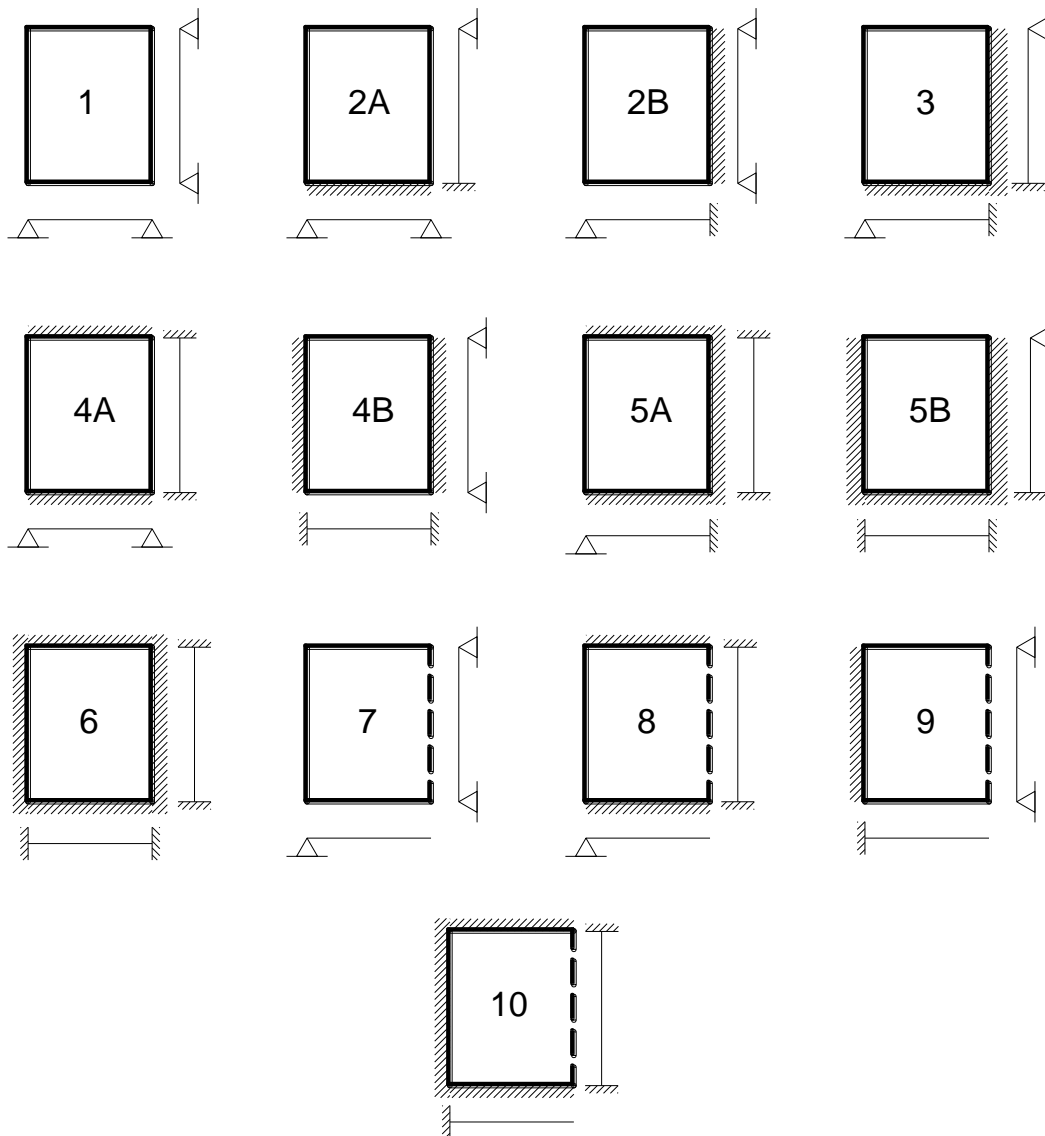


Figura 10 – Numeração das lajes em função dos vínculos nas bordas, de acordo com as tabelas de Barés.

3.4 AÇÕES A CONSIDERAR

As ações ou carregamentos a se considerar atuando nas lajes são os mais variados, desde pessoas até móveis, equipamentos fixos ou móveis, paredes, divisórias, água, solo, etc. As lajes recebem as cargas de utilização e as transmitem para os apoios, geralmente vigas nas bordas. Nos edifícios as lajes ainda atuam como diafragma rígido (elemento de rigidez infinita no seu próprio plano), distribuindo as forças horizontais do vento para os elementos da estrutura de contraventamento (pórticos, paredes, núcleos de rigidez, etc.), responsáveis por proporcionar a necessária Estabilidade Global aos edifícios.

Para determinação das ações atuantes nas lajes deve-se recorrer às normas, sendo as principais a NBR 6118, a NBR 8681 e a NBR 6120, e devem ser cuidadosamente avaliadas. No caso de cargas específicas não abordadas por normas brasileiras, pode-se recorrer a normas estrangeiras, à bibliografia especializada, consulta aos fabricantes de equipamentos mecânicos e máquinas, etc.

Nas lajes de edificações correntes geralmente as ações principais a serem consideradas são as ações permanentes (g) e as cargas variáveis (q).⁴ As principais ações permanentes diretas que devem ser determinadas são as seguintes.

3.4.1 Peso Próprio

O peso próprio da laje maciça é função da altura h e do peso específico (γ_{conc}) do Concreto Armado, igual a 25 kN/m^3 conforme a NBR 6118. O peso próprio de laje com altura constante é uniformemente distribuído na área da laje, e para um metro quadrado de área pode ser calculado como (Figura 11):

⁴ As cargas variáveis (q) eram chamadas “cargas acidentais” na versão de 1980 da NBR 6120.

$$g_{pp} = \gamma_{conc} \cdot h = 25 \cdot h \quad \text{Eq. 6}$$

g_{pp} = peso próprio da laje (kN/m^2);
 h = altura da laje (m).

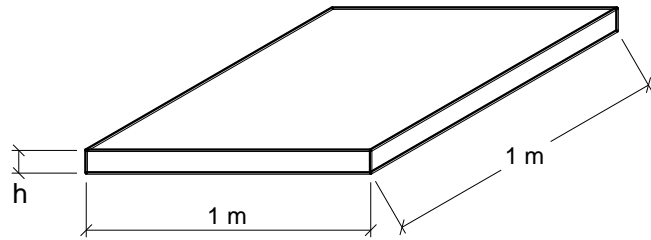


Figura 11 – Peso próprio calculado para 1 m^2 de laje.

3.4.2 Contrapiso

A camada de argamassa colocada logo acima do concreto da superfície superior das lajes recebe o nome de contrapiso ou argamassa de regularização. A sua função é de nivelar e diminuir a rugosidade da laje, preparando-a para receber o revestimento de piso final.

A espessura do contrapiso deve ser cuidadosamente avaliada. Recomenda-se adotar espessura não inferior a 3 cm. A argamassa do contrapiso tem comumente o traço 1:3 (em volume), sendo considerado o peso específico (γ_{contr}) de 21 kN/m^3 , conforme a NBR 6120 (Tabela 1 do item 5.3). A carga permanente do contrapiso é função da espessura (e) do contrapiso:

$$g_{contr} = \gamma_{contr} \cdot e = 21 \cdot e \quad \text{Eq. 7}$$

g_{contr} = carga permanente do contrapiso (kN/m^2);
 e = espessura do contrapiso (m).

3.4.3 Revestimento Inferior da Laje

Na superfície inferior das lajes é padrão executar uma camada de revestimento de argamassa, sobreposta à camada fina de chapisco. Para essa argamassa, menos rica em cimento, pode-se considerar o peso específico (γ_{rev}) de 19 kN/m^3 , conforme a NBR 6120 (Tabela 1 do item 5.3). De modo geral, este revestimento tem pequena espessura, mas recomenda-se adotar espessura não inferior a 1,5 ou 2 cm. A carga permanente desse revestimento é:

$$g_{rev.inf} = \gamma_{rev} \cdot e = 19 \cdot e \quad \text{Eq. 8}$$

$g_{rev.inf}$ = carga permanente do revestimento inferior (kN/m^2);
 e = espessura do revestimento (m).

3.4.4 Piso

O piso é o revestimento final na superfície superior da laje, assentado sobre a argamassa de regularização. Para a sua correta quantificação é necessário definir o tipo ou material do qual o piso é composto, o que normalmente é feito com auxílio do projeto arquitetônico, que define o tipo de piso de cada ambiente da edificação. Os pisos mais comuns são os de madeira, de cerâmica, carpetes ou forrações, e de rochas, como granito e mármore.

A Tabela 1 da NBR 6120 fornece os pesos específicos de diversos materiais, valores estes que auxiliam no cálculo da carga de piso por metro quadrado de área de laje.

3.4.5 Parede

O modo de calcular a carga de parede sobre laje maciça depende do peso da parede e de se a laje é armada em uma ou em duas direções. Para determinar o peso da parede é necessário conhecer o tipo da unidade de alvenaria que compõe a parede (tijolo, bloco, etc.), o tipo e espessura do revestimento nas faces (argamassa, gesso, etc.) e a largura e altura da parede. A NBR 6120 auxilia no cálculo do peso da parede, pois em sua Tabela 2 (item 5.4) fornece o peso específico de paredes de alvenaria estrutural e de vedação com alguns tipos de unidade (como bloco de concreto e bloco ou tijolo cerâmico) e em função da espessura do revestimento das faces.

No caso particular de parede de vedação com bloco cerâmico vazado com furos horizontais, e quando o peso específico da alvenaria (γ_{alv} , Tabela 1) é dado em kN/m^3 , o peso da parede é:

$$P_{\text{par}} = \gamma_{\text{alv}} \cdot h \cdot \ell$$

Eq. 9

P_{par} = peso da parede (kN);

h = altura da parede (m);

ℓ = comprimento da parede (m).

Tabela 1 – Peso específico de alvenaria de vedação com blocos cerâmicos vazados com furos horizontais. (parte da Tabela 2 da NBR 6120).⁵

Alvenaria de Vedação	Espessura nominal do elemento (cm)	Peso específico (kN/m ³)		
		Espessura de revestimento por face (cm)		
		0	1	2
Bloco cerâmico vazado com furo horizontal (NBR 15270-1)	9	0,7	1,1	1,6
	11,5	0,9	1,3	1,7
	14	1,1	1,5	1,9
	19	1,4	1,8	2,3

Nota: na composição de pesos de alvenarias foi considerado o seguinte:

- argamassa de assentamento vertical e horizontal de cal, cimento e areia com 1 cm de espessura e peso específico de 19 kN/m³;
- revestimento com peso específico médio de 19 kN/m³;
- proporção de um meio bloco para cada três blocos inteiros;
- sem preenchimento de vazios (com graute etc.).

Existe também a possibilidade de fazer o cálculo do peso da parede considerando-se os pesos específicos aparentes dos componentes individuais (blocos e argamassas de assentamento e de revestimento), e conhecendo-se a geometria da parede (largura dos blocos, espessura das juntas de assentamento e espessura dos revestimentos das faces). No item 5.3 a NBR 6120 fornece em sua Tabela 1 o peso específico aparente (γ_{ap}) de diversos materiais de construção (ver Tabela 2).

Tabela 2 – Peso específico aparente de materiais de construção (parte da Tabela 1 da NBR 6120).⁶

Material		Peso específico aparente γ_{ap} (kN/m ³)
Blocos artificiais e pisos	Blocos de concreto vazados (função estrutural, classes A e B, NBR 6136)	14
	Blocos cerâmicos vazados com paredes vazadas (função estrutural, NBR 15270-1)	12
	Blocos cerâmicos vazados com paredes maciças (função estrutural, NBR 15270-1)	14
	Blocos cerâmicos maciços	18
	Blocos de concreto celular autoclavado (Classe C25 - NBR 13438)	5,5
	Blocos de vidro	9
	Blocos sílico-calcários	20
	Lajotas cerâmicas	18
	Porcelanato	23
	Terracota	21
Argamassas e concretos ¹⁾	Argamassa de cal, cimento e areia	19
	Argamassa de cal	12 a 18 (15) ²⁾
	Argamassa de cimento e areia	19 a 23 (21) ²⁾
	Argamassa de gesso	12 a 18 (15) ²⁾
	Argamassa autonivelante	24
	Concreto simples	24
	Concreto armado	25

1) os pesos específicos de argamassas e concretos são válidos para o estado endurecido.

2) Para os valores indicados por uma faixa de variação, na falta de determinação experimental mais rigorosa, pode-se considerar o valor médio (entre parênteses).

⁵ Na Tabela 2 da NBR 6120 constam também os pesos específicos de alvenarias estrutural e de vedação com outros tipos de blocos.

⁶ Na Tabela 1 da NBR 6120 constam os pesos específicos aparentes de diversos outros materiais de construção, como madeiras, metais, rochas naturais, etc.

Devido à ausência de pesos específicos como aqueles apresentados na Tabela 1, durante as décadas passadas foi comum calcular o peso da parede apenas com o peso específico aparente (γ_{ap}) dado pela versão de 1980 da NBR 6120, de 13 kN/m^3 para blocos cerâmicos com furos horizontais, sendo o peso da parede calculado como:

$$P_{par} = \gamma_{ap} \cdot h \cdot \ell \cdot e \quad \text{Eq. 10}$$

P_{par} = peso da parede (kN);⁷

h = altura da parede (m);

ℓ = comprimento da parede (m);

e = espessura total (final) da parede (m).

Por exemplo, aplicando a Eq. 10 para uma parede com bloco cerâmico com furos horizontais com espessura de 9 cm e argamassa de revestimento com 2 cm nas duas faces, o peso de 1 m^2 da parede é:

$$P_{par} = \gamma_{ap} \cdot h \cdot \ell \cdot e = 13 (0,09 + 0,04) = 1,69 \text{ kN/m}^2$$

Este valor é muito próximo ao valor dado pela NBR 6120 ($1,60 \text{ kN/m}^2$, apresentado na Tabela 1). No entanto, a mesma aproximação não ocorre para as demais espessuras do bloco (11,5, 14 e 19 cm).

3.4.5.1 Laje Armada em Duas Direções

Para as lajes armadas em **duas direções** considera-se simplificada a carga (peso) total das paredes uniformemente distribuída na área da laje, de forma que a carga na laje é o peso total das paredes (P_{par}) dividido pela área da laje:

$$g_{par} = \frac{P_{par}}{A_{laje}} = \frac{P_{par}}{\ell_x \cdot \ell_y} \quad \text{Eq. 11}$$

3.4.5.2 Laje Armada em Uma Direção

Para laje armada em uma direção há dois casos a serem analisados, em função da disposição da parede sobre a laje. Para o caso de **parede com direção paralela à direção principal da laje** (direção do menor vão), considera-se simplificada a carga da parede distribuída uniformemente em uma área da laje adjacente à parede, com largura de $2/3 \ell_x$, como mostrado na Figura 12.

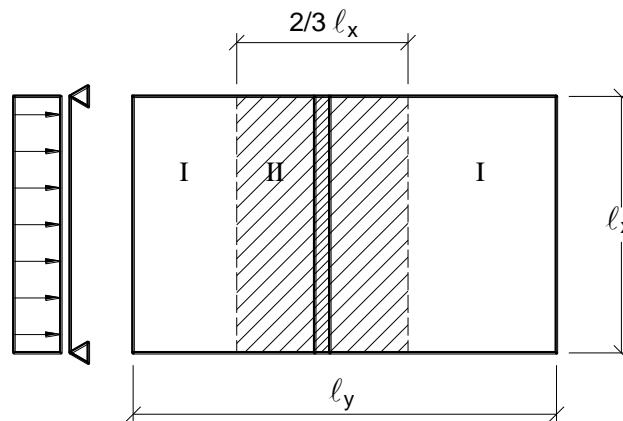


Figura 12 – Parede paralela à direção principal da laje armada em uma direção.

A laje fica com duas regiões com carregamentos diferentes. Nas regiões I não ocorre a carga da parede, que fica limitada apenas à região II. Portanto, dois cálculos de esforços solicitantes necessitam ser feitos, para as regiões I e II. A carga uniformemente distribuída devida à parede, na faixa $2/3 \ell_x$ é:

$$g_{par} = \frac{P_{par}}{(2/3 \ell_x) \ell_x} = \frac{3 P_{par}}{2 \ell_x^2} \quad \text{Eq. 12}$$

⁷ O cálculo é simplificado porque considera no peso da parede apenas o peso específico aparente do bloco (13 kN/m^3), e não considera o maior peso específico das argamassas de assentamento e de revestimento das faces, de 19 kN/m^3 .

g_{par} = carga uniforme da parede na laje (kN/m^2);

P_{par} = peso da parede (kN);

ℓ_x = menor vão da laje (m).

No caso de **parede com direção perpendicular à direção principal**, a carga da parede deve ser considerada como uma força concentrada (P) na viga que representa a laje (Figura 13), sendo P o peso da parede relativo a 1 m de comprimento.

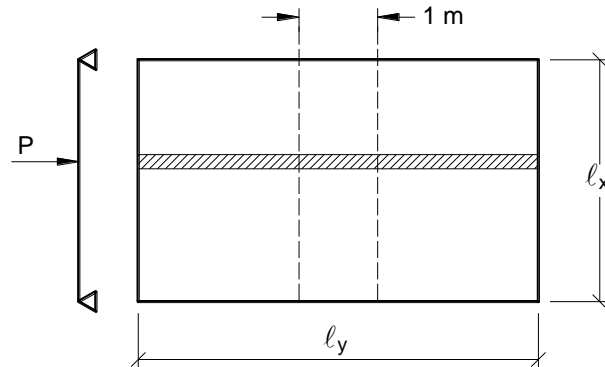


Figura 13 – Parede perpendicular à direção principal da laje armada em uma direção.

3.4.6 Ações Variáveis

Conforme o item 6 da NBR 6120, “De maneira geral, os valores das ações são verificados caso a caso, conforme as particularidades do projeto. As ações variáveis devem respeitar os valores característicos nominais mínimos indicados nesta Seção, considerando as reduções permitidas em 6.12, reduções estas que devem ser registradas nos documentos do projeto. As ações variáveis são classificadas, de modo geral, como ações variáveis normais. As ações variáveis especiais ocorrem em casos específicos indicados nesta Seção.

Quanto às **cargas variáveis**, “As estruturas devem ser projetadas para suportar as cargas variáveis indicadas na Tabela 10. Áreas sujeitas a várias categorias de utilização devem ser calculadas para a categoria que produzir os efeitos mais desfavoráveis. Exceto onde especificado, os pavimentos devem ser projetados para as cargas uniformemente distribuídas e verificados para a atuação isolada das cargas concentradas, o que for mais desfavorável. Exceto onde especificado, as cargas concentradas indicadas são assumidas atuando uniformemente distribuídas em uma área de $75\text{ cm} \times 75\text{ cm}$ e localizadas de modo a produzir os efeitos mais desfavoráveis.

Os valores informados na Tabela 10 não incluem o peso próprio de estruturas de arquibancadas, plataformas, passarelas, mezaninos etc., exceto onde indicado. As cargas variáveis devem ser consideradas como quase-estáticas. Para cargas que possam induzir efeitos de ressonância ou outra resposta dinâmica significativa da estrutura (por exemplo: danças, saltos, movimentos de máquinas etc.), esses efeitos devem ser levados em consideração por meio de fatores dinâmicos ou análise dinâmica específica. Exceto onde indicado, as cargas variáveis uniformemente distribuídas da Tabela 10 podem ser multiplicadas por um coeficiente de redução, conforme descrito em 6.12.”

Portanto, a Tabela 10 da NBR 6120 deve ser consultada quando da definição das cargas variáveis atuantes nas lajes dos pavimentos. As cargas variáveis da norma para alguns casos estão apresentadas na Tabela 3.

3.5 ESPESSURA MÍNIMA

A NBR 6118 (item 13.2.4.1) estabelece que a espessura mínima para as lajes maciças deve respeitar:

- 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;
- 15 cm para lajes com protensão apoiada em vigas, com o mínimo de $\ell/42$ para lajes de piso biapoiadas e $\ell/50$ para lajes de piso contínuas;
- 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes cogumelo fora do capitel.

Tabela 3 – Valores característicos nominais das cargas variáveis (parte da Tabela 10 da NBR 6120).

Local		Carga uniformemente distribuída (kN/m ²)
Balcões, sacadas, varandas e terraços ^{i,j)}	Residencial	2,5
	Comercial, corporativos e escritórios	3
	Com acesso público (hotéis, hospitais, escolas, teatros, etc.)	4
Edifícios residenciais	Dormitórios	1,5
	Sala, copa, cozinha	1,5
	Sanitários	1,5
	Dispensa, área de serviço e lavanderia	2
	Quadras esportivas	5 ^{a)}
	Salão de festas, salão de jogos	3 ^{a)}
	Áreas de uso comum	3 ^{a)}
	Academia	3 ^{a)}
	Forro acessíveis apenas para manutenção e sem estoque de materiais	0,1 ^{a), r)}
	Sótão	2 ^{a)}
	Corredores dentro de unidades autônomas	1,5
	Corredores de uso comum	3
	Depósitos	3
	Áreas técnicas (ver item nesta Tabela)	
Jardins (ver item nesta Tabela)		
a) “Redução de cargas variáveis não permitida. i) Conforme o caso, deve-se prever cargas adicionais devido a mudanças futuras, por exemplo: fechamento com vidro, nivelamento do piso, mudança de uso etc. j) Nas bordas de balcões, varandas, sacadas e terraços com guarda-corpo, prever carga variável de 2 kN/m, além do peso próprio do guarda-corpo. Considerar também forças horizontais variáveis conforme 6.3. r) Para forros inacessíveis e sem possibilidade de estoque de materiais, não é necessário considerar cargas variáveis devido ao uso.”		

3.6 COBRIMENTO MÍNIMO

Para determinar a espessura do cobrimento é necessário antes definir a Classe de Agressividade Ambiental a qual o elemento ou a estrutura está inserida. Nos projetos das estruturas correntes, a agressividade do ambiente deve ser classificada de acordo com o apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e pode ser avaliada, simplificada, segundo as condições de exposição da estrutura ou de suas partes (NBR 6118, item 6.4.2). “O responsável pelo projeto estrutural, de posse de dados relativos ao ambiente em que será construída a estrutura, pode considerar classificação mais agressiva que a estabelecida na Tabela 6.1.” (NBR 6118, item 6.4.3).

A NBR 6118 (item 7.4) estabelece valores para o cobrimento nominal de armaduras. Para garantir o cobrimento mínimo (c_{\min}) o projeto e a execução devem considerar o cobrimento nominal (c_{nom}), que é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução (Δc):

$$c_{\text{nom}} = c_{\min} + \Delta c \quad \text{Eq. 13}$$

Nas obras correntes o valor de Δc deve ser maior ou igual a 10 mm. Esse valor pode ser reduzido para 5 mm quando houver um adequado controle de qualidade e rígidos limites de tolerância da variabilidade das medidas durante a execução das estruturas de concreto. Em geral, o cobrimento nominal de uma determinada barra deve ser:

$$c_{\text{nom}} \geq \phi_{\text{barra}} \quad \text{Eq. 14}$$

$$c_{\text{nom}} \geq \phi_{\text{feixe}} = \phi_n = \phi \sqrt{n}$$

A dimensão máxima característica do agregado graúdo ($d_{\text{máx,agr}}$) utilizado no concreto não pode superar em 20 % a espessura nominal do cobrimento, ou seja: $d_{\text{máx,agr}} \leq 1,2c_{\text{nom}}$.

Tabela 4 - Classes de agressividade ambiental – CAA (Tabela 6.1 da NBR 6118).

Classe de agressividade Ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de Projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{1,2}	Pequeno
III	Forte	Marinha ¹	Grande
		Industrial ^{1,2}	
IV	Muito forte	Industrial ^{1,3}	Elevado
		Respingos de maré	

Notas: 1) *Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).*
 2) *Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.*
 3) *Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.*

A Tabela 5 apresenta valores de cobrimento nominal de lajes, vigas e pilares, para a tolerância de execução (Δc) de 10 mm, em função da Classe de Agressividade Ambiental. “Para concretos de classe de resistência superior ao mínimo exigido, os cobrimentos definidos na Tabela 7.2 podem ser reduzidos em até 5 mm.” (NBR 6118, item 7.4).

Tabela 5 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm (Tabela 7.2 da NBR 6118).

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de Agressividade Ambiental (CAA)			
		I	II	III	IV ²
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto Armado ⁴	Laje ¹	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ³	30		40	50

Notas: 1) “Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.”
 2) “Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.”
 3) “No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.”
 4) Para parâmetros relativos ao Concreto Protendido consultar a Tabela 7.2 da NBR 6118. “No caso de elementos estruturais pré-fabricados, os valores relativos ao cobrimento das armaduras (Tabela 7.2) devem seguir o disposto na ABNT NBR 9062.”⁸ (item 7.4.7.7).

O cobrimento nominal tem a notação geralmente simplificada para apenas a letra c (Figura 14).

⁸ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. NBR 9062, ABNT, 2001, 36p.

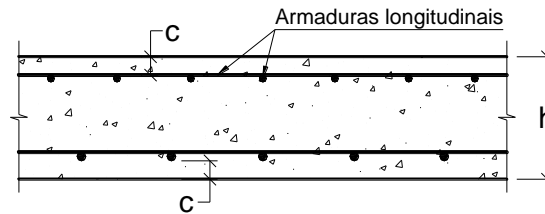


Figura 14 – Cobrimento da armadura longitudinal na laje maciça.

3.7 ESTIMATIVA DA ALTURA DA LAJE

Para projetar uma laje é necessário conhecer de início a sua altura (h , Figura 15). Existem diferentes procedimentos para estimativa da altura da laje, sendo um deles dependente da altura útil d , definida como a distância entre o centro de gravidade da armadura tracionada e a face comprimida da seção.

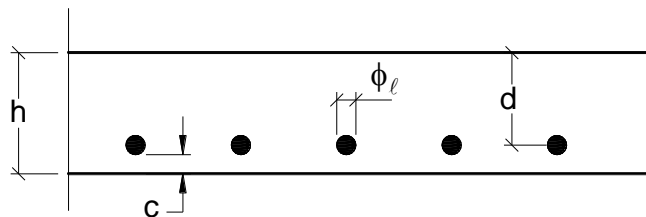


Figura 15 – Altura útil d para armadura de flexão positiva em laje maciça.

A altura d pode ser estimada como:

$$d \cong (2,5 - 0,1 n) \ell^* \quad \text{Eq. 15}$$

d = altura útil da laje (cm);

n = número de bordas engastadas da laje;

ℓ^* = dimensão da laje em metro, sendo:

$$\ell^* \leq \begin{cases} \ell_x \\ 0,7 \ell_y \end{cases} \quad \text{Eq. 16}$$

com $\ell_x \leq \ell_y$ e ℓ^* , ℓ_x e ℓ_y em metro.

Com a altura útil d da Eq. 15 e supondo armadura em apenas uma camada, a altura h é:

$$h = d + \phi_l/2 + c \quad \text{Eq. 17}$$

Como altura final para a laje deve-se aproximar o valor dado pela Eq. 17 para o número inteiro mais próximo, obedecendo-se a altura mínima prescrita para as lajes.

Nos cálculos de dimensionamento a altura útil d deve ser conhecida, de modo que deve ser recalculada em função da altura h escolhida:

$$d = h - c - \phi_l/2 \quad \text{Eq. 18}$$

Como não se conhece inicialmente o diâmetro ϕ_l da barra longitudinal, esse diâmetro deve ser estimado. No caso das lajes correntes o diâmetro varia comumente de 5 a 10 mm, e para efeito de cálculo inicial pode-se estimar o diâmetro de 10 mm.

3.8 MOMENTOS FLETORES SOLICITANTES

Os momentos fletores e as flechas nas lajes maciças são determinadas conforme a laje é armada em uma ou em duas direções. As lajes armadas em uma direção são calculadas como vigas segundo a direção principal e as lajes armadas em duas direções podem ser aplicadas diferentes teorias, como a Teoria da Elasticidade e a das Charneiras Plásticas.

3.8.1 Laje Armada em Uma Direção

No caso das lajes armadas em uma direção considera-se simplificada que a flexão na direção do menor vão da laje é preponderante à da outra direção, de modo que a laje será suposta como uma viga com largura constante de um metro (100 cm), segundo a direção principal da laje, como mostrado na Figura 16. Na direção secundária desprezam-se os momentos fletores existentes.

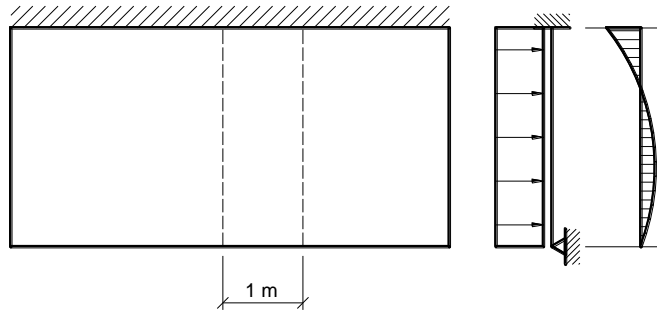


Figura 16 – Momentos fletores em laje armada em uma direção.

A Figura 17, Figura 18 e Figura 19 mostram os casos de vinculação possíveis de existirem quando se consideram apenas apoios simples e engastes perfeitos. Estão indicadas as equações para cálculo das reações de apoio, momentos fletores máximos e flechas imediatas, para carregamento uniformemente distribuído.

Flecha máxima:

$$a_i = \frac{5}{384} \frac{p l^4}{EI}$$

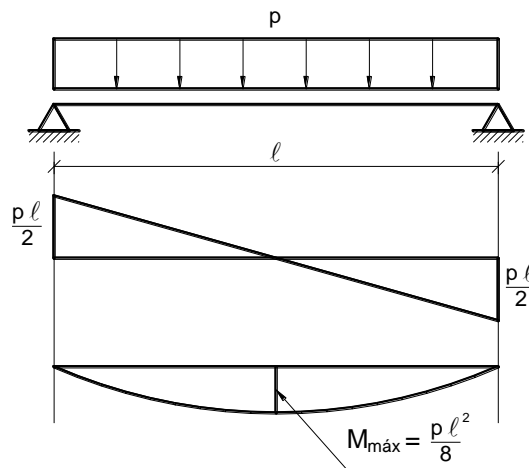


Figura 17 – Laje armada em uma direção sobre apoios simples e com carregamento uniforme.

Flecha máxima:

$$a_i = \frac{1}{185} \frac{p l^4}{EI}$$

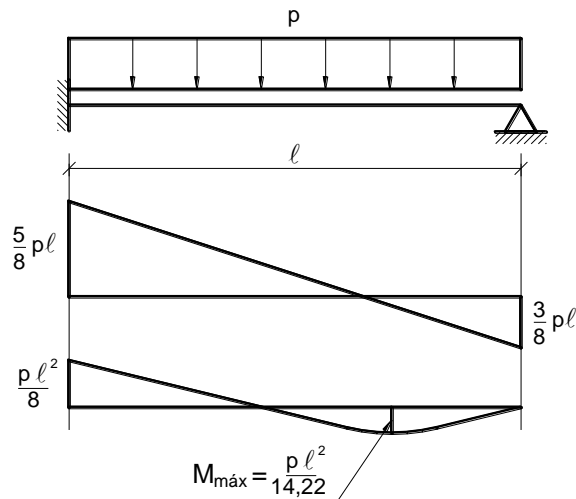


Figura 18 – Laje armada em uma direção sobre apoio simples e engaste perfeito com carregamento uniforme.

Flecha máxima:

$$a_i = \frac{1}{384} \frac{p \ell^4}{EI}$$

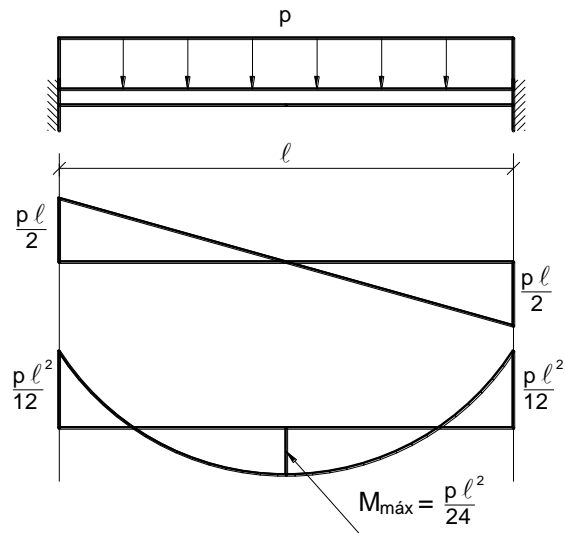


Figura 19 – Laje armada em uma direção biengastada com carregamento uniforme.

As lajes em balanço, como as lajes de marquises e varandas, são também casos típicos de lajes armadas em uma direção, que devem ser calculadas como viga segundo a direção do menor vão (Figura 20).

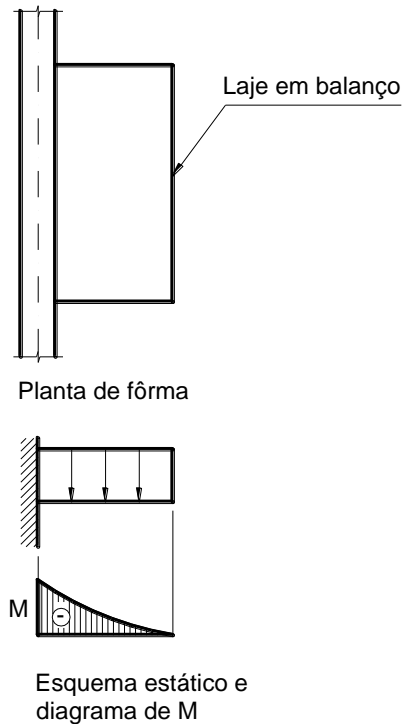


Figura 20 – Laje em balanço armada em uma direção.

No caso de lajes contínuas armadas em uma direção, como mostrado na Figura 21, com duas bordas livres, o cálculo pode ser feito supondo viga contínua com largura de um metro, na direção dos vãos dos apoios.

Para a obtenção dos esforços e flechas máximas nas lajes deve-se decompor o carregamento total em carregamento permanente e carregamento variável. Os esforços solicitantes máximos podem ser obtidos aplicando-se os carregamentos nas lajes separadamente, sendo o primeiro o carregamento permanente, e em seguida o carregamento variável. Os esforços finais são somados, obtendo-se assim os esforços desfavoráveis máximos.

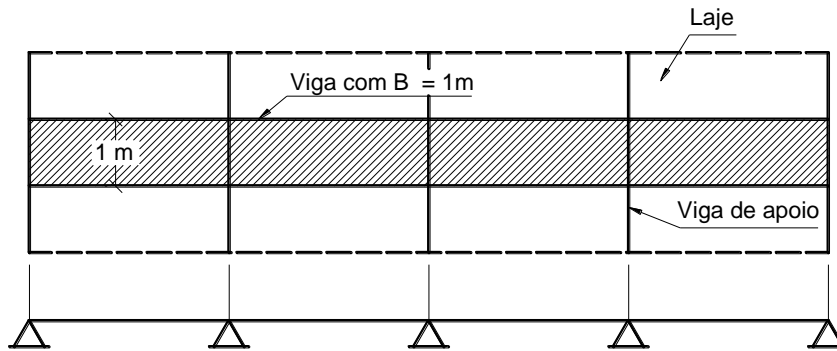


Figura 21 – Lajes contínuas armadas em uma direção.

3.8.2 Laje Armada em Duas Direções

O comportamento das lajes armadas em **duas direções**, apoiadas nos quatro lados, é bem diferente das lajes armadas em **uma direção**, de modo que o seu cálculo é bem mais complexo se comparado ao das lajes armadas em uma direção. Sob a ação do carregamento a laje apoia-se no trecho central dos apoios e os cantos se levantam dos apoios, como mostrado na Figura 22.

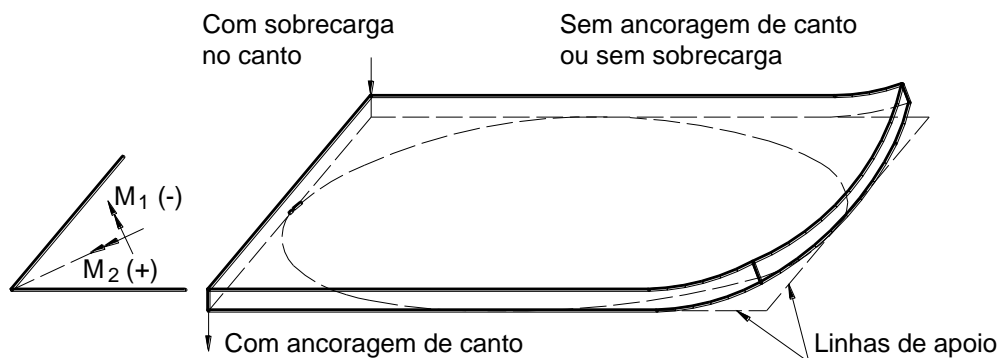


Figura 22 – Laje retangular com apoios simples nos quatro lados.
(LEONHARDT e MÖNNIG, 1982).

Se a laje estiver ligada a vigas de concreto ou se existirem pilares nos cantos, o levantamento da laje fica impedido, o que faz surgir momentos fletores nos cantos, negativos, que causam tração no lado superior da laje na direção da diagonal, e positivos na direção perpendicular à diagonal, que causam tração no lado inferior da laje. Os momentos nos cantos são chamados momentos volventes ou momentos de torção, e recebem a notação de M_{xy} .

A direção dos momentos principais M_1 e M_2 principais está mostrada na Figura 23. Nos cantos, os momentos principais desviam-se por influência dos momentos volventes. No centro da laje os momentos principais desenvolvem-se perpendicularmente às bordas e nos cantos com ângulos de 45° .

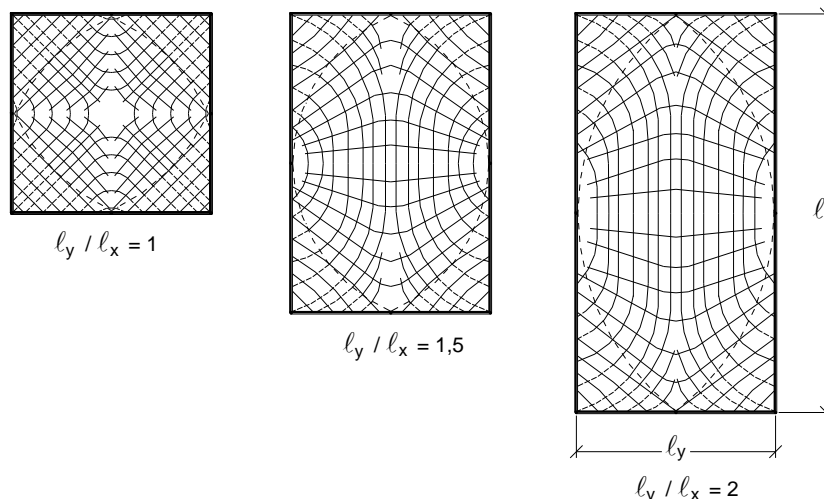


Figura 23 – Direção dos momentos fletores principais em lajes armadas em duas direções sob bordas de apoio simples (LEONHARDT & MÖNNIG, 1982).

Os esforços solicitantes e as deformações nas lajes armadas em duas direções podem ser determinados por diferentes teorias, sendo as mais importantes as seguintes:

- Teoria das Placas: desenvolvida com base na Teoria da Elasticidade; podem ser determinados os esforços e as flechas em qualquer ponto da laje;
- Processos aproximados;
- Método das Linhas de Ruptura ou das Charneiras Plásticas;
- Métodos Numéricos, como o dos Elementos Finitos, de Contorno, etc.

A Teoria das Placas, desenvolvida com base na teoria matemática da elasticidade, onde o material é elástico linear (vale a Lei de Hooke), homogêneo e isotrópico, proporciona a equação geral das placas (equação diferencial de quarta ordem, não homogênea), obtida por Lagrange em 1811, que relaciona a deformada elástica w da placa com a carga p unitária, uniformemente distribuída na área da placa. A equação tem a forma:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{D} \quad \text{Eq. 19}$$

w = deslocamento vertical da placa;

p = carregamento na placa;

D = rigidez da placa à flexão, dada por:

$$D = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)} \quad \text{Eq. 20}$$

A solução da equação geral das placas é tarefa muito complexa, o que motivou o surgimento de diversas tabelas, de diferentes origens e autores, com coeficientes que proporcionam o cálculo dos momentos fletores e das flechas para casos específicos de apoios e carregamentos. Há diversas tabelas de autores como: Czerny, Stiglat/Wippel, Bares, Szilard, etc. De modo geral abrangem os casos de lajes retangulares, triangulares, circulares, apoiadas em pilares, com bordas livres, etc., sob carregamento uniforme e triangular.

No caso deste texto serão utilizadas as tabelas apresentadas no anexo (Tabela A-8 a Tabela A-17), desenvolvidas por Barés e adaptadas por PINHEIRO (1994). A Tabela A-8 até a Tabela A-12 são tabelas para lajes com carregamento uniformemente distribuído na área da laje e a Tabela A-13 até a Tabela A-17 são para carregamento triangular, conforme os desenhos mostrados nessas tabelas. As tabelas servem para o cálculo dos momentos fletores em lajes retangulares com apoios nas quatro bordas.

Conforme as tabelas de Barés, os momentos fletores, negativos ou positivos, são calculados pela expressão:

$$M = \mu \frac{p \ell_x^2}{100} \quad \text{Eq. 21}$$

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

μ = coeficiente tabelado, de acordo com cada tipo de laje e em função de $\lambda = \ell_y / \ell_x$, sendo:

μ_x e μ_y = coeficientes para cálculo dos momentos fletores positivos atuantes nas direções paralelas a ℓ_x e ℓ_y , respectivamente;

μ'_x e μ'_y = coeficientes para cálculo dos momentos fletores negativos atuantes nas bordas perpendiculares às direções ℓ_x e ℓ_y , respectivamente;

p = valor da carga uniforme ou triangular atuante na laje (kN/m²);

ℓ_x = menor vão da laje (m).

3.8.3 Compatibilização dos Momentos Fletores

Ao se considerar as lajes de um pavimento isoladas umas das outras, os momentos fletores negativos em uma borda comum a duas lajes contíguas são geralmente diferentes (ver Figura 24).

A NBR 6118 (item 14.7.6.2) permite que seja feita uma compatibilização dos momentos fletores negativos: *“Quando houver predominância de cargas permanentes, as lajes vizinhas podem ser consideradas isoladas, realizando-se a compatibilização dos momentos sobre os apoios de forma aproximada. No caso de análise plástica, a compatibilização pode ser realizada mediante alteração das razões entre momentos de borda e vão, em procedimento iterativo, até a obtenção de valores equilibrados nas bordas. Permite-se, simplificada-*

a adoção do maior valor de momento negativo em vez de equilibrar os momentos de lajes diferentes sobre uma borda comum.”

Há muitos anos está consolidada na prática brasileira um método de compatibilização, onde o momento fletor negativo (X) de duas lajes adjacentes é tomado como:

$$X \geq \begin{cases} 0,8 X_1 \\ \frac{X_1 + X_2}{2} \end{cases}, \text{ com } X_1 \geq X_2 \quad \text{Eq. 22}$$

Os momentos fletores positivos são corrigidos e aumentados, quando for o caso, conforme indicado no esquema mostrado na Figura 24. Se ocorrer diminuição do momento fletor (alívio), este não é considerado, sendo desprezado. Acrescente-se que a compatibilização dos momentos positivos e negativos deve ser feita nas duas direções da laje.

A rigor, as relações apresentadas na Eq. 50, Eq. 51 e Eq. 52 devem ser verificadas, o que configura um trabalho laborioso, caso os cálculos sejam efetuados manualmente. Uma opção ao procedimento da compatibilização de momentos fletores é adotar para a borda comum a maior armadura negativa, que simplifica muito o cálculo e não resulta um procedimento antieconômico.

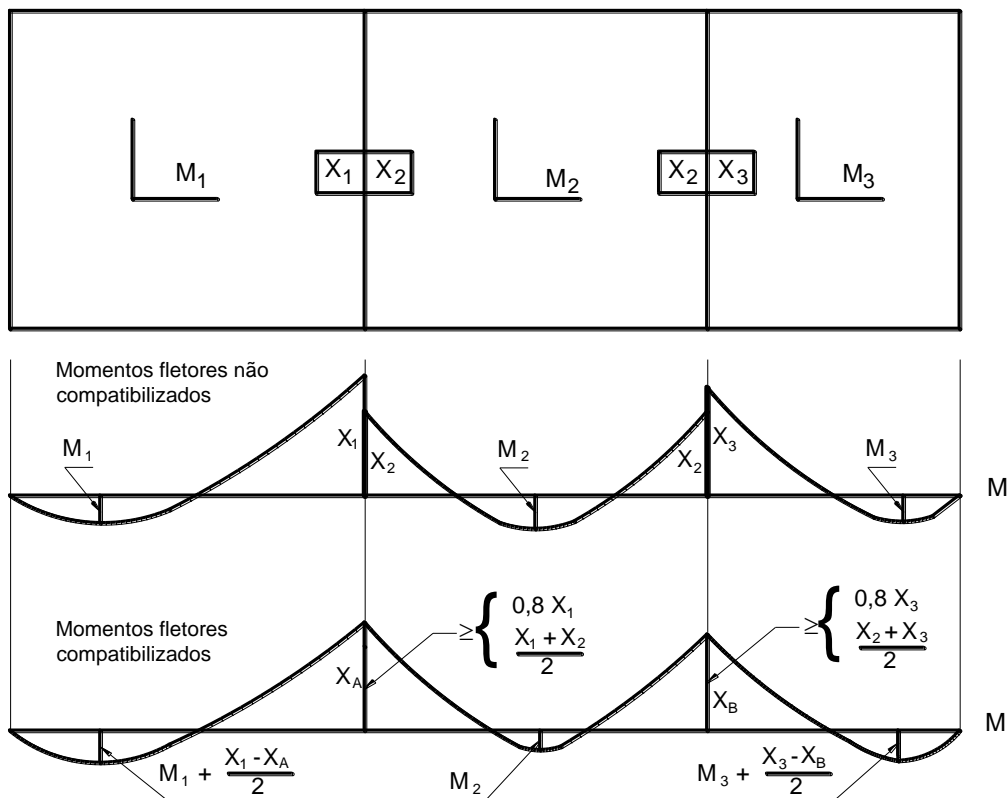


Figura 24 – Compatibilização dos momentos fletores negativos e positivos.

3.8.4 Momentos Volventes

Nos cantos das lajes com bordas apoiadas surgem momentos fletores negativos, que causam tração no lado superior da laje na direção da diagonal, e positivos na direção perpendicular à diagonal, que causam tração no lado inferior da laje. Os momentos nos cantos são chamados momentos volventes ou momentos de torção, e recebem a notação de M_{xy} .

Para os momentos volventes devem ser dispostas armaduras convenientemente calculadas. As armaduras podem ser dispostas como mostrado na Figura 25.

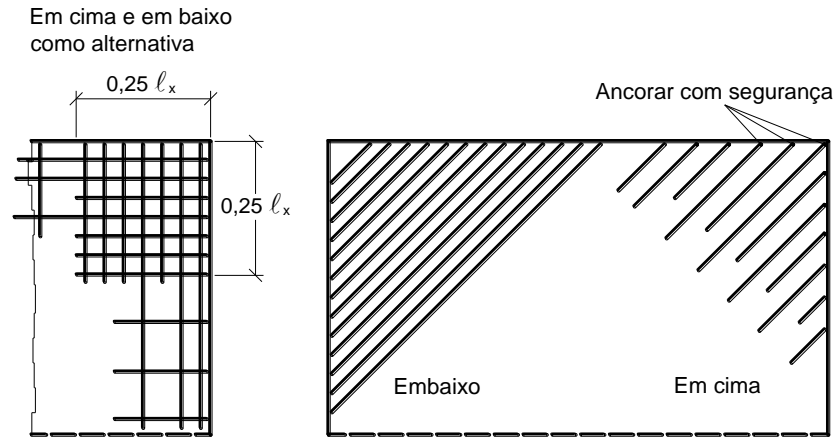


Figura 25 – Armadura para os momentos volventes nos cantos.

3.9 REAÇÕES DE APOIO

Assim como no cálculo dos momentos fletores solicitantes e das flechas, no cálculo das reações da laje nas bordas, as lajes serão analisadas em função de serem armadas em uma ou em duas direções.

No caso das lajes armadas em **uma direção**, as reações de apoio são provenientes do cálculo da viga suposta, como visto no item 3.8.1. Considera-se que as cargas na laje caminhem para as vigas nas bordas perpendiculares à direção principal da laje. Nas outras duas vigas laterais, a favor da segurança pode-se considerar uma carga uniforme referente à área do triângulo adjacente à viga, como mostrada na área hachurada da Figura 26, com valor:

$$V_{\text{viga}} = 0,15p \ell_x \quad \text{Eq. 23}$$

V_{viga} = carga da laje sobre a viga lateral (kN/m);

p = carga total uniformemente distribuída na área da laje (kN/m²);

ℓ_x = menor vão da laje (m).

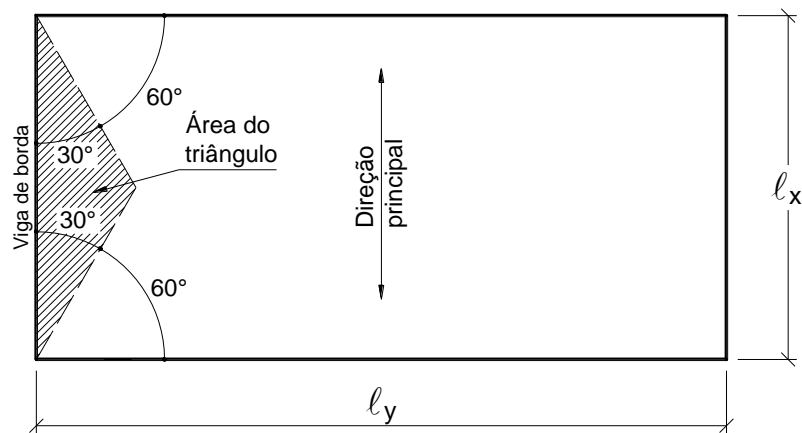


Figura 26 – Carga nas vigas laterais paralelas à direção principal da laje armada em uma direção.

A NBR 6118 (item 14.7.6.1) prescreve que, “Para o cálculo das reações de apoio das lajes maciças retangulares com carga uniforme podem ser feitas as seguintes aproximações:

a) as reações em cada apoio são as correspondentes às cargas atuantes nos triângulos ou trapézios determinados através das charneiras plásticas correspondentes à análise efetivada com os critérios de 14.7.4, sendo que essas reações podem ser, de maneira aproximada, consideradas uniformemente distribuídas sobre os elementos estruturais que lhes servem de apoio;

b) quando a análise plástica não for efetuada, as charneiras podem ser aproximadas por retas inclinadas, a partir dos vértices, com os seguintes ângulos:

- 45° entre dois apoios do mesmo tipo;
- 60° a partir do apoio considerado engastado, se o outro for considerado simplesmente apoiado;
- 90° a partir do apoio, quando a borda vizinha for livre.”

A Figura 27 mostra o esquema prescrito pela norma, onde cada viga de apoio da laje receberá a carga que estiver nos triângulos ou trapézios a ela relacionada.

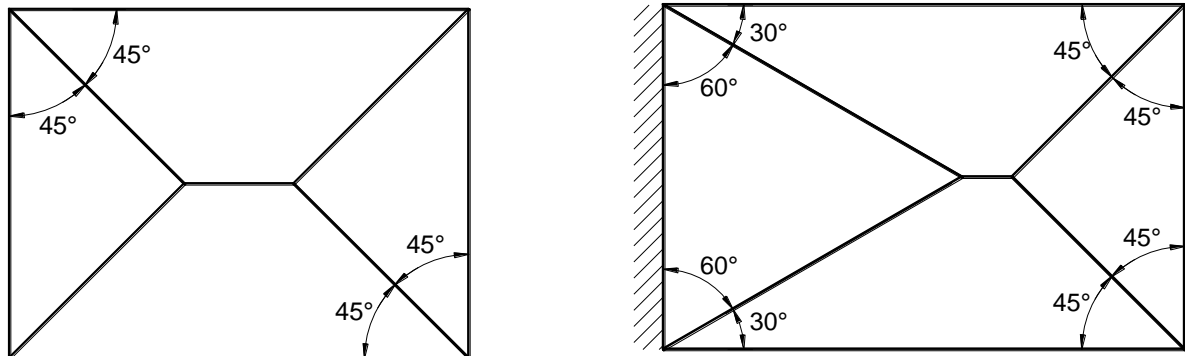


Figura 27 – Definição das áreas de influência de carga para cálculo das reações de apoio nas vigas de borda das lajes armadas em duas direções.

No Anexo estão apresentadas as Tabelas A-5 a A-7, com coeficientes que auxiliam o cálculo das reações de apoio para lajes armadas em duas direções, com carregamento uniformemente distribuído. As reações são calculadas pela equação:

$$V = v \frac{p \ell_x}{10} \quad \text{Eq. 24}$$

V = reação de apoio (kN/m);

v = coeficiente tabelado em função de $\lambda = \ell_y / \ell_x$, onde:

v_x = reação na borda simplesmente apoiada perpendicular à direção de ℓ_x ;

v_y = reação na borda simplesmente apoiada perpendicular à direção de ℓ_y ;

v'_x = reação na borda engastada perpendicular à direção de ℓ_x ;

v'_y = reação na borda engastada perpendicular à direção de ℓ_y ;

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

ℓ_x = menor vão da laje (m).

3.10 FLECHA

Assim como nas vigas, o “Estado-Limite de Deformações Excessivas” (ELS-DEF), definido pela NBR 6118 (item 3.2.4) como o “estado em que as deformações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal, dados em 13.3.”, deve ser também verificado nas lajes de concreto.

No item 19.3.1 a NBR 6118 recomenda que sejam usados os critérios propostos no item 17.3.2, considerando a possibilidade de fissuração (Estádio II). As prescrições contidas no item 17.3.2 tratam dos deslocamentos (flechas) nas vigas de Concreto Armado, o que implica que a norma recomenda que as flechas nas lajes sejam tratadas do mesmo modo como nas vigas.

O texto do item 17.3.2 (Estado-Limite de Deformação) é o seguinte: “A verificação dos valores-limites estabelecidos na Tabela 13.3 para a deformação da estrutura, mais propriamente rotações e deslocamentos em elementos estruturais lineares, analisados isoladamente e submetidos à combinação de ações conforme a Seção 11, deve ser realizada através de modelos que considerem a rigidez efetiva das seções do elemento estrutural, ou seja, que levem em consideração a presença da armadura, a existência de fissuras no concreto ao longo dessa armadura e as deformações diferidas no tempo.

A deformação real da estrutura depende também do processo construtivo, assim como das propriedades dos materiais (principalmente do módulo de elasticidade e da resistência à tração) no momento de sua efetiva solitação. Em face da grande variabilidade dos parâmetros citados, existe uma grande variabilidade das deformações reais. Não se pode esperar, portanto, grande precisão nas previsões de deslocamentos dadas pelos processos analíticos prescritos.”

A avaliação da flecha nas vigas e lajes é feita de maneira aproximada, onde, segundo o item 17.3.2.1, “O modelo de comportamento da estrutura pode admitir o concreto e o aço como materiais de comportamento elástico e linear, de modo que as seções ao longo do elemento estrutural possam ter as deformações específicas determinadas no Estádio I, desde que os esforços não superem aqueles que dão início à fissuração, e no Estádio II, em caso contrário.

Deve ser utilizado no cálculo o valor do módulo de elasticidade secante E_{cs} definido na Seção 8, sendo obrigatória a consideração do efeito da fluência.”

3.10.1 Verificação do Estádio

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

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{y_t} \quad \text{Eq. 25}$$

sendo: $\alpha = 1,2$ para seções T ou duplo T;
 $\alpha = 1,3$ para seções I ou T invertido;
 $\alpha = 1,5$ para seções retangulares.

onde:

α é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta;
 y_t é a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada;
 I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto;
 f_{ct} é a resistência à tração direta do concreto, conforme 8.2.5, com o quantil apropriado a cada verificação particular. Para determinação do momento de fissuração, deve ser usado o $f_{ct,inf}$ no estado-limite de formação de fissuras e o $f_{ct,m}$ no estado-limite de deformação excessiva (ver 8.2.5).

No caso da utilização de armaduras ativas, deve ser considerado o efeito da protensão no cálculo do momento de fissuração.”

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

a) para concretos de classes até C50

$$f_{ct,m} = 0,3 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad \text{Eq. 26}$$

com:

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m} \quad \text{Eq. 27}$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 f_{ct,m} \quad \text{Eq. 28}$$

b) para concretos de classes C55 até C90

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln(1 + 011 f_{ck}) \quad \text{Eq. 29}$$

com $f_{ct,m}$ e f_{ck} em MPa. Sendo $f_{ck} \geq 7$ MPa, a Eq. 26 a Eq. 29 podem também ser usadas para idades diferentes de 28 dias. Os valores $f_{ctk,inf}$ e $f_{ctk,sup}$ são os valores mínimo e máximo para a resistência à tração direta.

Se o momento fletor solicitante de uma seção na laje é maior que o momento fletor de fissuração, a seção está no Estádio II, ou seja, está fissurada. Neste caso deve-se considerar o módulo de elasticidade secante (E_{cs}) e a posição da linha neutra deve ser calculada no Estádio II.

Por outro lado, no caso do momento fletor solicitante na laje ser menor que o momento de fissuração, a seção está no Estádio I, ou seja, não está fissurada. As deformações podem ser determinadas no Estádio I, com o momento de inércia da seção bruta de concreto (I_c – ver Eq. 32).

Para o momento fletor na laje, a ser comparado com o momento fletor de fissuração, deve ser considerada a combinação rara. A esse respeito, no item 11.8.3 a NBR 6118 trata das combinações de serviço,

classificadas em quase permanentes, frequentes e raras. As combinações raras “ocorrem algumas vezes durante o período de vida da estrutura, e sua consideração pode ser necessária na verificação do estado-limite de formação de fissuras.”

A combinação rara de serviço, conforme mostrada na Tabela 11.4 da NBR 6118 (11.8.3.2), a ação variável principal F_{q1} é tomada com seu valor característico F_{q1k} e todas as demais ações variáveis são consideradas com seus valores frequentes $\psi_1 F_{qk}$. O cálculo da ação de serviço é feito segundo a equação:

$$F_{d,ser} = \Sigma F_{gik} + F_{q1k} + \Sigma \psi_{1j} F_{qjk} \quad \text{Eq. 30}$$

F_{gk} = ações permanentes características;

ψ_1 = fator de redução de combinação frequente para ELS (ver Tabela 11.2 da NBR 6118);

F_{q1k} = ação variável principal direta característica;

F_{qjk} = demais ações variáveis características.

Nas lajes de edificações residenciais correntes, de modo geral, existe apenas uma carga variável, conforme definida na NBR 6120, de modo que a Eq. 30 fica reduzida aos dois primeiros termos.

3.10.2 Flecha Imediata

A flecha imediata é aquela que ocorre quando é aplicado o primeiro carregamento na peça, que não leva em conta os efeitos da fluência. A NBR 6118 (item 17.3.2.1.1) prescreve que “Para uma avaliação aproximada da flecha imediata em vigas, pode-se utilizar a expressão de rigidez equivalente dada a seguir:”

$$(EI)_{eq} = E_{cs} \left\{ \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 I_c + \left[1 - \left(\frac{M_r}{M_a} \right)^3 \right] I_{II} \right\} \leq E_{cs} I_c \quad \text{Eq. 31}$$

I_c = momento de inércia da seção bruta de concreto:

$$I_c = \frac{b h^3}{12} \quad \text{Eq. 32}$$

I_{II} = momento de inércia da seção fissurada de concreto no Estádio II, calculado com:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} \quad \text{Eq. 33}$$

M_r = momento de fissuração do elemento estrutural, cujo valor deve ser reduzido à metade no caso de utilização de barras lisas;

M_a = momento fletor na seção crítica do vão considerado, ou seja, o momento máximo no vão para vigas biapoiadas ou contínuas e momento no apoio para balanços, para a combinação de ações considerada nessa avaliação.

E_{cs} = módulo de elasticidade secante do concreto.

O módulo de elasticidade secante pode ser obtido pelo método de ensaio da NBR 8522, ou estimado pela expressão:

$$E_{cs} = \alpha_i E_{ci} \quad \text{Eq. 34}$$

sendo: $\alpha_i = 0,8 + 0,2 \frac{f_{ck}}{80} \leq 1,0$

Na falta de resultados de ensaios a NBR 6118 (item 8.2.8) permite estimar o valor do módulo de elasticidade inicial (E_{ci}) aos 28 dias segundo a expressão:

a) para f_{ck} de 20 a 50 MPa

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad \text{Eq. 35}$$

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

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

$\alpha_E = 0,9$ para calcário;

$\alpha_E = 0,7$ para arenito.

b) para f_{ck} de 55 a 90 MPa

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \alpha_E \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} \quad \text{Eq. 36}$$

com E_{ci} e f_{ck} em MPa.

Para cálculo do momento fletor M_a deve ser considerada a combinação rara, com a ação definida na Eq. 30. Para o cálculo do momento de inércia no Estádio II é necessário conhecer a posição da linha neutra neste Estádio. Como a linha neutra passa pelo centro de gravidade da seção homogeneizada, x_{II} tem a equação:

$$b \frac{x_{II}^2}{2} + \alpha_e A'_s (x_{II} - d') - \alpha_e A_s (d - x_{II}) = 0$$

$$x_{II}^2 + \frac{2 \alpha_e}{b} (A_s + A'_s) x_{II} - \frac{2 \alpha_e}{b} (A_s d + A'_s d') = 0$$

se $A'_s = 0$ a equação torna-se:

$$x_{II}^2 + \frac{2 A_s \alpha_e}{b} x_{II} - \frac{2 A_s d \alpha_e}{b} = 0 \quad \text{Eq. 37}$$

com $b = 1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$ no caso das lajes maciças.

O momento de inércia no Estádio II será:

$$I_{II} = \frac{b x_{II}^3}{12} + b x_{II} \left(\frac{x_{II}}{2} \right)^2 + \alpha_e A'_s (x_{II} - d')^2 + \alpha_e A_s (d - x_{II})^2$$

se $A'_s = 0$ a equação torna-se:

$$I_{II} = \frac{b x_{II}^3}{12} + b x_{II} \left(\frac{x_{II}}{2} \right)^2 + \alpha_e A_s (d - x_{II})^2 \quad \text{Eq. 38}$$

3.10.3 Flecha Diferida no Tempo

A flecha diferida no tempo é aquela que leva em conta o fato do carregamento atuar na estrutura ao longo do tempo, causando a sua deformação lenta ou fluência. Segundo a NBR 6118 (item 17.3.2.1.2), “A flecha adicional diferida, decorrente das cargas de longa duração em função da fluência, pode ser calculada de maneira aproximada pela multiplicação da flecha imediata pelo fator α_f dado pela expressão:”

$$\alpha_f = \frac{\Delta \xi}{1 + 50 \rho'} \quad \text{Eq. 39}$$

$$\rho' = \frac{A'_s}{b d} \quad \text{Eq. 40}$$

A'_s = área da armadura comprimida, se existir;

b = largura da seção transversal;

d = altura útil;

ξ = coeficiente função do tempo, que pode ser obtido diretamente na Tabela 6 ou ser calculado pelas expressões seguintes:

$$\Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0) \quad \text{Eq. 41}$$

$$\xi(t) = 0,68(0,996^t) t^{0,32} \quad \text{para } t \leq 70 \text{ meses} \quad \text{Eq. 42}$$

$$\xi(t) = 2 \quad \text{para } t > 70 \text{ meses} \quad \text{Eq. 43}$$

Tabela 6 - Valores do coeficiente ξ em função do tempo (Tabela 17.1 da NBR 6118).

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

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

t_0 = idade, em meses, relativa à data de aplicação da carga de longa duração. No caso de parcelas da carga de longa duração serem aplicadas em idades diferentes, pode-se tomar para t_0 o valor ponderado a seguir:

$$t_0 = \frac{\sum P_i t_{0i}}{\sum P_i} \quad \text{Eq. 44}$$

P_i = parcelas de carga;

t_{0i} = idade em que se aplicou cada parcela P_i , em meses.

O valor da flecha total deve ser obtido multiplicando a flecha imediata por $(1 + \alpha_f)$.

3.10.4 Flechas Máximas Admitidas

As flechas máximas ou deslocamentos-limites como definidos pela NBR 6118 (item 13.3), “são valores práticos utilizados para verificação em serviço do estado-limite de deformações excessivas da estrutura.” Os deslocamentos limites são classificados em quatro grupos básicos, relacionados a seguir:

- “aceitabilidade sensorial:** o limite é caracterizado por vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável. A limitação da flecha para prevenir essas vibrações, em situações especiais de utilização, deve ser realizada como estabelecido na Seção 23;
- efeitos específicos:** os deslocamentos podem impedir a utilização adequada da construção;
- efeitos em elementos não estruturais:** deslocamentos estruturais podem ocasionar o mau funcionamento de elementos que, apesar de não fazerem parte da estrutura, estão a ela ligados;
- efeitos em elementos estruturais:** os deslocamentos podem afetar o comportamento do elemento estrutural, provocando afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas. Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-as ao modelo estrutural adotado.”

Os valores-limites de deslocamentos que visam proporcionar um adequado comportamento da estrutura em serviço estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores-limites de deslocamentos (Tabela 13.3 da NBR 6118).

Tipo de efeito	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento-limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocamentos visíveis em elementos estruturais	Total	$\ell/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devido a cargas variáveis	$\ell/350$
Efeitos estruturais em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	$\ell/250^{1)}$
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	$\ell/350 + \text{contraflecha}^{2)}$
			Ocorrido após a construção do piso	$\ell/600$
Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento do equipamento	De acordo com recomendação do fabricante do equipamento	
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$\ell/500^{3)}$ e 10 mm e $\theta = 0,0017 \text{ rad}^{4)}$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$\ell/250^{3)}$ e 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	Provocado pela ação do vento para combinação frequente ($\psi_1 = 0,30$)	$H/1700$ e $H_i/850^{5)}$ entre pavimentos ⁶⁾
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$\ell/400^{7)}$ e 15 mm
	Forros	Movimentos térmicos horizontais	Provocado por diferença de temperatura	$H_i/500$
		Revestimentos colados	Ocorrido após a construção do forro	$\ell/350$
		Revestimentos pendurados ou com juntas	Deslocamento ocorrido após a construção do forro	$\ell/175$
	Pontes rolantes	Desalinhamento de trilhos	Deslocamento provocado pelas ações decorrentes da frenagem	$H/400$
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.		

¹⁾ As superfícies devem ser suficientemente inclinadas ou o deslocamento previsto compensado por contraflechas, de modo a não se ter acúmulo de água.

²⁾ Os deslocamentos podem ser parcialmente compensados pela especificação de contraflechas. Entretanto, a atuação isolada da contraflecha não pode ocasionar um desvio do plano maior que $\ell/350$.

³⁾ O vão ℓ deve ser tomado na direção na qual a parede ou a divisória se desenvolve.

⁴⁾ Rotação nos elementos que suportam paredes.

⁵⁾ H é a altura total do edifício e H_i o desnível entre dois pavimentos vizinhos.

⁶⁾ Este limite aplica-se ao deslocamento lateral entre dois pavimentos consecutivos, devido à atuação de ações horizontais. Não podem ser incluídos os deslocamentos devidos a deformações axiais nos pilares. O limite também se aplica para o deslocamento vertical relativo das extremidades de linteis conectados a duas paredes de contraventamento, quando H_i representa o comprimento do lintel.

⁷⁾ O valor ℓ refere-se à distância entre o pilar externo e o primeiro pilar interno.

NOTAS:

a) Todos os valores-limites de deslocamentos supõem elementos de vão ℓ suportados em ambas as extremidades por apoios que não se movem. Quando se tratar de balanços, o vão equivalente a ser considerado deve ser o dobro do comprimento do balanço;

b) Para o caso de elementos de superfície, os limites prescritos consideram que o valor ℓ é o menor vão, exceto em casos de verificação de paredes e divisórias, onde interessa a direção na qual a parede ou divisória se desenvolve, limitando-se esse valor a duas vezes o vão menor;

c) O deslocamento total deve ser obtido a partir da combinação das ações características ponderadas pelos coeficientes definidos na Seção 11;

d) Deslocamentos excessivos podem ser parcialmente compensados por contraflechas.

3.10.5 Flecha Imediata

3.10.5.1 Laje Armada em Duas Direções

Para as lajes armadas em duas direções a flecha imediata pode ser calculada com auxílio dos coeficientes constantes das Tabelas A-1 a A-4 (ver anexo), para carregamentos uniformes e triangulares. Usa-se a equação:

$$a_i = \frac{\alpha b p \ell_x^4}{1200 EI} \quad \text{Eq. 45}$$

Considerando a largura **b** igual a 100 cm para as lajes a Eq. 45 torna-se:

$$a_i = \frac{\alpha p \ell_x^4}{12 EI} \quad \text{Eq. 46}$$

a_i = flecha imediata;

p = valor do carregamento na laje considerando a combinação quase permanente;

ℓ_x = menor vão;

b = largura unitária da laje;

α = coeficiente tabelado em função de λ ou γ (ver Tabelas A-1 a A-4 anexas);

EI = rigidez da laje à flexão;

No item 11.8.3 a NBR 6118 trata das combinações de serviço, classificadas em quase permanentes, frequentes e raras. As combinações quase permanentes “*podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura, e sua consideração pode ser necessária na verificação do estado-limite de deformações excessivas.*”

Na combinação de serviço quase permanente, conforme mostrada na Tabela 11.4 da NBR 6118, todas as ações variáveis são consideradas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{qk}$. O valor da ação de serviço na combinação quase permanente é dado pela equação:

$$F_{d,ser} = \Sigma F_{gik} + \Sigma \psi_{2j} F_{qjk} \quad \text{Eq. 47}$$

F_{gik} = ações permanentes características;

ψ_{2j} = fator de redução de combinação quase permanente para ELS (ver Tabela 11.2 da NBR 6118);

F_{qjk} = ações variáveis características.

$$\text{Se } M_a > M_r \quad \rightarrow \quad EI = (EI)_{eq} \quad \text{Eq. 48}$$

$$\text{Se } M_a < M_r \quad \rightarrow \quad EI = E_{cs} \cdot I_c$$

A flecha total é obtida multiplicando a flecha imediata por $1 + \alpha_f$:

$$a_t = a_i (1 + \alpha_f) \quad \text{Eq. 49}$$

3.10.5.2 Laje Armada em Uma Direção

Assim como a armadura longitudinal, o cálculo das flechas nas lajes armadas em uma direção se faz supondo viga com largura de um metro. As equações mostradas nas Figuras 17, 18 e 19 fornecem o valor da flecha imediata. A flecha total é obtida multiplicando a flecha imediata por $1 + \alpha_f$, como indicada na Eq. 49.

3.11 DIMENSIONAMENTO

No item 19.2 a NBR 6118 especifica que “*Na determinação dos esforços resistentes das seções de lajes submetidas a forças normais e momentos fletores, devem ser usados os mesmos princípios estabelecidos nos itens 17.2.1 a 17.2.3. Nas regiões de apoio das lajes, devem ser garantidas boas condições de ductilidade, atendendo-se às disposições de 14.6.4.3.*”

O item 17.2 refere-se aos “Elementos lineares sujeitos a solicitações normais – Estado-limite último”, de modo que os esforços resistentes nas lajes podem ser determinados como no caso das vigas, assunto já estudado. O item 14.6.4 trata da “Análise linear com ou sem redistribuição”, e o item 14.6.4.3 apresenta os “Limites para redistribuição de momentos e condições de ductilidade”, válidos para vigas e lajes, onde a norma afirma que “a capacidade de rotação dos elementos estruturais é função da posição da linha neutra no ELU. Quanto menor for x/d , tanto maior será essa capacidade”. E para “proporcionar o adequado comportamento dútil em vigas e lajes, a posição da linha neutra no ELU deve obedecer aos seguintes limites:

$$\begin{aligned} a) \ x/d \leq 0,45, & \quad \text{para concretos com } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa;} \\ b) \ x/d \leq 0,35, & \quad \text{para concretos com } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa.} \end{aligned} \quad \text{Eq. 50}$$

“Esses limites podem ser alterados se forem utilizados detalhes especiais de armaduras, como, por exemplo, os que produzem confinamento nessas regiões.

Quando for efetuada uma redistribuição, reduzindo-se um momento fletor de M para δM , em uma determinada seção transversal, a profundidade da linha neutra nessa seção x/d , para o momento reduzido δM , deve ser limitada por:

$$\begin{aligned} a) \ x/d \leq (\delta - 0,44)/1,25, & \quad \text{para concretos com } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa;} \\ b) \ x/d \leq (\delta - 0,56)/1,25, & \quad \text{para concretos com } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa.} \end{aligned} \quad \text{Eq. 51}$$

O coeficiente de redistribuição deve, ainda, obedecer aos seguintes limites:

$$\begin{aligned} a) \ \delta \geq 0,90, & \quad \text{para estruturas de nós móveis;} \\ b) \ \delta \geq 0,75, & \quad \text{para qualquer outro caso.} \end{aligned} \quad \text{Eq. 52}$$

Pode ser adotada redistribuição fora dos limites estabelecidos nesta Norma, desde que a estrutura seja calculada mediante o emprego de análise não linear ou de análise plástica, com verificação explícita da capacidade de rotação das rótulas plásticas.”

A NBR 6118 (item 14.7.1) estabelece duas hipóteses básicas para a análise das placas (lajes):

- a) manutenção da seção plana após a deformação, em faixas suficientemente estreitas;
- b) representação dos elementos por seu plano médio.

Na determinação dos esforços solicitantes nas lajes, deverá ser avaliada a necessidade da consideração da aplicação da alternância das sobrecargas. Para estruturas de edifícios em que a carga variável seja de até 5 kN/m^2 e que seja no máximo igual a 50 % da carga total, a análise estrutural pode ser realizada sem a consideração de alternância de cargas.”

Segundo a NBR 6118 (17.2.2), “o estado-limite último é caracterizado quando a distribuição das deformações na seção transversal pertencer a um dos domínios [...]”. Os domínios de deformações estão apresentados na Figura 28.

A ruptura convencional por deformação de alongamento excessiva pode ser alcançada nos seguintes domínios:

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

A ruptura convencional por deformação de encurtamento do concreto comprimido pode ocorrer nos domínios:

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

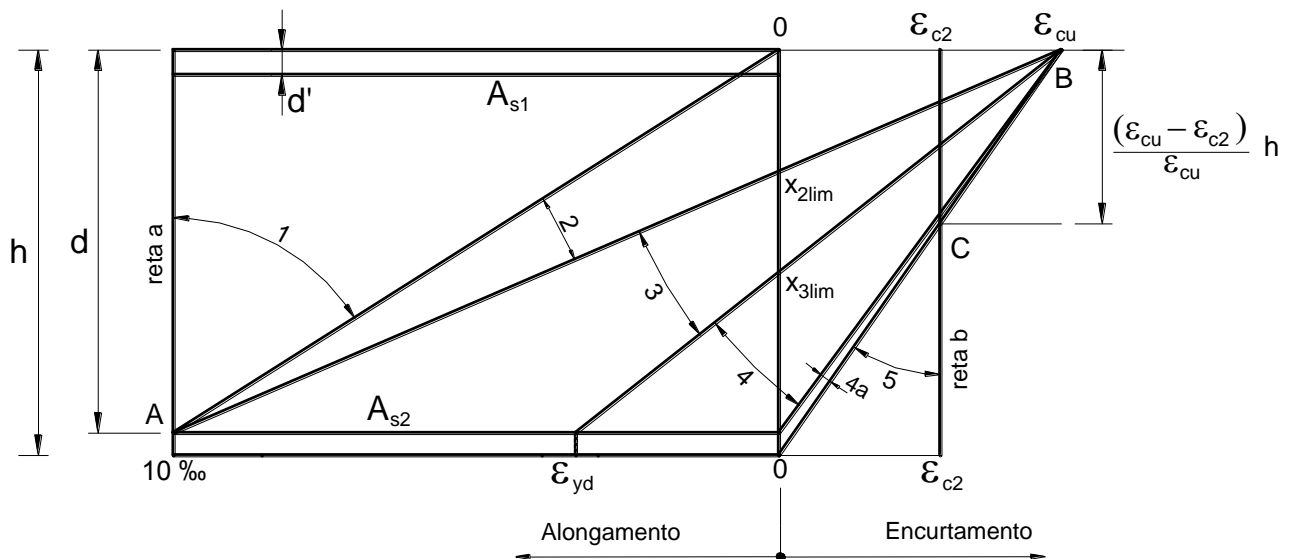


Figura 28 – Domínios de deformações no Estado-Limite Último de uma seção transversal.

A análise das lajes pode ser feita segundo a “Análise linear com ou sem redistribuição” (item 14.7.3), “Análise plástica” (item 14.7.4) ou “Análise não linear” (item 14.7.5). As análises plástica e não linear não serão apresentadas.

A análise linear com ou sem redistribuição “Aplica-se às estruturas de placas os métodos baseados na teoria da elasticidade, com coeficiente de Poisson igual a 0,2.”

“No dimensionamento das lajes em balanço, os esforços solicitantes de cálculo a serem considerados devem ser multiplicados por um coeficiente adicional γ_n , de acordo com o indicado na Tabela 13.2.”, aqui apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores do coeficiente adicional γ_n para lajes em balanço (Tabela 13.2 da NBR 6118).

h (cm)	≥ 19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
γ_n	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45

$\gamma_n = 1,95 - 0,05h$
h = altura da laje (cm)
Nota: O coeficiente γ_n deve majorar os esforços solicitantes finais de cálculo nas lajes em balanço, quando de seu dimensionamento.

3.11.1 Flexão

Conhecidos os momentos fletores máximos atuantes na laje, o dimensionamento à flexão normal simples pode ser feito de modo semelhante às vigas, supondo faixas (vigas) com largura de um metro (100 cm). Fazendo uso das equações com coeficientes tabelados K^9 , deve ser determinado o coeficiente K_c :

$$K_c = \frac{b_w d^2}{M_d} \quad \text{Eq. 53}$$

com $b_w = 100$ cm:

$$K_c = \frac{100 d^2}{M_d} \quad \text{Eq. 54}$$

com M_d em kN.cm e d em cm.

⁹ BASTOS, P.S.S. *Flexão Normal Simples – Vigas*. Bauru/SP, Unesp - Departamento de Engenharia Civil, Notas de aula, Fev/2015,78p., disponível em (27/01/2021): http://www.wp.feb.unesp.br/pbastos/pag_concreto1.htm

Com a Tabela A-25 do Anexo determinam-se os coeficientes β_x e K_s e o domínio em que a laje está. Com β_x ($= x/d$) é determinada a posição x da linha neutra, de modo a verificar os valores limites para a relação x/d , conforme a Eq. 50. Se for efetuada uma redistribuição de momentos fletores deve-se também verificar os limites impostos mostrados na Eq. 51 e na Eq. 52.

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

$$A_s = K_s \frac{M_d}{d} \quad \text{Eq. 55}$$

Na Tabela A-26 encontram-se o diâmetro e o espaçamento das barras para uma dada área de armadura em cm^2/m .

3.11.2 Força Cortante

A força cortante em lajes e elementos lineares com $b_w \geq 5d$ é verificada no item 19.4 da NBR 6118. A norma faz distinção entre laje sem e com armadura transversal para a força cortante.

3.11.2.1 Lajes sem Armadura para Força Cortante

“As lajes maciças ou nervuradas, conforme 17.4.1.1.2-b), podem prescindir de armadura transversal para resistir as forças de tração oriundas da força cortante, quando a força cortante de cálculo, a uma distância d da face do apoio, obedecer à expressão:”

$$V_{Sd} \leq V_{Rd1} \quad \text{Eq. 56}$$

V_{Sd} é a força cortante solicitante de cálculo. A força cortante resistente máxima V_{Rd1} é:

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} k (1,2 + 40\rho_1) + 0,15 \sigma_{cp}] b_w d \quad \text{Eq. 57}$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Sd}}{A_c} \quad \text{Eq. 58}$$

N_{Sd} = força longitudinal na seção devida à protensão ou carregamento (compressão com sinal positivo).

Não existindo a protensão ou força normal que cause a compressão, a Eq. 57 torna-se:

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} k (1,2 + 40\rho_1)] b_w d \quad \text{Eq. 59}$$

$$\tau_{Rd} = 0,25 f_{ctd} \quad \text{Eq. 60}$$

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c \quad \text{Eq. 61}$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w d}, \text{ não maior que } |0,02| \quad \text{Eq. 62}$$

k = coeficiente que tem os seguintes valores:

- para elementos onde 50 % da armadura inferior não chega até o apoio: $k = |1|$;
- para os demais casos: $k = |1,6 - d|$, não menor que $|1|$, com d em metros.

τ_{Rd} = tensão resistente de cálculo do concreto à força cortante (ou cisalhamento conforme a norma);

A_{s1} = área da armadura de tração que se estende até não menos que $d + \ell_{b,nec}$ além da seção considerada (Figura 29); com $\ell_{b,nec}$ definido como (NBR 6118, 9.4.2.5):

$$\ell_{b,nec} = \alpha \ell_b \frac{A_{s,calc}}{A_{s,ef}} \geq \ell_{b,mín} \quad \text{Eq. 63}$$

$\alpha = 1,0$ para barras sem gancho;

$\alpha = 0,7$ para barras tracionadas com gancho, com cobrimento no plano normal ao do gancho $\geq 3\phi$;

$\alpha = 0,7$ quando houver barras transversais soldadas conforme o item 9.4.2.2 da norma;

$\alpha = 0,5$ quando houver barras transversais soldadas conforme o item 9.4.2.2 da norma e gancho com cobrimento normal no plano normal ao do gancho $\geq 3\phi$;

ℓ_b = comprimento de ancoragem básico, mostrado na Tabela A-27 e Tabela A-28 (NBR 6118, 9.4.2.4);

$A_{s,calc}$ = área da armadura calculada;

$A_{s,ef}$ = área da armadura efetiva.

$$\ell_{b,min} \geq \begin{cases} 0,3 \ell_b \\ 10 \phi \\ 100 \text{ mm} \end{cases} \quad \text{Eq. 64}$$

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

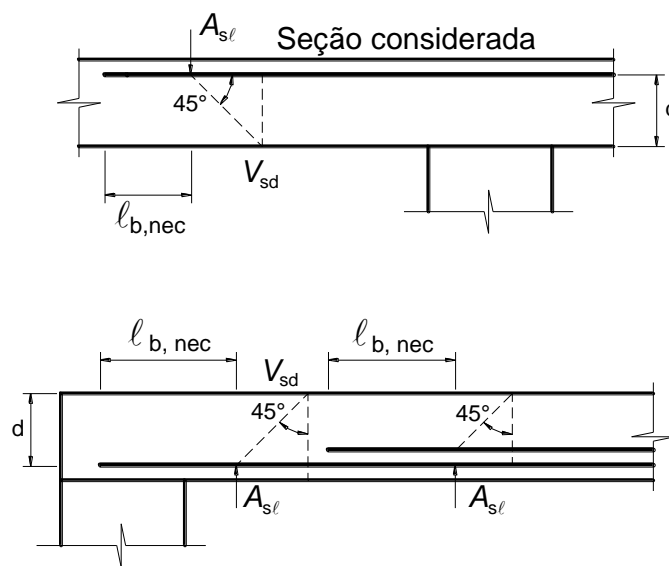


Figura 29 – Comprimento de ancoragem necessário para as armaduras nos apoios.

3.11.2.2 Lajes com Armadura para Força Cortante

No caso de se projetar a laje com armadura transversal para a força cortante, a NBR 6118 recomenda que sejam seguidos os critérios apresentados em 17.4.2, que trata do dimensionamento de vigas à força cortante, assunto que será estudado na disciplina Estruturas de Concreto II.

A tensão nos estribos deve ser (NBR 6118, 19.4.2): “A resistência dos estribos pode ser considerada com os seguintes valores máximos, sendo permitida interpolação linear:

- 250 MPa, para lajes com espessura até 15 cm;
- 435 MPa (f_{ywd}), para lajes com espessura maior que 35 cm.”

3.12 DETALHAMENTO DAS ARMADURAS

3.12.1 Armaduras Longitudinais Máximas e Mínimas

“Os princípios básicos para o estabelecimento de armaduras máximas e mínimas são os dados em 17.3.5.1. Como as lajes armadas nas duas direções têm outros mecanismos resistentes possíveis, os valores mínimos das armaduras positivas são reduzidos em relação aos definidos para elementos estruturais lineares.” (NBR 6118, 19.3.3.1).

a) armadura máxima

Sobre a armadura máxima, a NBR 6118 (17.3.5.2.4) diz que “A soma das armaduras de tração e de compressão ($A_s + A'_s$) não pode ter valor maior que 4 % A_c , calculada na região fora da zona de emendas, devendo ser garantidas as condições de ductilidade requeridas em 14.6.4.3.”

$$A_s + A'_s = 4 \% A_c$$

Eq. 65

b) armadura mínima

“Para melhorar o desempenho e a ductilidade à flexão, assim como controlar a fissuração, são necessários valores mínimos de armadura passiva [...]. Alternativamente, estes valores mínimos podem ser calculados com base no momento mínimo, conforme 17.3.5.2.1. Essa armadura deve ser constituída preferencialmente por barras com alta aderência ou por telas soldadas.” (NBR 6118, 19.3.3.2). Os valores mínimos para as armaduras são apresentados na Tabela 9. Os valores de ρ_{\min} encontram-se na Tabela 10.

Tabela 9 - Valores mínimos para armaduras passivas aderentes.

Armadura	Elementos estruturais sem armaduras ativas
Armaduras negativas	$\rho_s \geq \rho_{\min}$
Armaduras negativas de bordas sem continuidade	$\rho_s \geq 0,67\rho_{\min}$
Armaduras positivas de lajes armadas nas duas direções	$\rho_s \geq 0,67\rho_{\min}$
Armadura positiva (principal) de lajes armadas em uma direção	$\rho_s \geq \rho_{\min}$
Armadura positiva (secundária) de lajes armadas em uma direção	$A_s/s \geq 20 \%$ da armadura principal $A_s/s \geq 0,9 \text{ cm}^2/\text{m}$ $\rho_s \geq 0,5 \rho_{\min}$
$\rho_s = A_s/(b_w h)$ Os valores de ρ_{\min} constam da Tabela 10.	

Tabela 10 - Taxas mínimas (ρ_{\min} - %) de armadura de flexão para vigas e lajes.

Forma da seção	Valores de $\rho_{\min}^{(a)}$ (%)														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256
(a) Os valores de ρ_{\min} estabelecidos nesta Tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $d/h = 0,8$, $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, ρ_{\min} deve ser recalculado.															
$\rho_{\min} = A_{s,\min}/A_c$															

“Nos apoios de lajes que não apresentem continuidade com planos de lajes adjacentes e que tenham ligação com os elementos de apoio, deve-se dispor de armadura negativa de borda [...]. Essa armadura deve se estender até pelo menos 0,15 do vão menor da laje a partir da face do apoio.” (NBR 6118, 19.3.3.2). A armadura a ser especificada está indicada na Tabela 9.

3.12.2 Diâmetro Máximo

“Qualquer barra da armadura de flexão deve ter diâmetro no máximo igual a $h/8$.” (NBR 6118, 20.1).

3.12.3 Espaçamentos Máximo e Mínimo

“As barras da armadura principal de flexão devem apresentar espaçamento no máximo igual a $2h$ ou 20 cm, prevalecendo o menor desses dois valores na região dos maiores momentos fletores.” (NBR 6118, 20.1).

$$\leq \begin{cases} 2h \\ 20 \text{ cm} \end{cases}$$

Eq. 66

Obs.: “As armaduras devem ser detalhadas no projeto de forma que, durante a execução, seja garantido o seu posicionamento durante a concretagem.”

“Nas lajes armadas em uma ou em duas direções, em que seja dispensada armadura transversal de acordo com 19.4.1, e quando não houver avaliação explícita dos acréscimos das armaduras decorrentes da presença dos momentos volventes nas lajes, toda a armadura positiva deve ser levada até os apoios, não se permitindo escalonamento desta armadura. A armadura deve ser prolongada no mínimo 4 cm além do eixo teórico do apoio.”

“A armadura secundária de flexão deve ser igual ou superior a 20 % da armadura principal, mantendo-se, ainda, um espaçamento entre barras de no máximo 33 cm. A emenda dessas barras deve respeitar os mesmos critérios de emenda das barras da armadura principal.” Ver a Tabela 9.

A norma não especifica valores para o espaçamento mínimo. A rigor, pode-se adotar o valor recomendado para as barras de uma mesma camada horizontal das armaduras longitudinais das vigas:

$$a_{h,\text{mín}} \geq \begin{cases} 2 \text{ cm} \\ \phi_\ell \\ 1,2 d_{\text{máxagr}} \end{cases} \quad \text{Eq. 67}$$

Deve-se considerar também que o espaçamento mínimo deve ser aquele que não dificulte a disposição e amarração das barras da armadura, o completo preenchimento da peça pelo concreto e o envolvimento das barras pelo concreto. De modo geral, na prática adotam-se espaçamentos entre barras superiores a 7 ou 8 cm.

A norma também não especifica o diâmetro mínimo para a armadura negativa das lajes. No entanto, normalmente considera-se que o diâmetro deva ser de no mínimo 6,3 mm, a fim de evitar que a barra possa se deformar durante as atividades de execução da laje. Barras de diâmetros maiores ficam menos sujeitas a entortamentos, além de levarem a espaçamentos maiores sobre as vigas. Portanto, barras com diâmetros de 8 e 10 mm são mais indicadas para a armadura negativa.

3.12.4 Bordas Livres e Aberturas

“As bordas livres e as faces das lajes maciças junto as aberturas devem ser adequadamente protegidas por armaduras transversais e longitudinais. Os detalhes típicos sugeridos para armadura complementar mostrados na Figura 20.1 são indicativos e devem ser adequados em cada situação, considerando a dimensão e o posicionamento das aberturas, o carregamento aplicado nas lajes e a quantidade de barras que está sendo interrompida pelas aberturas.” (NBR 6118, 20.2). A Figura 32 mostra as indicações da norma.

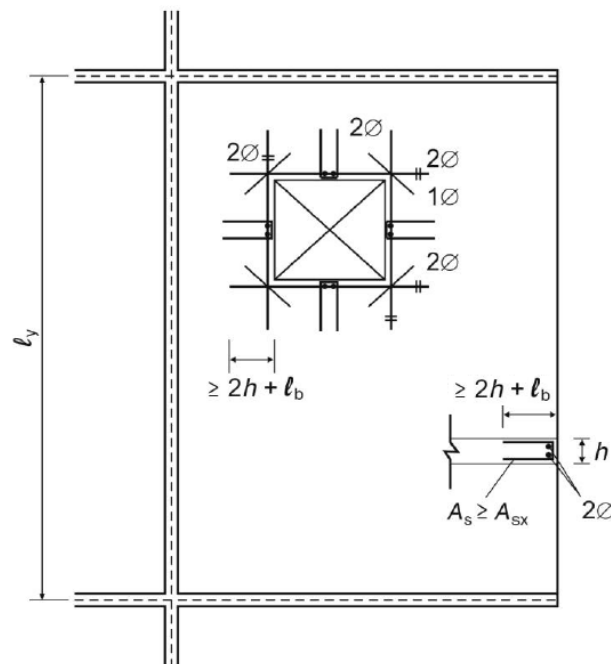


Figura 30 – Bordas livres e aberturas das lajes maciças.

Relativamente a aberturas que atravessam lajes na direção de sua espessura, a NBR 6118 (item 13.2.5.2) também prescreve que “Em lajes lisas ou lajes-cogumelo, a verificação de resistência e deformação previstas em 13.2.5 deve sempre ser realizada. Lajes de outros tipos podem ser dispensadas dessa verificação, quando armadas em duas direções e sendo verificadas, simultaneamente, as seguintes condições:

- a) as dimensões da abertura devem corresponder no máximo a 1/10 do vão menor (ℓ_x);
 b) a distância entre a face de uma abertura e o eixo teórico de apoio da laje deve ser igual ou maior que 1/4 do vão, na direção considerada; e
 c) a distância entre faces de aberturas adjacentes deve ser maior que a metade do menor vão.”

A Figura 31 mostra as especificações da norma.

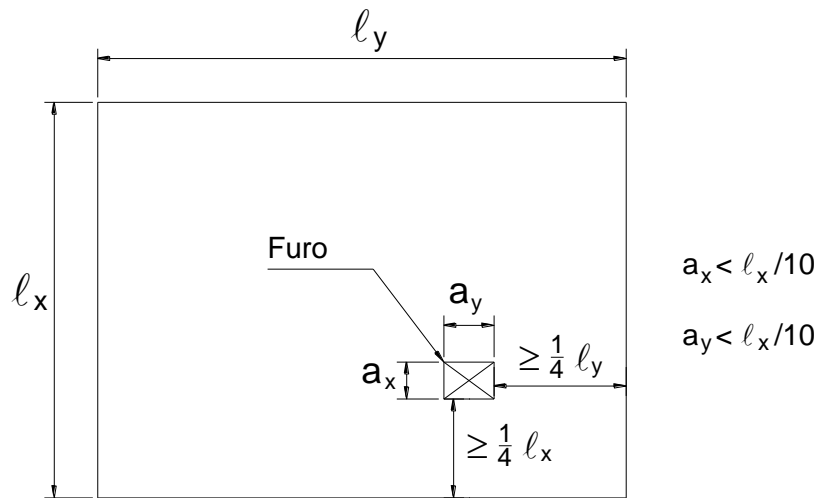


Figura 31 – Dimensões limites para aberturas de lajes com dispensa de verificação.

3.12.5 Comprimento da Armadura Negativa nos Apoios com Continuidade de Lajes

A NBR 6118 não especifica o comprimento das barras da armadura negativa. Por este motivo será adotado o critério recomendado na versão da norma NB 1 de 1978. É suposto um diagrama triangular para o momento fletor negativo sobre a borda comum às duas lajes, como mostrado na Figura 32. O triângulo tem a base com comprimento $(2 \cdot 0,25\ell_x)$, onde ℓ_x é o maior vão entre os vãos menores das duas lajes:

$$\ell_x \geq \begin{cases} \ell_{x1} \\ \ell_{x2} \end{cases} \quad \text{Eq. 68}$$

A armadura negativa deve estender-se o comprimento de ancoragem básico (ℓ_b) além da seção de momento fletor nulo, como indicado na Figura 32. Na Tabela A-27 e Tabela A-28 anexas encontram-se os comprimentos de ancoragem para os aços CA-50 e CA-60 em função da resistência do concreto. O comprimento de ancoragem deve ser considerado com gancho, porque geralmente faz-se o gancho nas extremidades das barras.

Na Figura 32 estão mostrados três arranjos diferentes para as barras da armadura negativa. O arranjo de número 1 é o mais simples, porém, conduz ao maior consumo de aço, e os arranjos 2 e 3 são mais econômicos. Na prática, de modo geral, o arranjo 3 tem a preferência porque as barras são idênticas, variando-se apenas o seu ponto de início.

O comprimento total para a barra negativa do arranjo 3 é:

$$C = 1,5(0,25\ell_x + \ell_b) + \ell_{\text{ganchos}} \quad \text{Eq. 69}$$

ℓ_x = vão da laje conforme definido na Eq. 68;

ℓ_b = comprimento de ancoragem básico (ver Tabela A-27 e Tabela A-28);

ℓ_{ganchos} = comprimento dos ganchos nas extremidades da barra.

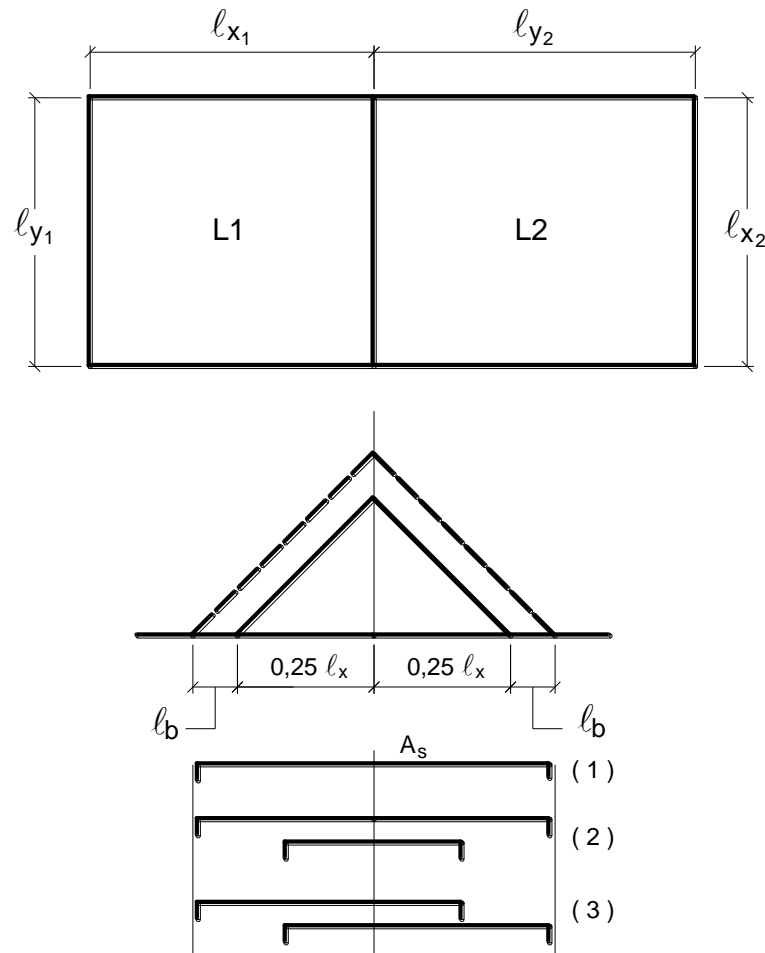


Figura 32 – Extensão da armadura negativa nos apoios com continuidade entre lajes.

3.12.6 Comprimento da Armadura Positiva

A NBR 6118 (20.1) apresenta que “Nas lajes armadas em uma ou em duas direções, em que seja dispensada armadura transversal de acordo com 19.4.1, e quando não houver avaliação explícita dos acréscimos das armaduras decorrentes da presença dos momentos volventes nas lajes, toda a armadura positiva deve ser levada até os apoios, não se permitindo escalonamento desta armadura. A armadura deve ser prolongada no mínimo 4 cm além do eixo teórico do apoio.”

No caso de laje com quatro bordas engastadas, onde não ocorrem momentos volventes, pode-se fazer o detalhamento das armaduras positivas conforme indicado na Figura 33, que é um detalhamento tradicional. Ou como opção e de modo a simplificar, estender todas as barras até os apoios.

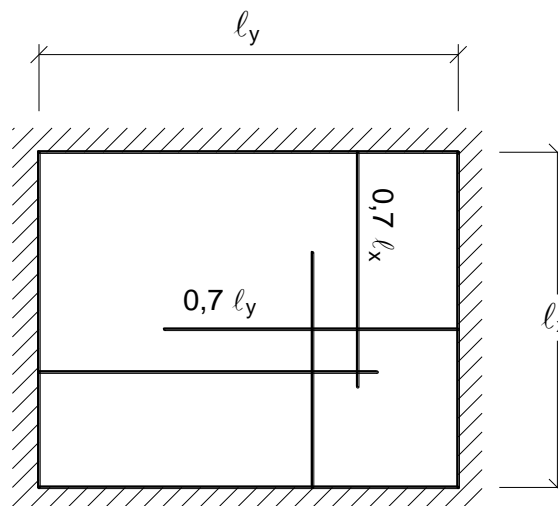


Figura 33 – Comprimento mínimo das barras da armadura positiva em lajes com quatro bordas engastadas.

3.12.7 Armaduras Complementares

Em LENHARD e MÖNNIG (1982) encontram-se alguns detalhes construtivos de armaduras de lajes, descritos a seguir.

a) Lajes apoiadas em uma só direção.

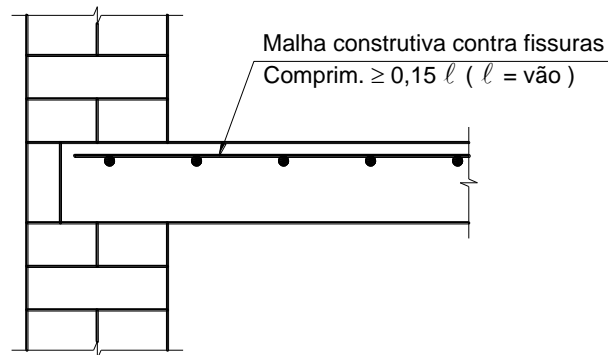


Figura 34 – Detalhe da armadura para apoio externo.

b) Armadura construtiva entre laje e viga de apoio para diminuir as fissuras na ligação.

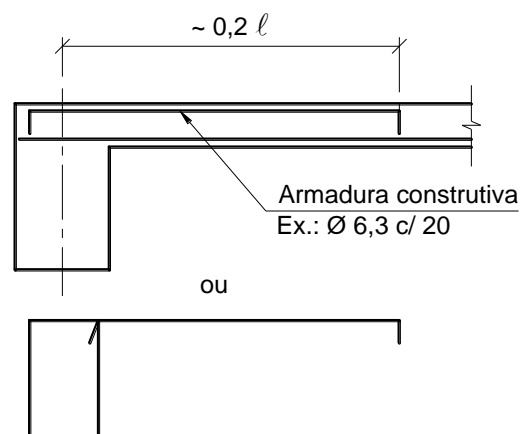


Figura 35 – Armadura construtiva na ligação laje-viga.

c) Apoio paralelo à direção do vão, não considerado estaticamente

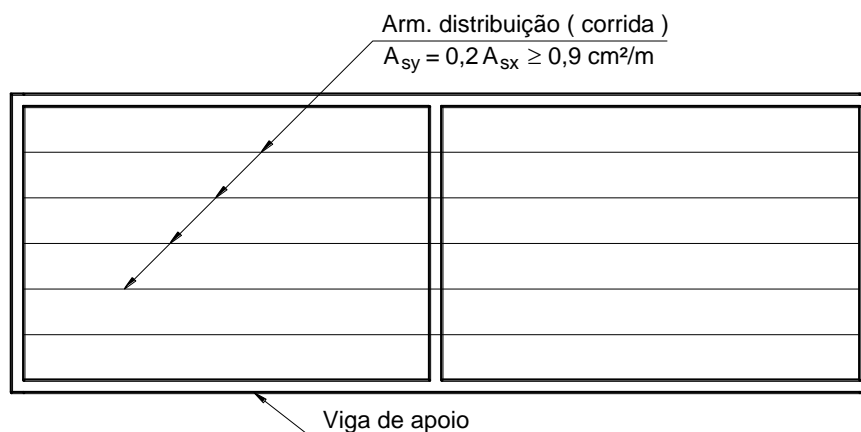


Figura 36 – Armadura de distribuição positiva.

3.16.2 Cálculo das Ações

Tabela 14 - Ações nas lajes (kN/m^2).

Laje	h (cm)	g_{pp}	Revest. forro	Revest. piso	Paredes	Perman. total	C.Variável	Total

3.16.3 Verificação das Flechas

Tabela 15 - Cálculo das flechas.

Laje	Tipo	l_x (cm)	λ	g (kN/m^2)	q (kN/m^2)	$\psi_2 q$ (kN/m^2)	$p = g + \psi_2 q$ (kN/m^2)	h (cm)	M_r (kNcm)	M_a (kNcm)	α	EI (kN/m^2)	a_i (cm)	a_t (cm)

3.16.4 Reações nas Vigas

Tabela 16 - Reações nas vigas (kN/m).

Laje	Tipo	l_x (m)	λ	P (kN/m^2)	V_x	V'_x	V_y	V'_y

As reações das lajes sobre as vigas devem ser colocadas num desenho esquemático da planta de fôrma da estrutura.

3.16.5 Momentos Fletores e Dimensionamento

Tabela 17 - Cálculo dos momentos fletores ($kN.cm$).

Laje	Tipo	l_x (m)	λ	P (kN/m^2)	M_x	M'_x	M_y	M'_y

Calculados os momentos, estes devem ser plotados num desenho esquemático da planta de fôrma (Figura 38).

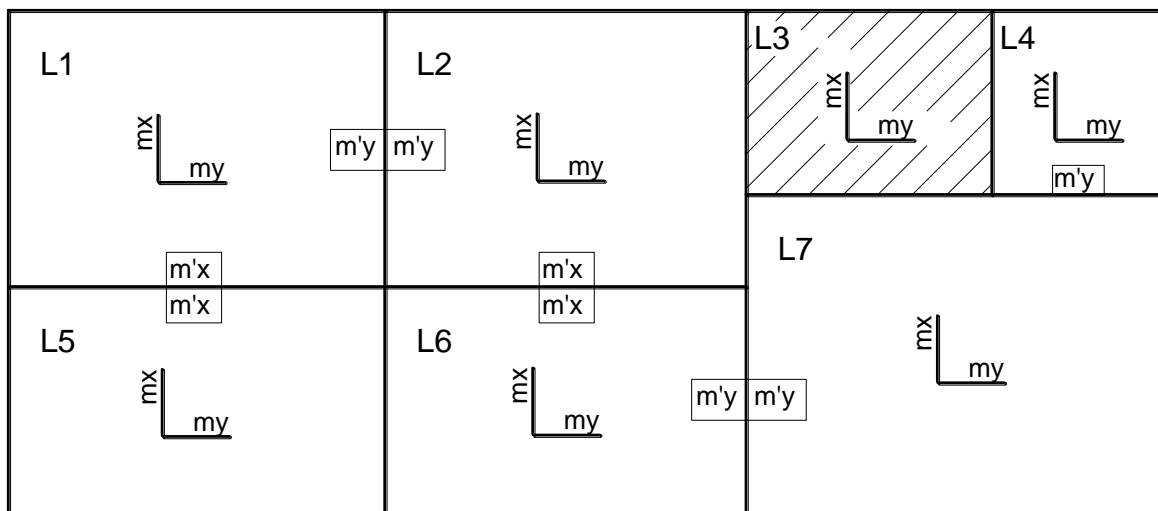


Figura 38 – Esquema de plotagem dos momentos fletores.

Em seguida, faz-se a compatibilização dos momentos positivos e negativos. Os resultados finais dos momentos devem ser plotados num outro desenho da planta de fôrma.

Com os resultados dos momentos finais, faz-se o dimensionamento das armaduras positivas e negativas. As armaduras calculadas (A_s) são plotadas junto aos momentos finais. Em seguida, o próximo passo é detalhar as armaduras na planta de fôrma.

3.17 LAJE MACIÇA RETANGULAR COM UMA BORDA LIVRE

As lajes maciças retangulares com uma borda livre são particularmente importantes no projeto das escadas, marquises e outros casos. A Figura 39 mostra as direções dos momentos principais (m_1 e m_2) atuantes em lajes retangulares apoiadas em três lados com uma borda livre, sob a ação de carga uniformemente distribuída.

As direções dos momentos principais dependem muito da relação l_y/l_x , como se pode verificar na Figura 40. Para relações entre lados $l_y/l_x < 0,5$, os momentos volventes (M_{xy}) (também chamados momentos de torção), são maiores que o momento no meio da borda livre (M_r). Nessas lajes, portanto, deve ser disposta uma armadura de canto suficiente e uma ancoragem segura contra a força que tende a levantar o canto. Na borda livre, a armadura inferior deve ter um espaçamento menor que no resto do vão, e a borda livre deve ser protegida com uma armadura em forma de estribo (conforme a Figura 43).

Lajes com $l_y/l_x > 1,5$, podem ser consideradas como apoiadas em uma direção, na região $y > l_x$.

O anexo no final deste texto apresenta a Tabela A-11, Tabela A-12, Tabela A-16 e Tabela A-17 para cálculo dos momentos fletores em lajes com uma borda livre, para alguns casos de vinculação, que não abrangem todos os casos possíveis.

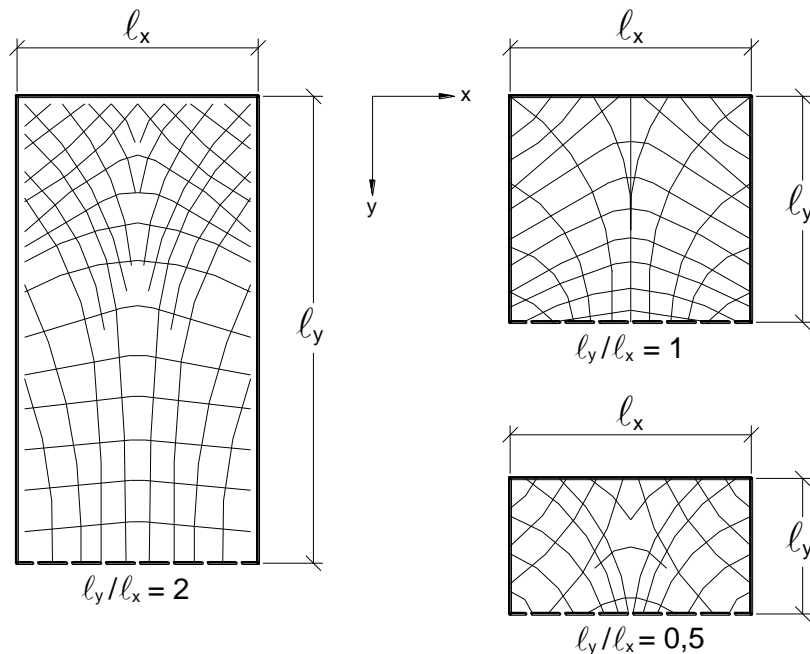


Figura 39 – Momentos principais nas lajes apoiadas em três lados com uma borda livre.

A Tabela A-18 até a Tabela A-23, extraídas de ROCHA (1987) e de HAHN (1966), possibilitam o cálculo das flechas e dos momentos fletores com carga uniforme e carga triangular. A Tabela A-24 possibilita o cálculo das reações de apoio somente para o caso de carregamento uniforme.

A notação para os momentos fletores é a seguinte:

- M_x e M_y - momentos positivos no centro, nas direções x e y respectivamente;
- M_r - momento positivo no centro da borda livre, na direção x;
- X_x e X_y - momentos negativos no centro da borda engastada, nas direções x e y respectivamente;
- X_r - momento negativo no extremo da borda livre na direção x;
- M_{xy} - momento volvente nos cantos.

As equações a empregar estão indicadas na Tabela A-18 até a Tabela A-23. Os valores de P são os seguintes:

a) carga uniforme na área:

$$P = F \ell_x \ell_y \quad \text{Eq. 70}$$

b) carga concentrada uniforme na borda livre:

$$P = F_1 \ell_x \quad \text{Eq. 71}$$

d) momento T uniforme na borda livre:

$$P = T \quad \text{Eq. 72}$$

F = carga uniforme distribuída na área da laje (kN/m²) ou valor máximo da carga triangular;

F₁ = carga concentrada uniforme aplicada na borda livre (kN/m);

T = momento fletor na borda livre (kN.m);

ℓ_x = vão paralelo à borda livre.

A Tabela A-24, como comentado, serve para cálculo das reações de apoio para carga distribuída uniforme na área da laje. Em função das vinculações, cada tipo de laje tem um número indicativo. As posições das reações estão indicadas nos esquemas das lajes. As fórmulas também estão indicadas, sendo **p** o valor da carga uniforme distribuída na área da laje.

A Figura 40 mostra a forma como se distribuem as reações, notando-se a existência das reações concentradas R, negativas, que tendem a levantar os cantos A e B.

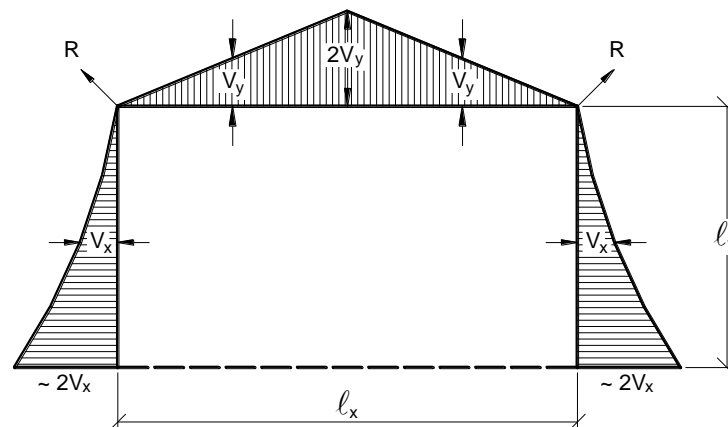


Figura 40 – Reações da laje sobre três apoios.

A reação negativa nos cantos vale:

$$R = 2 M_{xy} \quad \text{Eq. 73}$$

Nos cantos, deve haver garantia contra o seu levantamento. Se a laje estiver ligada a vigas, ou se houver pilares nos cantos A e B, ela estará suficientemente ancorada.

Em ROCHA (1987), itens 2.10.5 e 2.10.6 encontram-se exemplos resolvidos.

3.17.1 Detalhamento das Armaduras

Em LEONHARDT e MÖNNIG (1982), encontram-se os detalhamentos das armaduras das lajes com uma borda livre, em função do tipo de vinculação nos apoios.

3.17.1.1 Lajes com Três Bordas Apoiadas

As Figura 41 e Figura 42 ilustram as armaduras a serem dispostas nessas lajes. Nos cantos da laje devem ser dimensionadas armaduras para o momento volvente M_{xy} . Como uma alternativa para simplificar a armadura de canto pode ser feita a simplificação indicada na Figura 42. Nas bordas livres deve ser feito o detalhamento indicado na Figura 44.

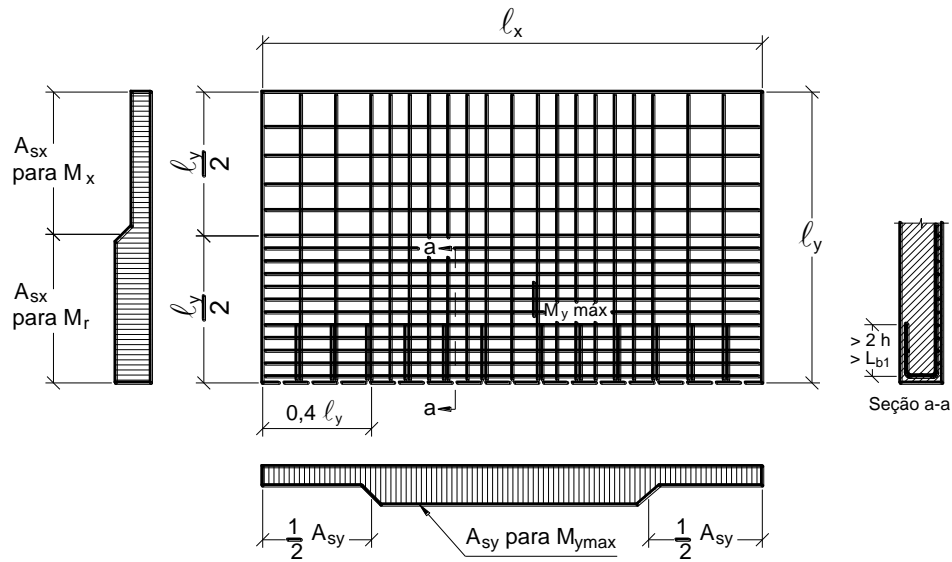


Figura 41 – Armadura de lajes retangulares com apoios simples em três lados para carga uniforme.

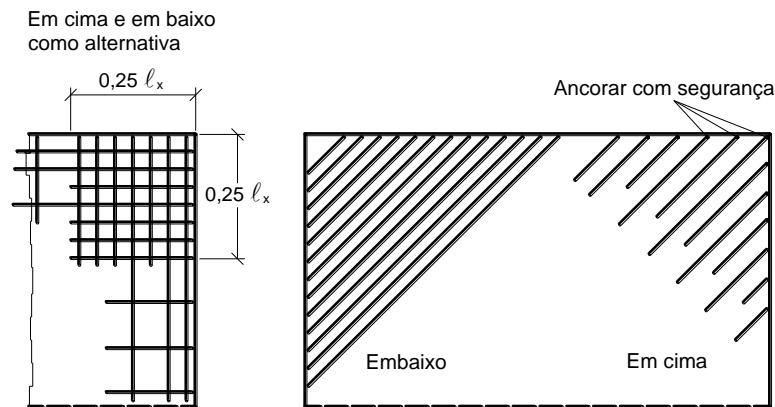


Figura 42 – Armadura para os momentos volventes nos cantos.

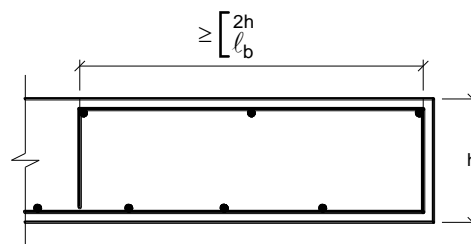


Figura 43 – Detalhe da armadura na borda livre.

3.17.1.2 Lajes com Três Bordas Engastadas

Nesse caso, são pequenos os momentos volventes nos cantos. As armaduras positivas ao longo do vão (Figura 44) e negativas das bordas engastadas (Figura 45) são dispostas de modo semelhante ao das lajes apoiadas em todo contorno. Na borda livre, ambas as armaduras devem ser reforçadas, conforme mostrado na Figura 43.

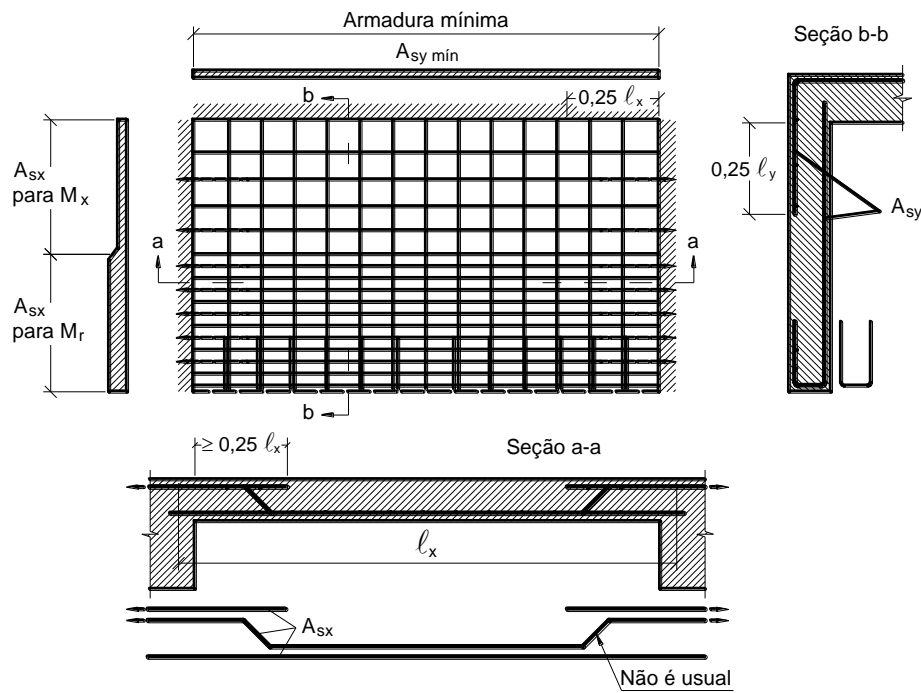


Figura 44 – Armadura inferior de laje retangular apoiada em três lados engastados com carga uniforme.

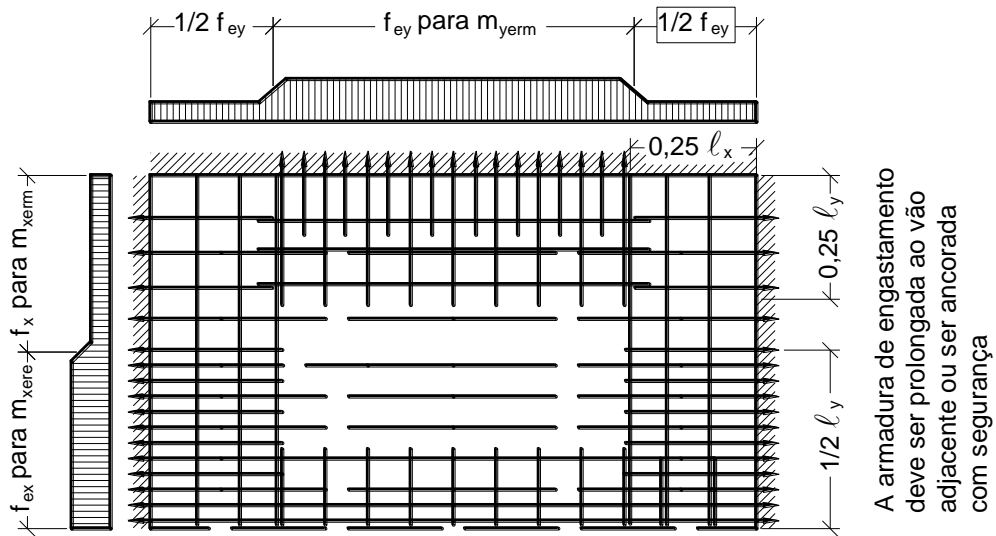


Figura 45 – Armadura superior de laje retangular apoiada em três lados engastados com carga uniforme.

3.17.2 Exemplo Numérico de Aplicação

Considerando a laje da Figura 46, calcular os esforços solicitantes. Dado: $F = 6,0 \text{ kN/m}^2$ (carga total uniformemente distribuída na área).

RESOLUÇÃO

$$\lambda = \frac{l_y}{l_x} = \frac{4,5}{3,0} = 1,5$$

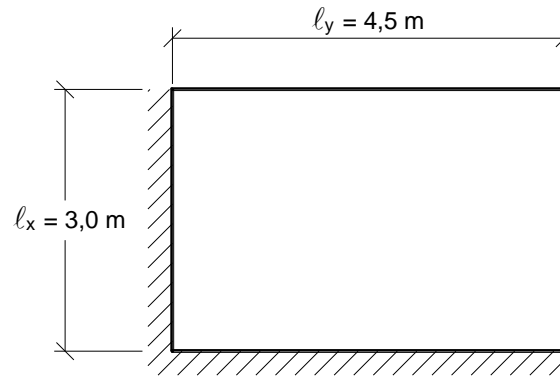


Figura 46 – Dimensões e vinculações da laje.

Da Tabela A-22, para a carga 1 (uniforme na área) tem-se os coeficientes:

$$\begin{array}{lll} m_r = 22,5 & m_y = 130 & - n_x = 14,1 \\ m_x = 27,6 & - n_r = 11,2 & - n_y = 19,3 \end{array}$$

a) Cálculo dos momentos fletores

$$P = F \cdot l_x \cdot l_y = 6,0 \cdot 3,0 \cdot 4,5 = 81,0 \text{ kN}$$

$$M_r = \frac{P}{m_r} = \frac{81,0}{22,5} = 3,60 \text{ kN.m} = 360 \text{ kN.cm}$$

$$M_x = \frac{P}{m_x} = \frac{81,0}{27,6} = 2,93 \text{ kN.m} = 293 \text{ kN.cm}$$

$$M_y = \frac{P}{m_y} = \frac{81,0}{130} = 0,62 \text{ kN.m} = 62 \text{ kN.cm}$$

$$X_r = -\frac{P}{n_r} = -\frac{81,0}{11,2} = -7,23 \text{ kN.m} = -723 \text{ kN.cm}$$

$$X_x = -\frac{P}{n_x} = -\frac{81,0}{14,1} = -5,74 \text{ kN.m} = -574 \text{ kN.cm}$$

$$X_y = -\frac{P}{n_y} = -\frac{81,0}{19,3} = -4,20 \text{ kN.m} = -420 \text{ kN.cm}$$

Devido aos lados engastados, o momento volvente M_{xy} é pequeno nesta laje e não precisa ser considerado. A Figura 47 mostra os momentos fletores plotados na laje.

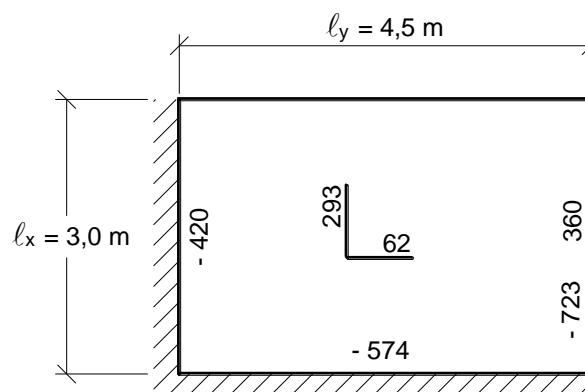


Figura 47 – Momentos fletores (kN.cm).

b) Reações de apoio

Conforme a Tabela A-24, tem-se o caso A-25 de vinculação. Os coeficientes tabelados são:

$$V_{x1} = 0,50$$

$$V_{x2} = 0,28$$

$$V_y = 0,22$$

As reações são:

$$R_{x1} = pL_x V_{x1} = 6,0 \cdot 3,0 \cdot 0,50 = 9,0 \text{ kN/m}$$

$$R_{x2} = pL_x V_{x2} = 6,0 \cdot 3,0 \cdot 0,28 = 5,0 \text{ kN/m}$$

$$R_y = pL_y V_y = 6,0 \cdot 4,5 \cdot 0,22 = 5,9 \text{ kN/m}$$

A Figura 48 apresenta as reações de apoio plotadas no desenho da laje. Verificação:

$$R_{\text{result}} = (5,0 + 9,0) \cdot 4,5 + 5,9 \cdot 3,0 = 80,7 \text{ kN} \sim 81,0 \text{ kN}$$

Se o cálculo for feito conforme indica a NB6118/03 (por áreas de influência), os valores são:

$$R_{x1} = 9,0 \text{ kN} \quad ; \quad R_{x2} = 5,2 \text{ kN} \quad ; \quad R_y = 5,7 \text{ kN}$$

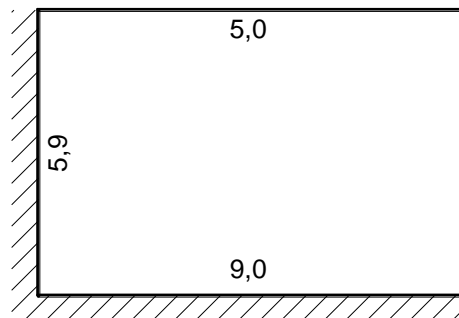


Figura 48 – Reações de apoio (kN/m).

3.18 EXEMPLO NUMÉRICO DE CÁLCULO DE LAJES MACIÇAS DE UMA EDIFICAÇÃO

Na Figura 49 está mostrada a planta de arquitetura simplificada do apartamento de um pavimento, com a disposição das paredes divisórias de alvenaria. Na Figura 50 está mostrada uma planta de fôrma também simplificada da estrutura do pavimento. O objetivo deste exemplo é ilustrar os cálculos manuais que devem ser feitos para o dimensionamento das lajes maciças do pavimento.

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

- espessura média de 3 cm para o contrapiso (camada de regularização), e peso específico da argamassa ($\gamma_{\text{arg,contr}}$) de 21 kN/m^3 ;
- espessura média de 2 cm para o revestimento da face inferior das lajes, e peso específico da argamassa ($\gamma_{\text{arg,rev}}$) de 19 kN/m^3 ;
- piso final com peças cerâmicas de peso específico $0,15 \text{ kN/m}^2$, em toda a área de piso do pavimento;
- paredes com blocos cerâmicos com furos horizontais de dimensões $9 \times 19 \times 19 \text{ cm}$, com peso específico (γ_{alv}) de 13 kN/m^3 . Todas as paredes externas têm espessura final de 23 cm e todas as paredes internas têm espessura final de 13 cm;
- altura de 2,8 m para as paredes;
- conforme a Tabela 3 a carga variável na laje L1 em balanço é $q = 2,5 \text{ kN/m}^2$ (varanda com acesso público), e as demais lajes ver Tabela 3 ou Tabela 10 da NBR 6120;
- concreto C25 com brita 1 de granito, aços CA-50 e CA-60;
- todas as vigas com largura de 20 cm;
- Classe de Agressividade Ambiental II;
- espessura mínima do cobrimento $c = 2,0 \text{ cm}$, com $\Delta c = 5 \text{ mm}$ (ver Tabela 5);
- coeficientes de ponderação $\gamma_c = \gamma_f = 1,4$; $\gamma_s = 1,15$.



Figura 49 – Planta arquitetônica simplificada do pavimento.

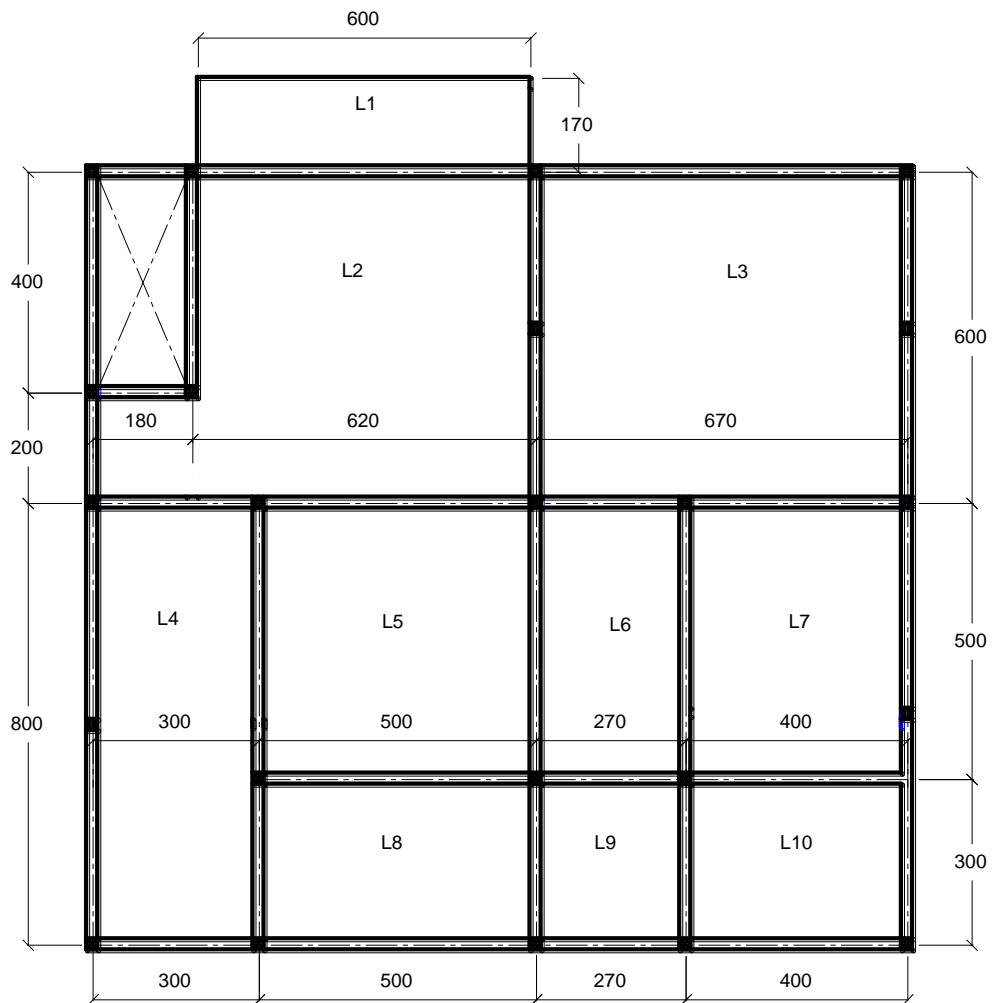


Figura 50 – Planta de fôrma simplificada da estrutura do pavimento.

3.18.1 Vãos Efetivos e Vinculação nas Bordas

Para cálculo dos vãos efetivos é necessário conhecer a altura das lajes, o vão livre nas duas direções e a largura das vigas de apoio. Por outro lado, para estimativa da altura das lajes, conforme a Eq. 15, é preciso conhecer os vãos efetivos. Para resolver o problema será adotada inicialmente a altura de 10 cm para todas as lajes. Considerando que a largura de todas as vigas de apoio é de 20 cm, os vãos efetivos (Eq. 3 e Eq. 4) nas duas direções das lajes serão os vãos livres acrescidos dos valores:

$$a_1 = a_2 \leq \begin{cases} t_1/2 = 20/2 = 10 \text{ cm} \\ 0,3h = 0,3 \cdot 10 = 3 \text{ cm} \end{cases} \rightarrow a_1 = a_2 = 3 \text{ cm}$$

Portanto: $\ell_{ef} = \ell_0 + a_1 + a_2 = \ell_0 + 6 \text{ cm}$

Os vãos efetivos de todas as lajes estão mostrados na Tabela 18, bem como a relação λ (ℓ_y / ℓ_x) entre os lados e o tipo de laje.

Tabela 18 - Vãos efetivos das lajes (cm).

Laje	ℓ_x	ℓ_y	λ	Tipo	Observação
L1	163	600	3,68	-	laje armada em uma direção
L2	586	606	1,03	3	
L3	586	656	1,12	3	
L4	286	786	2,75	-	laje armada em uma direção
L5	486	486	1,00	6	
L6	256	486	1,90	6	
L7	386	486	1,26	5A	
L8	286	486	1,70	5A	
L9	256	286	1,12	5B	
L10	286	386	1,35	3	

Admitem-se dois tipos de vínculos das lajes nas bordas: apoio simples ou engaste perfeito. No caso do pavimento deste exemplo todas as lajes encontram-se apoiadas nas bordas superiores das vigas, ou seja, nenhuma das lajes está rebaixada. Além disso, as superfícies superiores de todas as lajes encontram-se no mesmo nível. Sendo assim, as lajes serão consideradas contínuas umas com as outras. Os vínculos nas bordas e o tipo de laje para as dez lajes do pavimento estão mostrados na Figura 51. A laje L1, em balanço, está engastada na laje L2, no entanto, a laje L2 não pode ser considerada engastada na laje L1 por esta estar em balanço.

3.18.2 Pré-Dimensionamento da Altura das Lajes

A estimativa da altura útil das lajes pode ser feita com a Eq. 15: $d \cong (2,5 - 0,1 n) \ell^*$

A Tabela 19 mostra as alturas calculadas, tomadas como $h = d + c + \phi_l/2 = d + 2,0 + 1,0/2 = d + 2,5$ cm. O valor resultante para h foi arredondado para o inteiro mais próximo, considerando que a altura mínima é de 8 cm para lajes de piso não em balanço. Exemplo de cálculo para a laje L3:

$$d = (2,5 - 0,1 \cdot 2) 4,59 = 10,6 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad h = d + 2,5 = 10,6 + 2,5 = 13,1 \text{ cm}$$

portanto, $h = 13 \text{ cm}$.

Lajes em balanço não têm a altura estimada com a Eq. 15, por isso a altura da laje L1 será adotada igual a 12 cm. A altura mínima especificada pela NBR 6118 para laje de piso em balanço é de 10 cm.

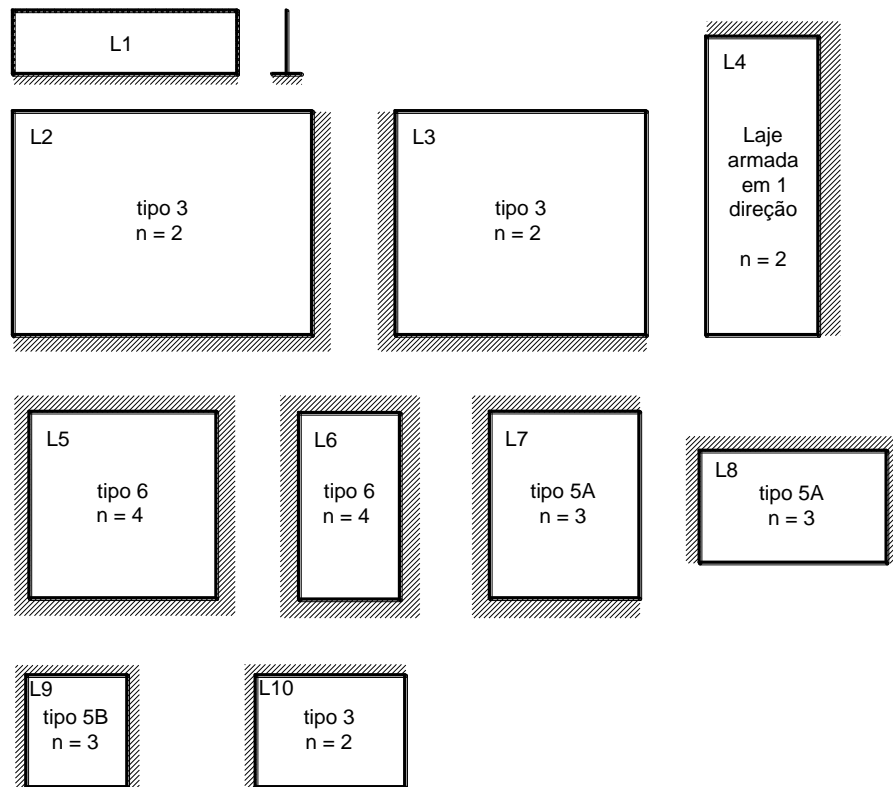


Figura 51 – Vínculos das lajes nas vigas de borda.

Tabela 19 - Pré-dimensionamento da altura das lajes.

Laje	ℓ_x (cm)	ℓ_y (cm)	λ	$0,7\ell_y$ (cm)	ℓ^* (m)	n	d (cm)	h^d (cm)
L2 ^{a)}	586	606	1,03	424	4,24	2 ^{b)}	9,8	12
L3	586	656	1,12	459	4,59	2	10,6	13
L4	286	786	2,75	550	2,86	2	6,6	9
L5	486	486	1,00	340	3,40	4	7,1	10
L6	256	486	1,90	340	2,56	4	5,4	8
L7	386	486	1,26	340	3,40	3	7,5	10
L8	286	486	1,70	340	2,86	3	6,3	9
L9	256	286	1,12	200	2,00	3	4,4	8 ^{c)}
L10	286	386	1,35	270	2,70	2	6,2	9

NOTAS:

- a laje L2 foi considerada de maneira simplificada com forma retangular, sem o hall de entrada ao lado da escada. Assim pode ser feito porque o hall tem uma área muito pequena se comparada à área restante da laje;
- não ocorre continuidade da laje L2 com a escada, de modo que o número de bordas engastadas (n) é 2, como mostrado na Figura 51. A laje L2 não pode ser considerada engastada na laje L1, porque esta laje está em balanço. A laje L1 deve estar engastada em um elemento estrutural, e no caso está engastada na laje L2, o que é possível porque as superfícies superiores das duas lajes está no mesmo nível, o que possibilita o correto posicionamento da armadura negativa da laje L1, avançando no interior da laje L2;
- para a laje L9 a altura resultou 7 cm, no entanto foi adotada a altura mínima especificada pela norma, de 8 cm;
- após ser feita a determinação das alturas das lajes deve-se analisar os resultados, visando uniformizar as alturas, para simplificar o cálculo e a execução. No exemplo, a laje L3 poderia ser considerada com altura igual à da laje L2, de 12 cm, ou a laje L2 ser feita com 13 cm, como a laje L3. As demais lajes (L4 a L10) poderiam ter uma altura única, uniformizada, como 9 ou 10 cm. As flechas resultantes e as quantidades de armadura das lajes mostrarão se a altura adotada foi suficiente. No caso de não ser, a altura de uma laje específica poder ser alterada. Neste exemplo não será feita a uniformização das alturas das lajes.

3.18.3 Cálculo das Ações Atuantes

O cálculo das ações atuantes nas lajes fica facilitado com o auxílio da Tabela 20. Para o carregamento total (p) nas lajes devem ser consideradas todas as ações possíveis, como: peso próprio, revestimento do lado inferior da laje, contrapiso (argamassa de regularização sobre a laje), paredes, cargas variáveis e todas as demais porventura existentes. As cargas variáveis (q) foram tomadas na Tabela 10 da NBR 6120 (e na Tabela 3 deste texto), conforme a utilização de cada laje, prevista no projeto arquitetônico.

Tabela 20 - Ações nas lajes (kN/m^2).

Laje	h (cm)	Peso próprio	Revest. inferior ⁵⁾	Revest. piso ¹⁾	Parede ⁷⁾ (g_{par})	Perman. total (g_{tot})	Carga Variável (q)	Total ($p = g_{tot} + q$)
L1	12	3,00	0,38	0,78	0,17 ³⁾	4,33	2,5	6,83
L2	12 ⁶⁾	3,00	0,38	0,78	0,12	4,28	1,5	5,78
L3	13	3,25	0,38	0,78	0,67	5,08	1,5	6,58
L4 ⁴⁾	9	2,25	0,38	0,78	-	3,41	2,0 ²⁾	5,41
					1,65	5,06	2,0 ²⁾	7,06
L5	10	2,50	0,38	0,78	1,74	5,40	1,5	6,90
L6	8	2,00	0,38	0,78	1,58	4,74	1,5	6,24
L7	10	2,50	0,38	0,78	0,97	4,63	1,5	6,13
L8	9	2,25	0,38	0,78	0,97	4,38	1,5	5,88
L9	8	2,00	0,38	0,78	3,70	6,86	1,5	8,36
L10	9	2,25	0,38	0,78	-	3,41	1,5	4,91

Observações:

- 1) as cargas permanentes do contrapiso e do piso encontram-se somadas: $g_{contr + piso} = 0,03 \cdot 21 + 0,15 = 0,78 \text{ kN/m}^2$, onde $e_{contr} = 3 \text{ cm}$, $\gamma_{arg,contr} = 21 \text{ kN/m}^3$ e piso final cerâmico com $0,15 \text{ kN/m}^2$;
- 2) a laje L4 compõe a cozinha e a área de serviço, com cargas variáveis de $1,5 \text{ kN/m}^2$ e $2,0 \text{ kN/m}^2$, respectivamente. Como uma simplificação a favor da segurança foi adotada a carga de $2,0 \text{ kN/m}^2$ para toda a área da laje;
- 3) a laje em balanço L1 não tem parede sobre ela, mas tem um gradil de parapeito ao longo de suas três bordas livres, com carga adotada neste caso de $50 \text{ kgf/m} = 0,5 \text{ kN/m}$. A carga do gradil ao longo da borda livre com comprimento de 6 m deve ser computada como força concentrada na extremidade livre da viga que representa a laje, e será considerada quando do cálculo dos esforços solicitantes na laje (ver Figura 53). A carga do gradil apoiado sobre as duas bordas livres menores pode ser simplificadamente distribuída na área da laje, e somada às demais cargas atuantes na área da laje. Essa carga do gradil na área é: $2 (0,5 \cdot 1,63) / (1,63 \cdot 6,0) = 0,17 \text{ kN/m}^2$, onde 1,63 m é o comprimento estimado para o gradil (tomado igual a ℓ_x).
- 4) a laje L4 foi dividida em duas regiões, uma com carga de parede e outra sem carga de parede;
- 5) carga do revestimento inferior das lajes: $g_{rev,inf} = 0,02 \cdot 19 = 0,38 \text{ kN/m}^2$, com $e_{rev,inf} = 2 \text{ cm}$ e $\gamma_{arg,rev} = 19 \text{ kN/m}^3$;
- 6) carga do peso próprio da laje L2: $g_{pp} = 0,12 \cdot 25 = 3,00 \text{ kN/m}^2$, com $h = 12 \text{ cm}$ e $\gamma_{concr} = 25 \text{ kN/m}^3$;
- 7) o cálculo das cargas das parede sobre as lajes estão mostrados abaixo.

A Figura 52 mostra a planta arquitetônica sobreposta à planta de fôrma da estrutura, o que auxilia na visualização e no cálculo da carga das paredes sobre as lajes. A equação básica tomada para cálculo das cargas das paredes sobre as lajes é:

$$g_{par} = \frac{\gamma_{alv} \cdot e \cdot h \cdot \ell}{A_{laje}}$$

γ_{alv} = peso específico de bloco cerâmico de vedação com furos horizontais, tomado como 13 kN/m^3 ;

e = espessura final das paredes (blocos mais revestimento de argamassa nas duas faces), tomada como 13 cm (9 cm da largura do bloco cerâmico e 2 cm de revestimento em cada face);

h = altura de todas as paredes = 2,80 m;

ℓ = comprimento total de parede sobre a área da laje (não contados comprimentos de portas);

A_{laje} = área da laje, calculada com os vãos efetivos (ver Tabela 18).

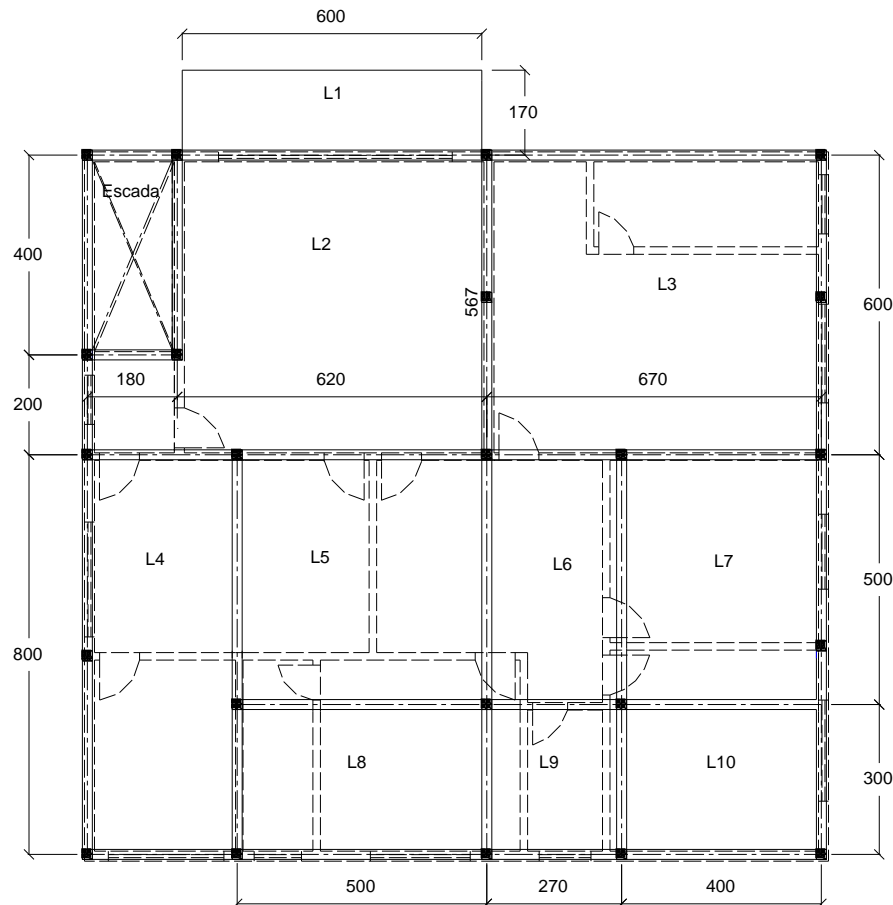


Figura 52 – Paredes sobrepostas na planta de fôrma da estrutura.

Exemplos de cálculo das cargas das paredes nas lajes:

a) Laje L2 ($\ell = 0,90$ m)

$$g_{\text{par}} = \frac{13 \cdot 0,13 \cdot 2,80 \cdot 0,90}{6,06 \cdot 5,86} = 0,12 \text{ kN/m}^2$$

b) Laje L3 ($\ell = 5,45$ m)

$$g_{\text{par}} = \frac{13 \cdot 0,13 \cdot 2,80 \cdot 5,45}{6,56 \cdot 5,86} = 0,67 \text{ kN/m}^2$$

c) Região da Laje L4 com carga de parede (conforme a Eq. 12) ($\ell = 1,90$ m)

$$g_{\text{par}} = \frac{3(13 \cdot 0,13 \cdot 2,80 \cdot 1,90)}{2 \cdot 2,86^2} = 1,65 \text{ kN/m}^2$$

d) Laje L5 ($\ell = 8,70$ m)

$$g_{\text{par}} = \frac{13 \cdot 0,13 \cdot 2,80 \cdot 8,70}{4,86 \cdot 4,86} = 1,74 \text{ kN/m}^2$$

e) Laje L6 ($\ell = 4,15$ m)

$$g_{\text{par}} = \frac{13 \cdot 0,13 \cdot 2,80 \cdot 4,15}{2,56 \cdot 4,86} = 1,58 \text{ kN/m}^2$$

f) Laje L7 ($\ell = 3,86$ m)

$$g_{\text{par}} = \frac{13.0,13.2,80.3,86}{3,86.4,86} = 0,97 \text{ kN/m}^2$$

g) Laje L8 ($\ell = 2,86$ m)

$$g_{\text{par}} = \frac{13.0,13.2,80.2,86}{2,86.4,86} = 0,97 \text{ kN/m}^2$$

h) Laje L9 ($\ell = 2,86 \cdot 2 = 5,72$ m)

$$g_{\text{par}} = \frac{13.0,13.2,80.5,72}{2,56.2,86} = 3,70 \text{ kN/m}^2$$

3.18.4 Reações de Apoio nas Vigas de Borda

As reações de apoio nas vigas de borda das **lajes armadas em duas direções** estão mostradas na Tabela 21, e são relativas a faixas de largura de 1 m das lajes. O cálculo das reações foi feito com aplicação da Eq. 24 e com auxílio das Tabelas A-5, A-6 e A-7. Exemplo de cálculo para a laje L2:

$$V_x = v_x \frac{p \ell_x}{10} = 2,27 \frac{5,78 \cdot 5,86}{10} = 7,69 \text{ kN/m} \quad ; \quad V'_x = v'_x \frac{p \ell_x}{10} = 3,32 \frac{5,78 \cdot 5,86}{10} = 11,25 \text{ kN/m}$$

$$V_y = v_y \frac{p \ell_x}{10} = 2,17 \frac{5,78 \cdot 5,86}{10} = 7,35 \text{ kN/m} \quad ; \quad V'_y = v'_y \frac{p \ell_x}{10} = 3,17 \frac{5,78 \cdot 5,86}{10} = 10,74 \text{ kN/m}$$

Tabela 21 - Reações de apoio nas vigas de borda das lajes armadas em duas direções (kN/m).

Laje	Tipo	ℓ_x (m)	λ	P (kN/m ²)	v_x	v'_x	v_y	v'_y	V_x	V'_x	V_y	V'_y
L2	3	5,86	1,03	5,78	2,27	3,32	2,17	3,17	7,69	11,25	7,35	10,74
L3	3	5,86	1,12	6,58	2,36	3,46	2,17	3,17	9,10	13,34	8,37	12,22
L5	6	4,86	1,00	6,9	-	2,50	-	2,50	-	8,38	-	8,38
L6	6	2,56	1,90	6,24	-	3,68	-	2,50	-	5,88	-	3,99
L7	5A	3,86	1,26	6,13	2,13	3,13	-	3,17	5,04	7,41	-	7,50
L8	5A	2,86	1,70	5,88	2,72	3,98	-	3,17	4,57	6,69	-	5,33
L9	5B	2,56	1,12	8,11	-	3,21	1,71	2,50	-	6,66	3,55	5,19
L10	3	2,86	1,35	4,91	2,73	3,99	2,17	3,17	3,83	5,60	3,05	4,45

No caso de lajes armadas em uma direção, as lajes L1 e L4, as reações de apoio devem ser calculadas supondo as lajes como vigas na direção do vão principal (vão menor). As reações de apoio nas lajes L1 e L4 estão mostradas na Figura 53, Figura 54 e Figura 55.

A laje L1 está em balanço e, como já comentado, em sua extremidade livre deve ser considerada a carga relativa ao peso próprio do gradil (0,5 kN/m), e também a carga linear vertical de 2 kN/m sobre o gradil (nota j da Tabela 10 da NBR 6120)¹⁰, Figura 53. A carga vertical total distribuída na área da laje é de 6,83 kN/m², conforme indicado na Tabela 20. A largura da viga que representa a laje é adotada como 1 m, de forma que a carga de 6,83 kN/m² passa a ser 6,83 kN/m, e os esforços solicitantes mostrados na Figura 53 são relativos a faixas de 1 m de largura da laje.

¹⁰ “Nas bordas de balcões, varandas, sacadas e terraços com guarda-corpo, prever carga variável de 2 kN/m, além do peso próprio do guarda-corpo. Considerar também forças horizontais variáveis conforme 6.3.”

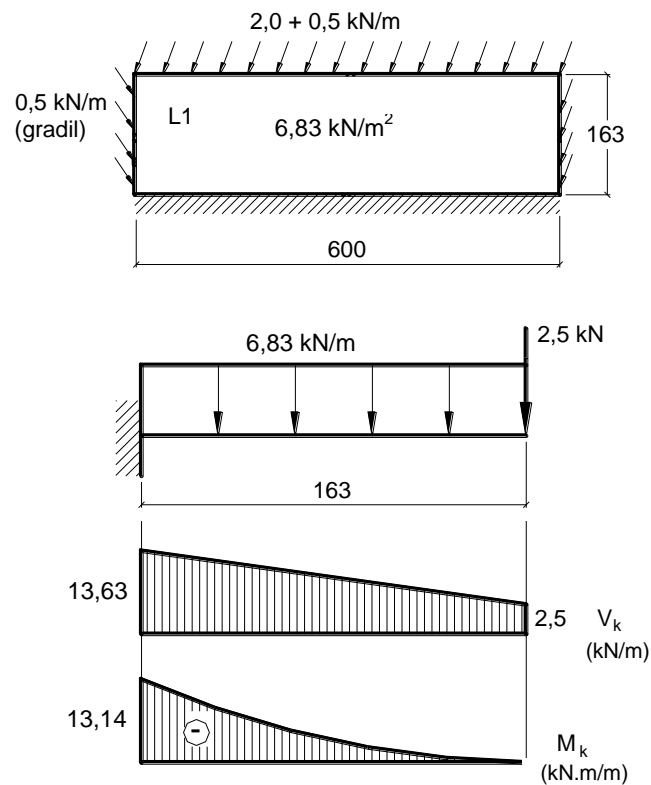


Figura 53 – Esquema estático, carregamentos e esforços solicitantes característicos na laje L1, por metro de largura de laje.

A laje L4 deve ser dividida em três regiões, sendo duas sem carga de parede (I) e outra com carga de parede (II). A posição e o comprimento da parede estão indicadas na Figura 54. Observa-se que a carga da porta foi desprezada. Considerando o carregamento total nas regiões I e II da laje, conforme mostrado na Tabela 20, os esforços solicitantes na laje L4, nas regiões I e II, estão indicados nas Figura 55 e Figura 56. A região II tem a largura determinada como:

$$\ell = \frac{2}{3} \ell_x = \frac{2}{3} 2,86 = 1,91 \text{ m}$$

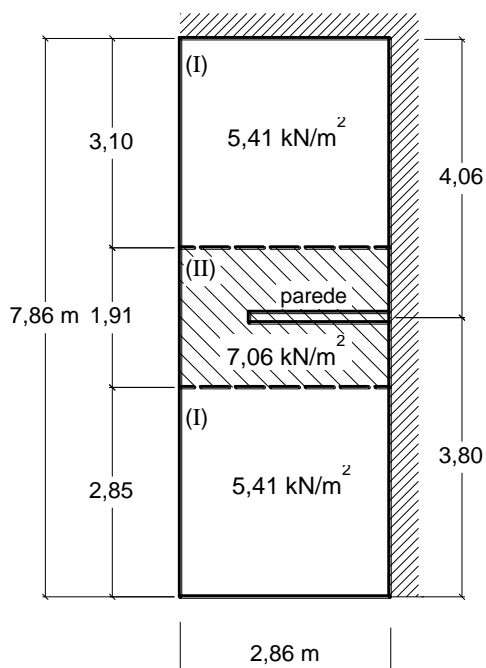


Figura 54 – Divisão da laje L4 em regiões com carga de parede e sem carga de parede.

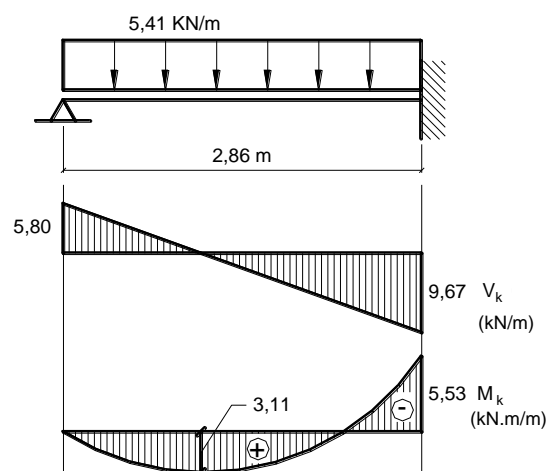


Figura 55 – Esquema estático, carregamento e esforços solicitantes na região I da laje L4.

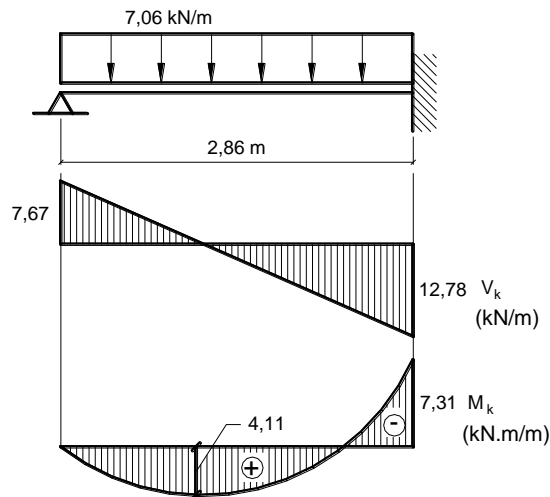


Figura 56 – Esquema estático, carregamento e esforços solicitantes na região II da laje L4.

As reações de apoio das lajes do pavimento devem ser indicadas em um desenho esquemático da planta de fôrma da estrutura, como mostrado na Figura 57.¹¹ Para facilitar a plotagem, cada laje tem indicada a direção x (não necessariamente na horizontal, e sim segundo a direção do vão ℓ_x - menor vão).

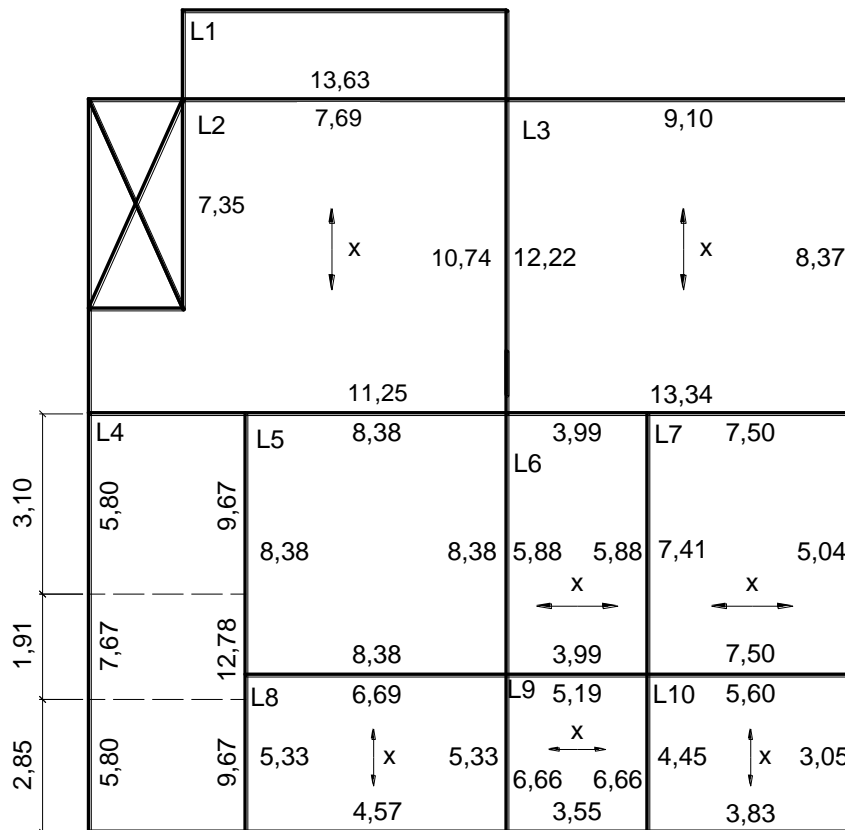


Figura 57 – Reações de apoio características (V_k - kN/m) das lajes nas vigas de borda.

3.18.5 Momentos Fletores e Dimensionamento das Armaduras Longitudinais de Flexão

Os momentos fletores solicitantes nas **lajes armadas em duas direções** encontram-se mostrados na Tabela 22, e foram calculados conforme a Eq. 21. Exemplo de cálculo para a laje L2:

$$M_x = \mu_x \frac{p \ell_x^2}{100} = 2,94 \frac{5,78 \cdot 5,86^2}{100} = 5,84 \text{ kNm/m} \quad ; \quad M'_x = \mu'_x \frac{p \ell_x^2}{100} = 7,43 \frac{5,78 \cdot 5,86^2}{100} = 14,75 \text{ kNm/m}$$

¹¹ A plotagem das reações de apoio das lajes deve ser feita com muito cuidado, para evitar erros no posicionamento e consequentemente erros no cálculo de cargas sobre as vigas de apoio das lajes.

$$M_y = \mu_y \frac{p \ell_x^2}{100} = 2,68 \frac{5,78 \cdot 5,86^2}{100} = 5,32 \text{ kNm/m} \quad ; \quad M'_y = \mu'_y \frac{p \ell_x^2}{100} = 7,18 \frac{5,78 \cdot 5,86^2}{100} = 14,25 \text{ kNm/m}$$

No caso de **lajes armadas em uma direção**, como as lajes L1 e L4, os cálculos de momentos fletores devem ser feitos em função do esquema estático e dos carregamentos nas lajes, como exemplificado na Figura 53 até a Figura 56.

Tabela 22 - Momentos fletores solicitantes (característicos) nas lajes armadas em duas direções (kN.m/m).

Laje	Tipo	ℓ_x (m)	λ	P (kN/m ²)	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	M_x	M'_x	M_y	M'_y
L2	3	5,86	1,03	5,78	2,94	7,43	2,68	7,18	5,84	14,75	5,32	14,25
L3	3	5,86	1,12	6,58	3,19	7,87	2,67	7,36	7,21	17,78	6,03	16,63
L5	6	4,86	1,00	6,9	2,02	5,15	2,02	5,15	3,29	8,39	3,29	8,39
L6	6	2,56	1,90	6,24	3,99	8,24	1,01	5,72	1,63	3,37	0,41	2,34
L7	5A	3,86	1,26	6,13	3,23	8,81	2,64	7,36	2,95	8,05	2,41	6,72
L8	5A	2,86	1,70	5,88	4,84	10,34	2,22	8,10	2,33	4,97	1,07	3,90
L9	5B	2,56	1,12	8,11	2,87	6,76	1,91	5,65	1,53	3,59	1,02	3,00
L10	3	2,86	1,35	4,91	4,24	9,65	2,45	7,88	1,70	3,88	0,98	3,16

Os momentos fletores característicos estão plotados na Figura 58, conforme os valores contidos na Tabela 22.¹² A Figura 58 mostra que não existe momento fletor na borda da laje L2 adjacente à laje L1, porque a laje L2 não está engastada na laje L1. Para facilitar a plotagem, cada laje tem indicada a direção x (direção do vão menor, ℓ_x).

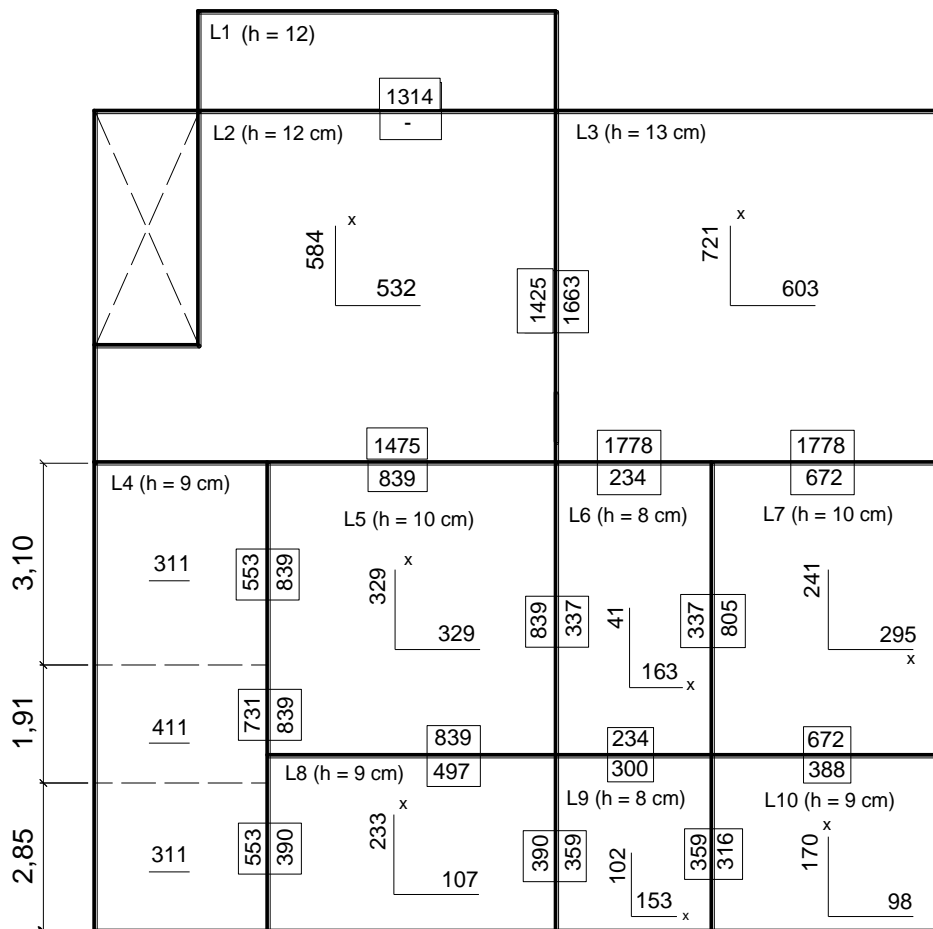


Figura 58 – Momentos fletores característicos (M_k - kN.cm/m).

¹² A plotagem dos momentos fletores nas lajes deve ser feita com muito cuidado, para evitar erros no posicionamento de momentos fletores e consequentemente erros de posicionamento das armaduras de flexão.

Conforme os valores constantes na Tabela 5 e Classe de Agressividade Ambiental II com Δc de 5 mm, para cálculo das armaduras de flexão positivas será considerado o cobrimento nominal de 2,0 cm. No caso das armaduras negativas o cobrimento nominal pode ser reduzido para 1,5 cm, de acordo com a possibilidade apresentada na nota 1 da Tabela 5.¹³ Estimando o diâmetro de 10 mm para as barras das armaduras, e que $d = h - c - \phi_c/2$, a altura útil d resulta:

$$\begin{aligned} d &= h - 2,5 \text{ cm} && \text{- para os momentos fletores positivos;} \\ d &= h - 2,0 \text{ cm} && \text{- para os momentos fletores negativos.} \end{aligned}$$

De acordo com a Tabela 9, a armadura mínima, **negativa para lajes armadas em uma ou duas direções, e positiva para lajes armadas em uma direção**, deve ter: $\rho_s \geq \rho_{\text{mín}}$. Para o concreto C25 a taxa de armadura mínima (Tabela 10) é:

$$\rho_{\text{mín}} = \frac{A_s}{b_w h} = 0,15 \%$$

Fazendo $b_w = 100$ cm a armadura mínima resulta:

$$A_{s,\text{mín}} = 0,15h \quad (\text{cm}^2/\text{m para } h \text{ em centímetro})$$

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

$$A_{s,\text{mín}} = 0,67 \cdot 0,15h = 0,10h \quad (\text{cm}^2/\text{m para } h \text{ em centímetro})$$

Na Figura 59 estão plotados os momentos fletores e as respectivas áreas de armadura, já considerando os valores de armadura mínima. Todos os cálculos de armadura resultaram o domínio 2, e a relação $x/d \leq 0,45$ (ver Eq. 50) foi atendida em todos os casos. Os momentos fletores determinados com a Eq. 21 para as lajes armadas em duas direções são relativos a faixas de largura de 1 m (100 cm), de modo que se deve considerar $b_w = 100$ cm.

Observe na Figura 58 que são diferentes os momentos fletores negativos de duas lajes em uma mesma viga de borda. Isso acontece porque as lajes foram calculadas isoladas, individualmente. Neste caso, a NBR 6118 permite que seja feita uma compatibilização de momentos fletores negativos, e de acordo com a tradição brasileira, por meio da Eq. 22 (ver Figura 24). A norma também permite adotar a maior armadura negativa em uma borda comum a duas lajes contíguas.¹⁴ Por exemplo, entre as lajes L2 e L3 existem os momentos fletores de 1.425 kN.cm/m e 1.663 kN.cm/m (Figura 58), e considerando a altura útil de cada laje ($d = h - 2$) com $\gamma_f = 1,4$, as áreas de armadura resultam:

$$(L2): K_c = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{100 \cdot 10^2}{1,4 \cdot 1425} = 5,0$$

e com concreto C25 na Tabela A-25 tem-se: $K_s = 0,025$, domínio 2, $\beta_x = x/d = 0,18 \leq 0,45 \rightarrow \text{ok!}$

$$A_s = K_s \frac{M_d}{d} = 0,025 \frac{1,4 \cdot 1425}{10} = 4,99 \text{ cm}^2/\text{m} \geq 0,15h = 0,15 \cdot 12 = 1,80 \text{ cm}^2/\text{m} \rightarrow \text{ok!}$$

$$(L3): K_c = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{100 \cdot 11^2}{1,4 \cdot 1663} = 5,2$$

e na Tabela A-25: $K_s = 0,025$, domínio 2, $\beta_x = x/d = 0,17 \leq 0,45 \rightarrow \text{ok!}$

$$A_s = K_s \frac{M_d}{d} = 0,025 \frac{1,4 \cdot 1663}{11} = 5,30 \text{ cm}^2/\text{m} \geq 0,15h = 0,15 \cdot 13 = 1,95 \text{ cm}^2/\text{m} \rightarrow \text{ok!}$$

¹³ “Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.”

¹⁴ NBR 6118 (item 14.7.6.2): “Quando houver predominância de cargas permanentes, as lajes vizinhas podem ser consideradas isoladas, realizando-se a compatibilização dos momentos sobre os apoios de forma aproximada. No caso de análise plástica, a compatibilização pode ser realizada mediante alteração das razões entre momentos de borda e vão, em procedimento iterativo, até a obtenção de valores equilibrados nas bordas. **Permite-se, simplificarmente, a adoção do maior valor de momento negativo em vez de equilibrar os momentos de lajes diferentes sobre uma borda comum.**”

Portanto, entre as duas armaduras negativas calculadas adota-se a maior ($5,30 \text{ cm}^2/\text{m}$), a qual será disposta ao longo da borda comum às duas lajes (ver Figura 59). Os detalhamentos das armaduras, positivas e negativas, estão apresentados na Figura 60 e Figura 61.

Como a laje L1 está em balanço, a armadura de flexão deve ser calculada com o momento fletor negativo majorado pelo coeficiente de ponderação das ações ($\gamma_f = 1,4$) e também pelo coeficiente adicional γ_n , cujo valor na Tabela 8 para a altura de 12 cm é $1,35$. A altura útil é $d = h - 2 \text{ cm} = 12 - 2 = 10 \text{ cm}$, e a armadura resulta:

$$K_c = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{100 \cdot 10^2}{1,4 \cdot 1,35 \cdot 1314} = 4,0$$

e na Tabela A-25: $K_s = 0,025$, domínio 2, $\beta_x = x/d = 0,23 \leq 0,45 \rightarrow \text{ok!}$

$$A_s = K_s \frac{M_d}{d} = 0,025 \frac{1,4 \cdot 1,35 \cdot 1314}{10} = 6,21 \text{ cm}^2/\text{m} \geq 0,15h = 0,15 \cdot 12 = 1,80 \text{ cm}^2/\text{m} \rightarrow \text{ok!}$$

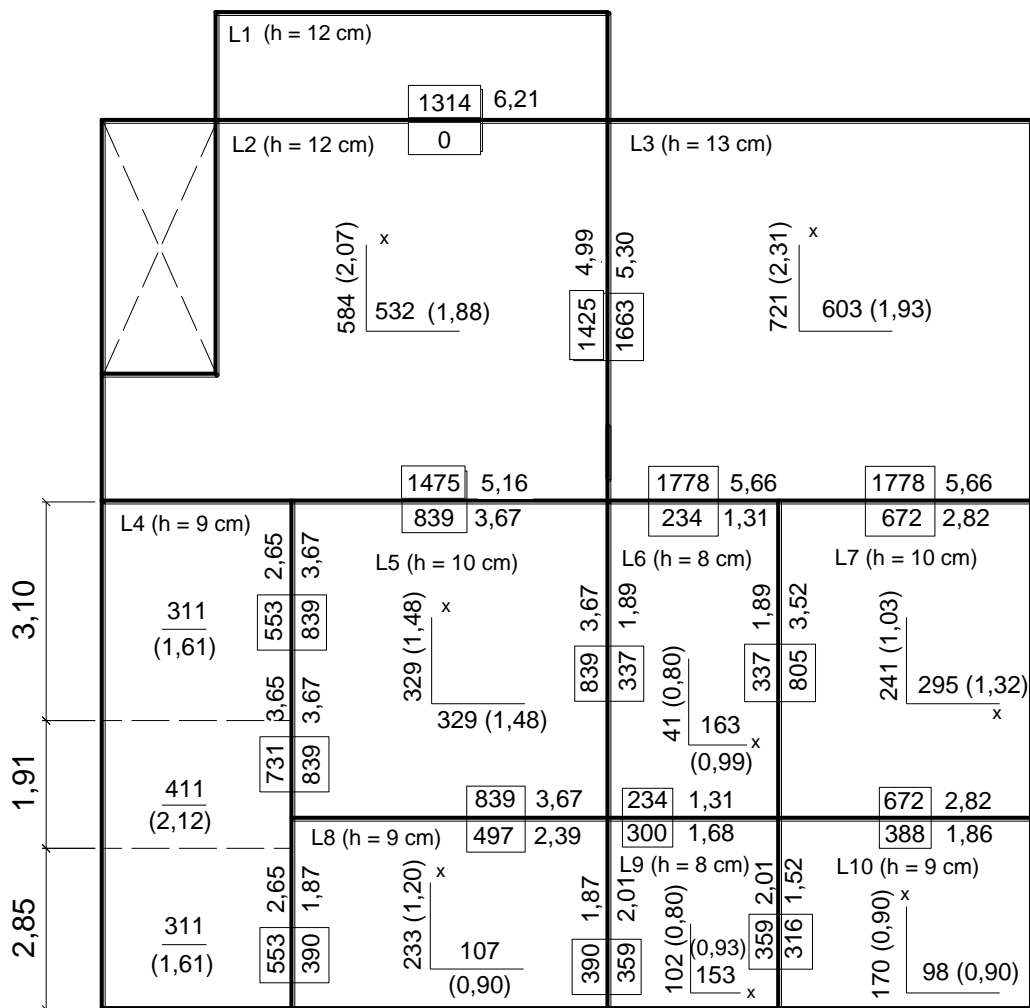


Figura 59 – Momentos fletores característicos (M_k - kN.cm/m) e áreas de armadura de flexão (cm^2/m).

Para o momento fletor positivo de 584 kN.cm/m da laje L2 ($h = 12 \text{ cm}$ e $d = h - 2,5 = 12 - 2,5 = 9,5 \text{ cm}$), a armadura positiva é:

$$K_c = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{100 \cdot 9,5^2}{1,4 \cdot 584} = 11,0$$

e na Tabela A-25: $K_s = 0,024$, domínio 2, $\beta_x = x/d = 0,08 \leq 0,45 \rightarrow \text{ok!}$

$$A_s = K_s \frac{M_d}{d} = 0,024 \frac{1,4 \cdot 584}{9,5} = 2,07 \text{ cm}^2/\text{m} \geq 0,10h = 0,10 \cdot 12 = 1,20 \text{ cm}^2/\text{m} \rightarrow \text{ok!}$$

3.18.6 Verificação de Flechas

Na Tabela 23 encontram-se os valores calculados para a flecha total das lajes. As flechas nas lajes armadas em duas direções foram calculadas com auxílio do coeficiente α , encontrado na Tabela A-1 até a Tabela A-4, e por meio da Eq. 46. Já nas lajes armadas em uma direção (L1 e L4) as flechas foram calculadas com as equações contidas nas Figura 17, Figura 18 e Figura 19, supondo as lajes como vigas na direção do menor vão.

As variáveis contidas na Tabela 23 indicam:

g = carregamento permanente total na laje;

q = carga variável;

ψ_2 = fator de redução de combinação quase permanente para o Estado-Limite de Serviço, adotado igual a 0,3 ou 0,4;

$p = g + \psi_2 q$ = carregamento total na laje, considerando o carregamento permanente acrescido do carregamento variável corrigido pelo fator de redução para combinação quase permanente;

M_r = momento fletor de fissuração da laje;

M_a = momento fletor na laje com carregamento correspondente à combinação rara;

α = coeficiente tabelado encontrado na Tabela A-1 à Tabela A-4;

EI = rigidez à flexão da laje;

a_i = flecha imediata;

a_t = flecha total na laje, considerando a fluência do concreto.

A fim de facilitar o entendimento dos cálculos feitos com auxílio de uma planilha eletrônica (com resultados mostrados na Tabela 23), os cálculos das flechas nas lajes L1, L2 e L4 estão demonstrados na sequência.

Tabela 23 – Flecha imediata (a_i) e total (a_t) nas lajes.

Laje	Tipo	l_x (cm)	λ	g (kN/m ²)	q (kN/m ²)	$\psi_2 q$ (kN/m ²)	$p = g + \psi_2 q$ (kN/m ²)	h (cm)	M_r (kNcm)	M_a (kNcm)	α	EI (kN.cm ²)	a_i (cm)	a_t (cm)
L1 ⁽¹⁾	-	163	-	4,33	2,5	1,00 ⁽²⁾	5,33	12	923	989	-	29790540	0,18	0,42
L2	3	586	1,03	4,28	1,5	0,45	4,73	12	923	584	2,72	34675200	0,36	0,85
L3	3	586	1,12	5,08	1,5	0,45	5,53	13	1083	721	2,96	44086467	0,36	0,85
L4	-	286	-	5,06	2,0	0,60	5,66	9	519	411	-	14628600	0,14	0,32
L5	6	486	1,00	5,4	1,5	0,45	5,85	10	641	329	1,49	20066667	0,20	0,47
L6	6	256	1,90	4,74	1,5	0,45	5,19	8	410	163	2,90	10274133	0,05	0,12
L7	5A	386	1,26	4,63	1,5	0,45	5,08	10	641	295	3,00	20066667	0,14	0,33
L8	5A	286	1,70	4,38	1,5	0,45	4,83	9	519	233	4,59	14628600	0,08	0,20
L9	5B	256	1,12	6,61	1,5	0,45	7,06	8	314	153	2,08	10274133	0,05	0,12
L10	3	286	1,35	3,41	1,5	0,45	3,86	9	519	170	3,99	14628600	0,06	0,14

NOTAS: 1) Existe também carga de gradil de parapeito na borda da extremidade livre da laje;

2) para maior segurança no cálculo da flecha na laje em balanço, ψ_2 foi adotado como 0,4 (locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas, como edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos).

3.18.6.1 Flecha na Laje L2

A laje L2, com $\lambda = 1,03$, é uma laje armada em duas direções. A altura da laje (h) é 12 cm, o menor vão (l_x) é de 586 cm, o carregamento total permanente (g) é de 4,28 kN/m², a carga variável é de 1,5 (kN/m²).

O momento fletor de fissuração, que é aquele correspondente ao surgimento da primeira fissura na laje, pode ser calculado com a Eq. 25:

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{y_t}$$

A resistência do concreto à tração direta (f_{ct}) pode ser considerada com o valor médio, adotando-se o valor fornecido na NBR 6118 (Eq. 26), que possibilita determinar a resistência média à tração direta em função da resistência característica do concreto à compressão:

$$f_{ct} = f_{ct,m} = 0,3 \sqrt[3]{f_{ck}^2} = 0,3 \sqrt[3]{25^2} = 2,565 \text{ MPa} = 0,2565 \text{ kN/cm}^2$$

Momento de inércia da laje considerando seção homogênea não fissurada (Eq. 32):

$$I_c = \frac{b h^3}{12} = \frac{100 \cdot 12^3}{12} = 14.400 \text{ cm}^4$$

O fator α é 1,5 para seção retangular. A distância y_t entre o centro de gravidade da seção e a fibra mais tracionada é igual a $h/2$:

$$M_r = \frac{1,5 \cdot 0,2565 \cdot 14400}{6} = 923 \text{ kN.cm}$$

O momento fletor atuante na laje, correspondente à combinação rara de serviço, é (Eq. 30):

$$F_{d,ser} = \sum F_{gik} + F_{q1k} + \sum \psi_{1j} F_{qjk}$$

A laje L2 tem apenas uma carga variável importante que deve ser considerada, de $1,5 \text{ kN/m}^2$, de modo que $F_{d,ser}$ coincide com o carregamento total na laje, mostrado na Tabela 20, de $5,78 \text{ kN/m}^2$. Para esse carregamento os momentos fletores positivos na área interna da laje resultaram 584 e 532 kN.cm, mostrados na Figura 58. Portanto, para M_a deve-se considerar o maior valor (584 kN.cm).

Observa-se que $M_a = 584 \text{ kN.cm}$ é menor que o momento fletor de fissuração, $M_r = 923 \text{ kN.cm}$, o que significa que a laje L2 não estará fissurada quando submetida ao carregamento total de $5,78 \text{ kN/m}^2$, isto é, a laje estará no Estádio I em serviço, como comumente ocorre com as lajes maciças dimensionadas segundo a “Teoria das Placas”. A flecha imediata na laje armada em duas direções pode ser calculada com a Eq. 46:

$$a_i = \frac{\alpha p \ell_x^4}{12 EI}$$

Com a Tabela A-1 anexa determina-se o fator $\alpha = 2,72$ para laje do tipo 3 e carregamento uniformemente distribuído na área da laje. O módulo de elasticidade secante do concreto, para brita de granito ($\alpha_E = 1,0$), é:

$$E_{cs} = \alpha_i E_{ci} = \alpha_i \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}} = 0,86 \cdot 1,0 \cdot 5600 \sqrt{25} = 24.080 \text{ MPa}$$

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

que multiplicado pelo momento de inércia fornece a rigidez à flexão da laje:

$$EI = 2.408,0 \left(\frac{100 \cdot 12^3}{12} \right) = 34.675.200 \text{ kN.cm}^2$$

Para o carregamento p deve ser adotada a combinação quase permanente, dada pela Eq. 47. O fator de redução de carga ψ_2 para combinação quase permanente pode ser adotado igual a 0,3 (*locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas - edifícios residenciais*).

$$F_{d,ser} = \sum F_{gik} + \sum \psi_{2j} F_{qjk} = 4,28 + 0,3 \cdot 1,5 = 4,73 \text{ kN/m}^2$$

A flecha imediata na laje será:

$$a_i = \frac{2,72}{12} \frac{0,000473 \cdot 586^4}{34675200} = 0,36 \text{ cm}$$

A flecha total, que leva em conta a fluência do concreto da laje, é dada pela Eq. 49: $a_t = a_i (1 + \alpha_f)$. O fator α_f é dado pela Eq. 39 como:

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

onde ρ' é igual a zero porque na laje em questão não existe armadura comprimida A'_s (armadura superior na área do centro da laje). Basta, portanto, determinar $\Delta\xi$, que é dado pela Eq. 41:

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

$\xi(t)$ será adotado igual a 2,00 para o tempo t superior a 70 meses (Eq. 43). Assumindo que a carga de longa duração atuará na laje a partir de um mês após executada (valor conservador neste caso), na Tabela 6 encontra-se: $\xi(t_0) = 0,68$. Resulta para $\Delta\xi$ o valor:

$$\Delta\xi = 2,00 - 0,68 = 1,32$$

A flecha total na laje será:

$$a_t = 0,36 (1 + 1,32) = 0,85 \text{ cm}$$

Para a flecha máxima permitida na laje L2, conforme a Tabela 7, pode-se considerar a “Aceitabilidade sensorial” – deslocamentos visíveis em elementos estruturais, onde o valor limite é $\ell/250 = 586/250 = 2,34$ cm. Quanto à possibilidade de vibração devida a cargas variáveis, o limite é $\ell/350 = 586/350 = 1,67$ cm. Como a parede apoiada na laje L2 é muito pequena e próxima à borda, a flecha máxima para “Efeitos em elementos não estruturais” não necessita ser avaliada.

Portanto, a flecha resultante para a laje, de 0,85 cm, é menor que as flechas máximas permitidas (2,34 e 1,67 cm), o que significa que a laje L2 pode ser executada com altura de 12 cm, e poderia até ter a altura um pouco menor, como 11 cm por exemplo.

É importante observar que se deve sempre evitar a ocorrência de flechas elevadas, visando impedir o surgimento de vibrações indesejáveis, que prejudicam o conforto dos usuários, bem como o possível aparecimento de fissuras em paredes apoiadas sobre lajes. Um procedimento mais conservador quanto à escolha da altura das lajes é mais indicado de início, até que se obtenha a experiência no projeto de lajes.

3.18.6.2 Flecha na Laje L1

A laje L1 é uma laje em balanço, engastada na laje L2, e deve ter a flecha calculada como uma viga em balanço. A altura da laje é 12 cm, vão ℓ_x de 163 cm, carregamento total permanente (g) de 4,33 kN/m², e carga variável de 2,5 kN/m². O momento fletor de fissuração é (Eq. 25):

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{y_t}$$

O momento de inércia da seção bruta (sem considerar as armaduras de aço), considerando uma faixa de 100 cm, é:

$$I_c = \frac{100 \cdot 12^3}{12} = 14.400 \text{ cm}^4$$

O fator α é 1,5 para seções retangulares. A distância y_t entre o centro de gravidade da seção e a fibra mais tracionada é igual a $h/2$:

$$M_r = \frac{1,5 \cdot 0,2565 \cdot 14400}{6} = 923 \text{ kN.cm}$$

O momento fletor atuante na laje, correspondente à **combinação rara** de serviço, é (Eq. 30):

$$F_{d,ser} = \sum F_{gik} + F_{q1k} + \sum \psi_{1j} F_{qjk}$$

A laje L1 tem apenas uma carga variável importante, de $2,5 \text{ kN/m}^2$, de modo que $F_{d,ser}$ coincide com o carregamento total na laje, mostrado na Tabela 20, de $6,83 \text{ kN/m}^2$. A carga vertical de $2,0 \text{ kN/m}$ prevista para ser aplicada no parapeito da extremidade livre da laje, conforme a NBR 6120 (Figura 53), não necessita ser considerada no cálculo da flecha. Para o carregamento total na área da laje e também a carga do gradil na borda livre da laje ($0,5 \text{ kN/m}$), o momento fletor na seção de engastamento da laje resulta:

$$M_a = \frac{6,83 \cdot 1,63^2}{2} + 0,5 \cdot 1,63 = 9,89 \text{ kN.m}$$

Observa-se que $M_a = 989 \text{ kN.cm}$ é maior que o momento fletor de fissuração $M_r = 923 \text{ kN.cm}$, o que significa que a laje L1 estará fissurada quando submetida ao carregamento total de $6,83 \text{ kN/m}^2$, isto é, na seção de engaste a laje estará no Estádio II em serviço. Portanto, conforme a Eq. 48, deve ser considerada a rigidez equivalente, dada pela Eq. 31:

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

Para cálculo de $(EI)_{eq}$ vários valores devem ser calculados. A razão modular entre os módulos de elasticidade dos materiais (Eq. 33), com o módulo de elasticidade secante do concreto de 24.080 MPa , conforme já calculado para a laje L2, é:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cs}} = \frac{21000}{2408} = 8,72$$

Desprezando a armadura construtiva inferior da laje ($A'_s = 0$), com a Eq. 37 calcula-se a posição da linha neutra no Estádio II (x_{II}), considerando a altura útil d de 10 cm e a área escolhida para a armadura negativa da laje (composta por $\phi 8 \text{ mm c/8 cm} = 6,25 \text{ cm}^2$ – ver Figura 61), a qual atende à área de armadura calculada, de $6,21 \text{ cm}^2/\text{m}$:

$$x_{II}^2 + \frac{2 A_s \alpha_e}{b} x_{II} - \frac{2 A_s d \alpha_e}{b} = 0$$

$$x_{II}^2 + \frac{2 \cdot 6,25 \cdot 8,72}{100} x_{II} - \frac{2 \cdot 6,25 \cdot 10 \cdot 8,72}{100} = 0 \quad \rightarrow \quad x_{II} = 2,70 \text{ cm}$$

O momento de inércia da seção fissurada de concreto no Estádio II, conforme a Eq. 38 é:

$$I_{II} = \frac{b x_{II}^3}{12} + b x_{II} \left(\frac{x_{II}}{2} \right)^2 + \alpha_e A_s (d - x_{II})^2$$

$$I_{II} = \frac{100 \cdot 2,70^3}{12} + 100 \cdot 2,70 \left(\frac{2,70}{2} \right)^2 + 8,72 \cdot 6,25 (10 - 2,70)^2 = 3.560,4 \text{ cm}^4$$

A rigidez equivalente será:

$$(EI)_{eq} = 2408 \left\{ \left(\frac{923}{989} \right)^3 14.400 + \left[1 - \left(\frac{923}{989} \right)^3 \right] 3.560,4 \right\} = 29.790.540 \text{ kN.cm}^2$$

$$(EI)_{eq} = 29.790.540 \text{ kN.cm}^2 \leq E_{cs} I_c \leq (2408 \cdot 14400) \leq 34.675.200 \text{ kN.cm}^2 \quad \rightarrow \quad \text{ok!}$$

A flecha imediata máxima, que ocorre na extremidade da laje em balanço, pode ser calculada pela equação clássica:

$$a_i = \frac{1}{8} \frac{p \ell_x^4}{EI} + \frac{1}{3} \frac{P \ell_x^3}{EI}$$

Para a carga uniformemente distribuída p deve ser adotada a combinação quase permanente, dada pela Eq. 47. O fator de redução de carga ψ_2 para combinação quase permanente, por questão de segurança, neste caso pode ser adotado igual a 0,4 (*locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas* (edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos)).

$$F_{d,ser} = \sum F_{gik} + \sum \psi_{2j} F_{qjk} = 4,33 + 0,4 \cdot 2,5 = 5,33 \text{ kN/m}^2$$

Esta carga deve ser multiplicada pela largura da viga (1 m), portanto, 5,33 kN/m. A carga do gradil (P) é 0,5 kN/m. A flecha imediata na laje resulta:

$$a_i = \frac{1}{8} \frac{0,0533 \cdot 163^4}{29.790.540} + \frac{1}{3} \frac{0,5 \cdot 163^3}{29.790.540} = 0,18 \text{ cm}$$

A flecha total, que leva em conta a fluência do concreto da laje, considerando o valor já calculado para α_f de 1,32 é:

$$a_t = a_i (1 + \alpha_f) = 0,18 (1 + 1,32) = 0,42 \text{ cm}$$

Para a flecha máxima permitida, conforme a Tabela 7, pode-se considerar:¹⁵

a) aceitabilidade sensorial: $\ell/250 = 2 \cdot 163/250 = 1,30 \text{ cm}$;

b) vibração devida a cargas variáveis: $\ell/350 = 2 \cdot 163/350 = 0,93 \text{ cm}$.

Como não existe parede apoiada na laje L1, a flecha máxima para “Efeitos em elementos não estruturais” não necessita ser avaliada. A flecha resultante, de 0,42 cm, é menor que as flechas máximas permitidas (1,30 e 0,93 cm), o que significa que a laje L1 tem altura adequada (12 cm).

3.18.6.3 Flecha na Laje L4

A laje L4 é uma laje armada em uma direção e deve ser calculada como viga segundo a direção principal (ℓ_x), relativa à região com carga total maior, a região com parede. A altura da laje é 9 cm, o vão ℓ_x é 286 cm, o carregamento total permanente (g) no trecho com parede é 5,06 kN/m² e a carga variável é 2,0 (kN/m²).

O momento fletor de fissuração, calculado de forma análoga aos dois itens anteriores, é 519 kN.cm, e o momento fletor atuante (M_a) é 411 kN.cm, o que significa que a laje está no Estádio I em serviço (não fissurada). Neste caso pode ser considerado o momento de inércia da seção bruta de concreto.

O momento de inércia da seção bruta (sem considerar o efeito da armadura) é:

$$I_c = \frac{100 \cdot 9^3}{12} = 6.075 \text{ cm}^4$$

A rigidez da laje à flexão é:

$$E_{cs} I_c = 2408 \cdot 6.075 = 14.628.600 \text{ cm}^4$$

A flecha imediata máxima na laje pode ser calculada com a equação mostrada na Figura 18 (vínculos engaste/apoio simples):

$$a_i = \frac{1}{185} \frac{p \ell_x^4}{EI}$$

Para a carga p deve ser adotada a combinação quase permanente (Eq. 47). O fator de redução de carga ψ_2 para combinação quase permanente pode ser adotado igual a 0,3 (*locais em que não há predominância de pesos de equipamentos fixos nem de concentração de pessoas* - edifícios residenciais).

$$F_{d,ser} = \sum F_{gik} + \sum \psi_{2j} F_{qjk} = 5,06 + 0,3 \cdot 2,0 = 5,66 \text{ kN/m}^2$$

¹⁵ O vão ℓ deve ser multiplicado por dois quando se trata de balanço – ver nota a) da Tabela 7.

A flecha imediata na laje é:

$$a_i = \frac{1}{185} \frac{0,0566 \cdot 286^4}{14628600} = 0,14 \text{ cm}$$

A flecha total, que leva em consideração a fluência do concreto, e com o valor já calculado para α_f de 1,32, é:

$$a_t = a_i (1 + \alpha_f) = 0,14 (1 + 1,32) = 0,32 \text{ cm}$$

A flecha limite neste caso, como a laje tem carga de parede (“Efeitos em elementos não estruturais”), conforme a Tabela 4 pode ser considerada como $\ell/500$, com o vão ℓ na direção da parede, que coincide com o vão principal:

$$\ell/500 = 286/500 = 0,57 \text{ cm}$$

A flecha calculada, de 0,32 cm, é menor que a flecha limite (0,57 cm). Caso resultasse o contrário, a altura da laje deveria ser aumentada.

Considerando a existência ou não de paredes sobre as lajes (ver Figura 52), as flechas limites da NBR 6118 (Tabela 4) e a flecha total (ver a Tabela 23), para as demais lajes resulta:

- L3	-	$a_{\text{máx}} = \ell/500 = 656/500 = 1,31 \text{ cm}$;	$a_t = 0,85 \text{ cm}$	$\therefore a_t < a_{\text{máx}}$
- L5	-	$a_{\text{máx}} = \ell/500 = 486/500 = 0,97 \text{ cm}$;	$a_t = 0,47 \text{ cm}$	$\therefore a_t < a_{\text{máx}}$
- L6	-	$a_{\text{máx}} = \ell/500 = 486/500 = 0,97 \text{ cm}$;	$a_t = 0,12 \text{ cm}$	$\therefore a_t < a_{\text{máx}}$
- L7	-	$a_{\text{máx}} = \ell/500 = 386/500 = 0,77 \text{ cm}$;	$a_t = 0,33 \text{ cm}$	$\therefore a_t < a_{\text{máx}}$
- L8	-	$a_{\text{máx}} = \ell/500 = 286/500 = 0,57 \text{ cm}$;	$a_t = 0,20 \text{ cm}$	$\therefore a_t < a_{\text{máx}}$
- L9	-	$a_{\text{máx}} = \ell/500 = 286/500 = 0,57 \text{ cm}$;	$a_t = 0,12 \text{ cm}$	$\therefore a_t < a_{\text{máx}}$
- L10	-	$a_{\text{máx}} = \ell/250 = 286/250 = 1,14 \text{ cm}$;	$a_t = 0,14 \text{ cm}$	$\therefore a_t < a_{\text{máx}}$

Verifica-se que todas as flechas calculadas resultaram menores que as flechas máximas permitidas. Caso alguma laje apresentasse flecha maior que a flecha limite, a sua altura deveria ser aumentada.

3.18.7 Verificação da Força Cortante

Raramente as lajes maciças de edifícios residenciais necessitam de armadura transversal para resistência às forças cortantes. A título de exemplo serão verificadas as lajes L1 e L4.

a) Laje L1

A laje é em balanço e tem reação de apoio (força cortante na laje) característica de 13,63 kN/m (V_k). Para não ser necessária a armadura transversal deve-se ter (Eq. 56): $V_{Sd} \leq V_{Rd1}$. A força cortante de cálculo deve considerar o coeficiente de ponderação $\gamma_f = 1,4$ e o coeficiente de ponderação adicional $\gamma_n = 1,35$ (porque a laje está em balanço):

$$V_{Sd} = \gamma_f \cdot \gamma_n \cdot V_k = 1,4 \cdot 1,35 \cdot 13,63 = 25,76 \text{ kN/m}$$

A força cortante máxima que pode ser resistida (V_{Rd1}) é (Eq. 59):

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} k (1,2 + 40\rho_1)] b_w d$$

$$\tau_{Rd} = 0,25f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c = 0,25 \left(\frac{0,7 \cdot 0,3 \sqrt[3]{25^2}}{1,4} \right) = 0,3206 \text{ MPa} = 0,03206 \text{ kN/cm}^2$$

A área de armadura negativa especificada para a laje L1 é $\phi 8 \text{ mm c/8 cm}$, o que representa $6,25 \text{ cm}^2$ (ver Figura 61), e altura útil da armadura negativa é $d = h - 2 = 12 - 2 = 10 \text{ cm}$. Com $b_w = 100 \text{ cm}$:

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w d} \leq 0,02 \quad \rightarrow \quad \rho_1 = \frac{6,25}{100 \cdot 10} = 0,00625 \leq 0,02 \quad \rightarrow \quad \text{ok!}$$

Considerando que 100 % da armadura negativa (principal) chega até a viga de apoio:

$$k = |1,6 - d| = |1,6 - 0,10| = 1,5 > 1 \rightarrow \text{ok!}$$

$$V_{Rd1} = [0,03206 \cdot 1,5 (1,2 + 40 \cdot 0,00625)] 100 \cdot 10 = 69,73 \text{ kN/m}$$

Portanto, $V_{Sd} = 25,76 \text{ kN/m} < V_{Rd1} = 69,73 \text{ kN/m}$, o que significa que não é necessário dispor armadura transversal na laje L1.

a) Laje L4

Será considerado o trecho que tem a parede apoiada na laje, com a maior reação de apoio característica de 12,78 kN/m (V_k). Para não ser necessária a armadura transversal deve-se ter (Eq. 56): $V_{Sd} \leq V_{Rd1}$

$$V_{Sd} = \gamma_f \cdot V_k = 1,4 \cdot 12,78 = 17,89 \text{ kN/m}$$

A força cortante máxima que pode ser resistida (V_{Rd1}) é (Eq. 59):

$$V_{Rd1} = [\tau_{Rd} k (1,2 + 40\rho_1)] b_w d$$

$$\tau_{Rd} = 0,25f_{ctd} = f_{ctk,inf}/\gamma_c = 0,3206 \text{ MPa} = 0,03206 \text{ kN/cm}^2$$

A área de armadura positiva especificada para a laje L4 no trecho da parede é $\phi 5 \text{ mm c}/9 \text{ cm}$, o que representa $2,22 \text{ cm}^2$ (ver Figura 60), e altura útil da armadura positiva é $d = h - 2,5 = 9 - 2,5 = 6,5 \text{ cm}$. Com $b_w = 100 \text{ cm}$:

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w d} \leq 0,02 \quad \rightarrow \quad \rho_1 = \frac{2,22}{100 \cdot 6,5} = 0,0034 \leq 0,02 \rightarrow \text{ok!}$$

Considerando que 100 % da armadura positiva chega até a viga de apoio:

$$k = |1,6 - d| = |1,6 - 0,065| = 1,535 > 1 \rightarrow \text{ok!}$$

$$V_{Rd1} = [0,03206 \cdot 1,535 (1,2 + 40 \cdot 0,0034)] 100 \cdot 6,5 = 42,86 \text{ kN/m}$$

Portanto, $V_{Sd} = 17,89 \text{ kN/m} < V_{Rd1} = 42,86 \text{ kN/m}$, o que significa que não é necessário colocar armadura transversal na laje L4. Nas demais lajes também não é necessário colocar estribos como armadura transversal.

3.18.8 Detalhamentos das Armaduras Longitudinais de Flexão

A Figura 60 e a Figura 61 mostram o detalhamento das armaduras longitudinais das lajes, positivas e negativas. Os critérios aplicados para determinação do comprimento das barras foram apresentados nos itens 3.12.5 e 3.12.6.

Os espaçamentos das barras devem obedecer aos valores mostrados na Eq. 66 ($s \leq 2h$ e $s \leq 20 \text{ cm}$). A norma não especifica um espaçamento mínimo para as barras de armaduras de lajes maciças, mas pode-se indicar por motivos construtivos um espaçamento mínimo de 8 cm para a armadura negativa e um valor um pouco inferior para a armadura positiva. O ideal muitas vezes é que o espaçamento de ambas armaduras fique entre 8 e 20 nas lajes correntes.

A escolha do diâmetro e espaçamento das barras, positivas e negativas, pode ser feita com auxílio da Tabela A-26, em função das áreas de armadura apresentadas na Figura 59. Exemplos:

a) armaduras positivas da laje L3, 1,93 e 2,31 cm^2/m

$$- 1,93 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \rightarrow \quad \phi 6,3 \text{ mm c}/16 = 1,97 \text{ cm}^2/\text{m} \text{ (ou } \phi 5 \text{ mm c}/10 = 2,00 \text{ cm}^2/\text{m})$$

$$- 2,31 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \rightarrow \quad \phi 6,3 \text{ mm c}/13 = 2,42 \text{ cm}^2/\text{m} \text{ (ou } \phi 5 \text{ mm c}/8 = 2,50 \text{ cm}^2/\text{m})$$

b) armadura negativa de 5,30 cm^2/m da laje L3

$$- 5,30 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \rightarrow \quad \phi 8 \text{ mm c}/9 = 5,56 \text{ cm}^2/\text{m} \text{ (ou } \phi 10 \text{ mm c}/15 = 5,33 \text{ cm}^2/\text{m})$$

c) armadura negativa de $3,67 \text{ cm}^2/\text{m}$ da laje L5

$$- 3,67 \text{ cm}^2/\text{m} \rightarrow \phi 8 \text{ mm } c/13 = 3,85 \text{ cm}^2/\text{m} \text{ (ou } \phi 10 \text{ mm } c/20 = 4,00 \text{ cm}^2/\text{m})$$

A armadura secundária (de distribuição) da laje L4 (armada em uma direção) foi determinada segundo a área mínima indicada na Tabela 9, sendo:

$$A_{s,distr} \geq \begin{cases} 0,9 \text{ cm}^2 / \text{m} \\ 0,5A_{s,mín} = 0,5 \cdot 0,15 \cdot 9 = 0,68 \text{ cm}^2 / \text{m} \\ 0,2A_{s,princ} = 0,2 \cdot 2,12 = 0,42 \text{ cm}^2 / \text{m} \end{cases} \rightarrow \therefore A_{s,distr} = 0,90 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

verifica-se na Tabela A-26 que pode ser escolhida a armadura $\phi 4,2 \text{ mm } c/15$ ($0,92 \text{ cm}^2/\text{m}$).

Na laje em balanço L1 não há necessidade de colocar armadura negativa perpendicular à armadura principal negativa. No entanto, convém colocar uma armadura construtiva próxima à superfície inferior da laje, na direção do balanço e ancorada na viga de apoio da laje. São as barras N13 mostradas na Figura 60.

Simplificadamente, todas as armaduras positivas foram estendidas 100 % até os apoios. O critério utilizado para definir o comprimento foi de estender as barras 5 cm além do eixo das vigas internas, e até a face externa das vigas de periferia do edifício, menos 2 cm para considerar o cobrimento (c) na extremidade (ponta) da barra pelo concreto. Por exemplo, para a barra N3: $C = 670 + 8 + 5 = 683 \text{ cm}$, onde 670 cm é a distância de eixo a eixo das vigas até onde a barra estende-se, 8 cm é quanto a barra adentra a viga vertical do lado direito, e 5 cm além do eixo da viga interna do lado esquerdo.

O comprimento das barras das armaduras negativas foi determinado para o arranjo 3 mostrado na Figura 32, e conforme a Eq. 68 e Eq. 69. Por exemplo:

a) armadura negativa (N1) na borda comum entre as lajes L2 e L3 ($5,30 \text{ cm}^2/\text{m}$ – ver Figura 59)

Para definir o comprimento da barra inicialmente pode-se calcular:

$$c = 0,25\ell_x + \ell_b = 0,25 \cdot 586 + 21 = 167,5 \text{ cm}$$

c = comprimento da barra do arranjo 3 de um lado da viga;

ℓ_x = maior vão entre os menores vãos das duas lajes. No caso das lajes L2 e L3 os vãos menores são iguais a 586 cm;

$\ell_b = 21 \text{ cm}$: comprimento de ancoragem da barra $\phi 8 \text{ mm}$, com gancho, região de boa aderência e C25, determinado na Tabela A-27.

O valor calculado para c deve ser, preferencialmente, arredondado para múltiplo de 10, de modo que a barra terá 170 cm de comprimento de um lado da viga e a metade desse valor do outro. O comprimento total da barra será:

$$C = 170 + (170/2) + 8 + 9 = 272 \text{ cm}$$

onde 8 e 9 são os comprimentos dos ganchos nas extremidades da barra.

O comprimento do gancho deve ser definido em função do cobrimento da armadura. No caso foi adotado como $\ell_{gancho} = h - 3 \text{ cm}$.

b) armadura negativa (N3) na borda comum entre as lajes L4 e L5 ($3,67 \text{ cm}^2/\text{m}$ - Figura 59)

$$c = 0,25\ell_x + \ell_b = 0,25 \cdot 486 + 21 = 142,5 \text{ cm}$$

$$\ell_x \geq \begin{cases} 286 \\ 486 \end{cases} \rightarrow \ell_x = 486 \text{ cm}$$

$\ell_b = 21 \text{ cm}$: comprimento de ancoragem da barra $\phi 8 \text{ mm}$, com gancho, região de boa aderência e C25, determinado na Tabela A-27.

Fazendo o valor múltiplo de 10 mais próximo (140 cm) como comprimento da barra de um lado da viga, o comprimento total da barra será:

$$C = 140 + (140/2) + 6 + 7 = 223 \text{ cm}$$

onde 6 e 7 são os comprimentos dos ganchos nas extremidades da barra.

As quantidades de barras, como indicadas nas cotas (setas) das armaduras positivas e negativas (Figura 60 e Figura 61), são calculadas dividindo-se o comprimento da cota, geralmente de face à face das vigas de apoio das lajes, pelo espaçamento das barras da armadura. Por exemplo: a barra N3 da armadura positiva da laje L3 está disposta entre as faces das vigas, na extensão de 580 cm ($600 - 20$), que dividido por 16 cm (espaçamento das barras), resulta a quantidade de 36,25, que deve ser arredondado para o inteiro mais próximo, portanto, 36 barras. O procedimento é semelhante na quantificação das barras da armadura negativa. Como exemplo: as barras N3 da armadura negativa entre as lajes L4 e L5, dispostas na extensão de 480 cm ($500 - 20$), que dividido por 13 cm (espaçamento das barras), resulta a quantidade de 36,9, arredondado para 37 barras.

As barras N2 e N13 mostradas no detalhamento da armadura negativa (Figura 61) formam uma armadura para proporcionar resistência a momentos volventes, que ocorrem com maior intensidade em cantos de lajes com bordas simplesmente apoiadas, conforme indicado na Figura 25. Essa armadura diminui a possibilidade de surgimento de fissuras na face superior da laje, próximas aos cantos. Nas lajes L4 e L10 a armadura não foi disposta porque os vãos dessas lajes são relativamente pequenos.

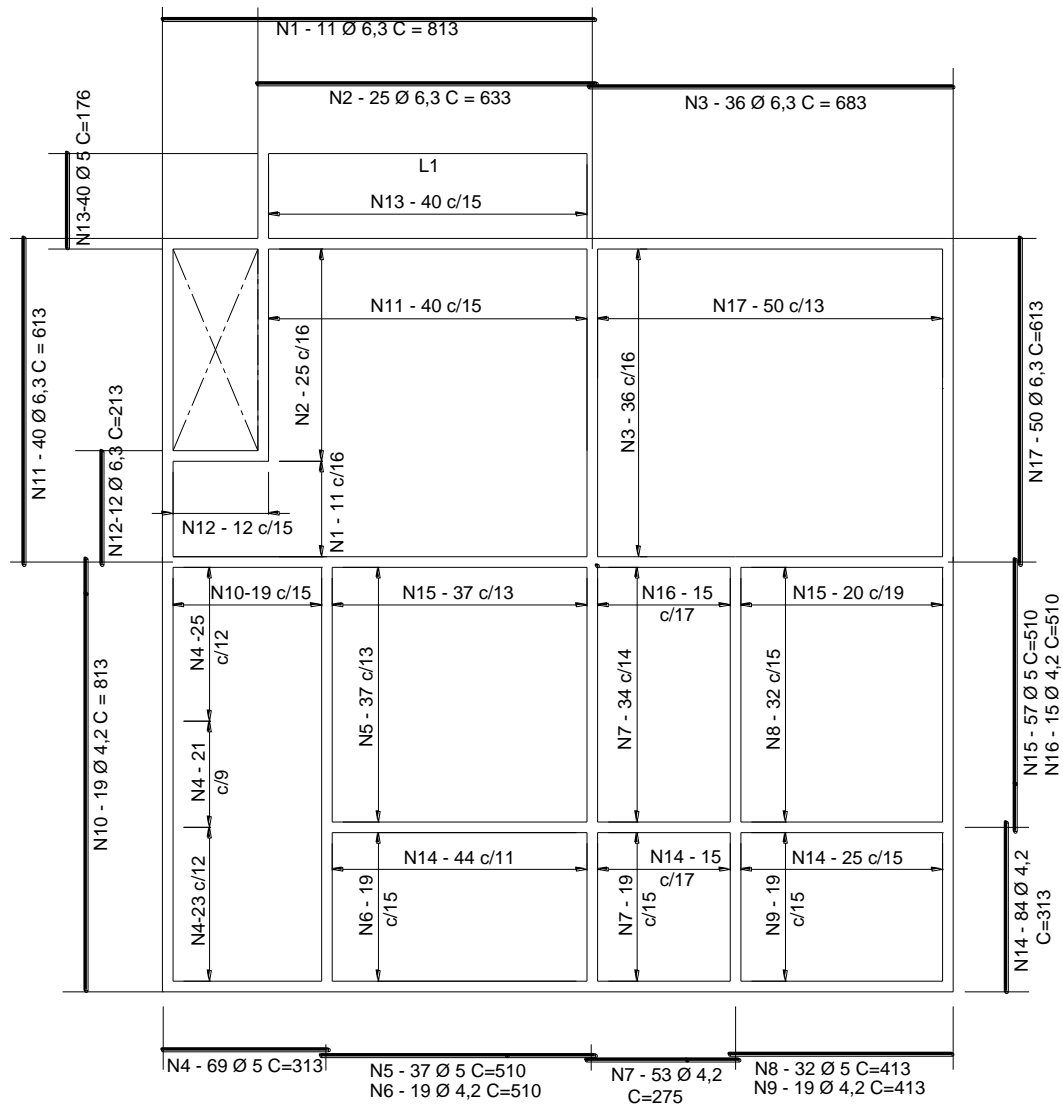


Figura 60 – Detalhamento das armaduras positivas.

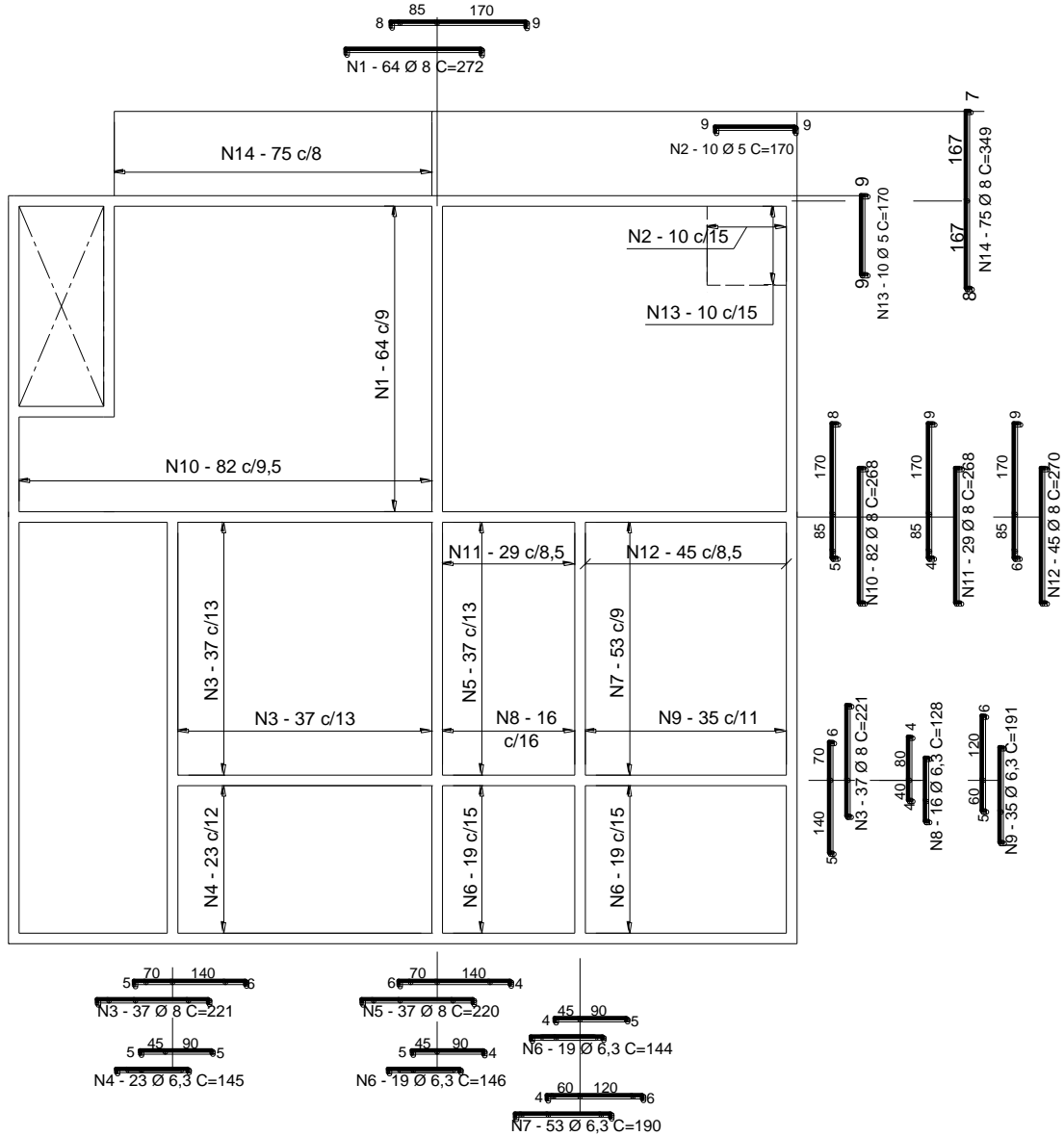


Figura 61 – Detalhamento das armaduras negativas.

4. LAJES NERVURADAS

4.1. DEFINIÇÃO

A NBR 6118 (item 14.7.7) define laje nervurada como as “lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração para momentos positivos esteja localizada nas nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte.” A resistência do material de enchimento (material inerte - (Figura 62) não é considerada, ou seja, não contribui para aumentar a resistência da laje nervurada. São as nervuras, unidas e solidarizadas pela mesa (capa), que proporcionam a necessária resistência e rigidez.

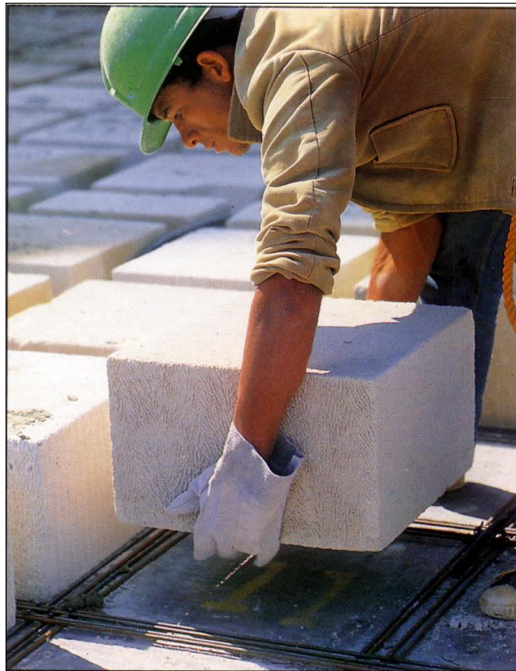


Figura 62 – Enchimento com blocos de concreto celular autoclavado – material inerte (SICAL, 2001).

A laje nervurada é particularmente indicada quando há necessidade de vencer grandes vãos ou resistir a altas ações verticais. Ao vencer grandes vãos, a quantidade de pilares e vigas resultam menores.

As lajes nervradas podem ser armadas em uma direção (unidirecional) ou em duas direções (bidirecional ou em cruz), em função da existência de nervuras em uma ou em duas direções. A Figura 63 ilustra uma planta de fôrma onde uma laje nervurada com nervuras em duas direções vence grandes vãos.

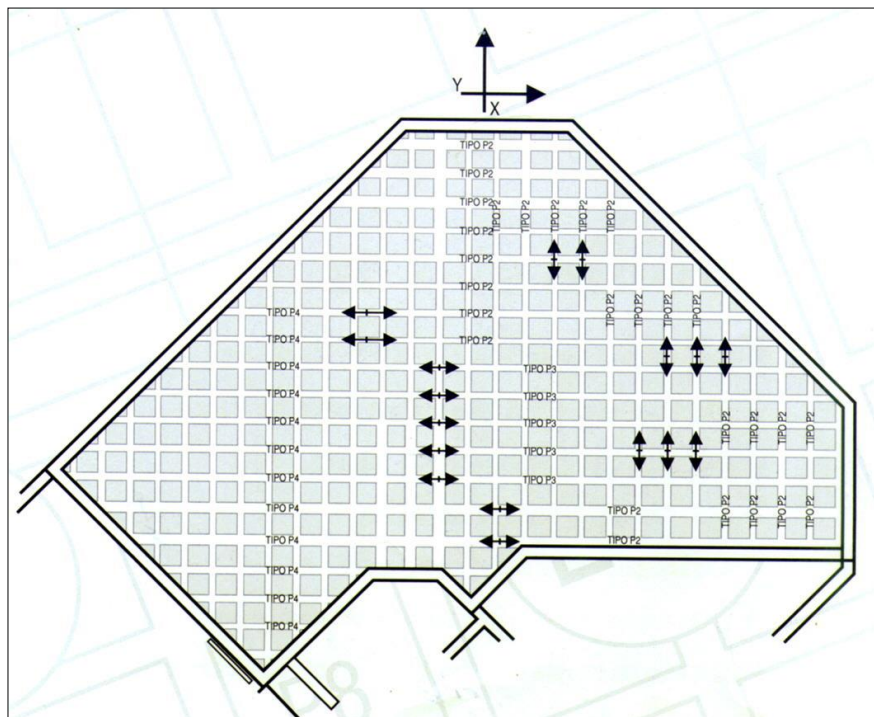


Figura 63 – Laje nervurada em cruz ou bidirecional (CÓDIGO ENGENHARIA, 2001).

Os materiais de enchimento podem ser constituídos por diversos materiais, como bloco cerâmico furado, bloco de concreto, bloco de concreto celular autoclavado (Figura 62), isopor (Figura 64), etc. As nervuras podem também ficar expostas ou aparentes, quando não são colocados materiais inertes entre elas (Figura 65).

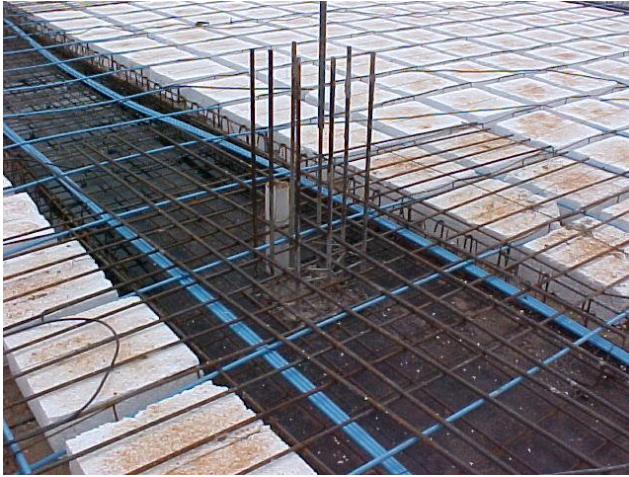


Figura 64 – Laje nervurada protendida com cordoalhas engraxadas e isopor como material de enchimento.



Figura 65 – Laje nervurada com moldes plásticos.
(<http://www.flickr.com/photos/atex>).

As lajes nervuradas apresentam as seguintes vantagens em relação às lajes maciças de concreto:

- menor peso próprio;
- menor consumo de concreto;
- redução de fôrmas;
- maior capacidade de vencer grandes vãos;
- maiores planos lisos (sem vigas).

4.2. TIPOS

Em função da forma e disposição do material de enchimento, há diversas possibilidades para a execução das lajes nervuradas, conforme indicado na Figura 66. O esquema indicado na Figura 66a é o mais comum encontrado na prática, devido à sua facilidade de execução. O esquema **b**, com a mesa no lado inferior, é indicado para proporcionar maior resistência aos momentos fletores negativos, como nos balanços. Os esquemas de **b** a **h**, embora possíveis, não são comuns na prática.

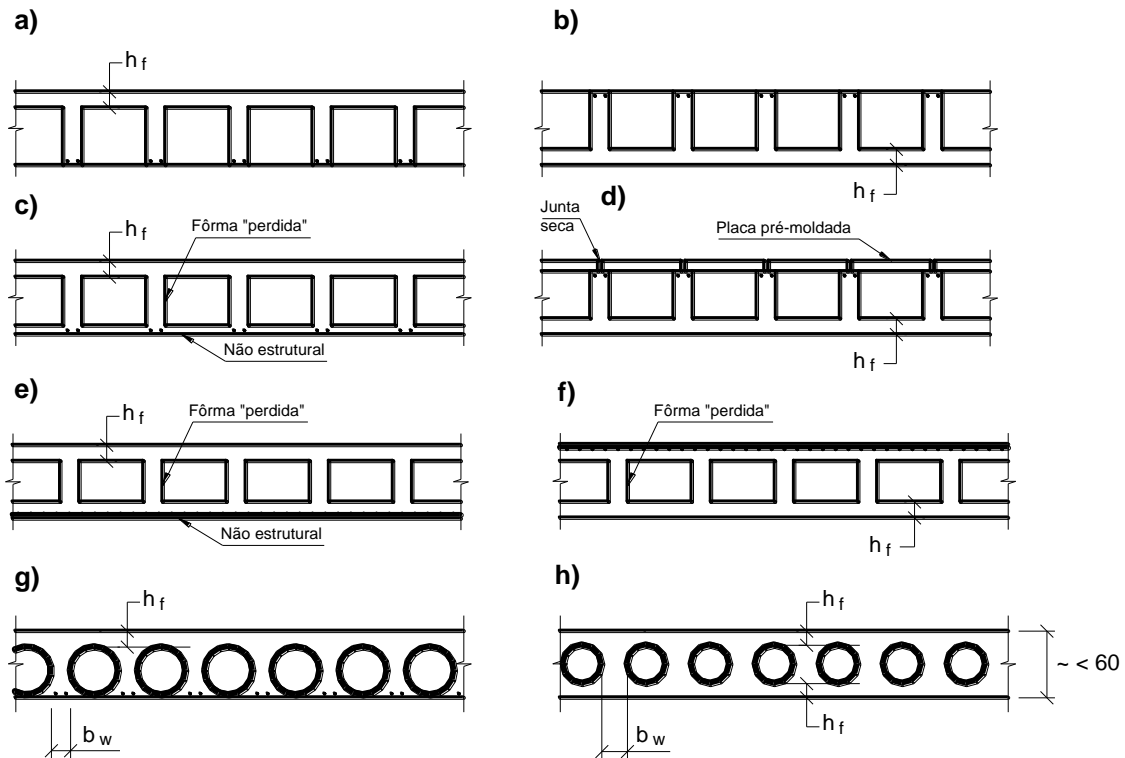


Figura 66 – Várias disposições possíveis para as lajes nervuradas (ANDRADE, 1982).

4.3. CÁLCULO SIMPLIFICADO

A laje nervurada pode ser entendida como um elemento estrutural constituído por vigas, em uma direção ou em duas direções (ortogonais ou não), solidarizadas pela mesa (capa) de concreto. O comportamento estático é intermediário entre o de grelha e o de laje maciça.

No item 14.7.7 a NBR 6118 indica que “Todas as prescrições anteriores relativas às lajes podem ser consideradas válidas, desde que sejam obedecidas as condições de 13.2.4.2.”, onde as prescrições anteriores referem-se às Estruturas com elementos de placa (item 14.7). Portanto, a norma permite o cálculo da laje nervurada como placa (laje) no regime elástico, desde que as condições apresentadas no item 13.2.4.2 sejam obedecidas. O cálculo da laje nervurada como laje maciça é chamado *simplificado*.

Quando as condições de 13.2.4.2 não ocorrem, a norma diz que (item 14.7.7) “deve-se analisar a laje nervurada considerando a capa como laje maciça apoiada em uma grelha de vigas.”

As condições da norma apresentadas em 13.2.4.2 são de dois tipos: relativas às especificações para as dimensões da laje, e relativas ao projeto da laje. Conforme o desenho em corte mostrado na Figura 67, as especificações quanto às dimensões são as seguintes:

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

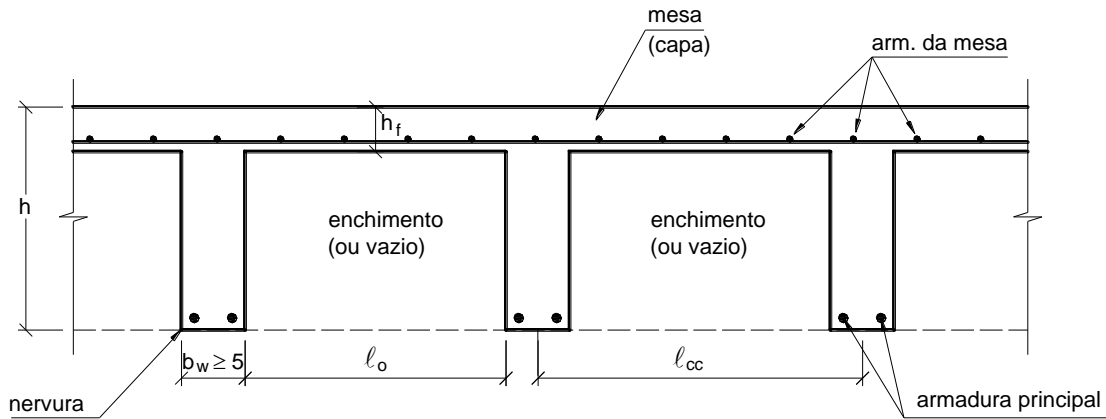


Figura 67 – Seção transversal de uma laje nervurada.

Quanto ao projeto (item 13.2.4.2): “Para o projeto das lajes nervuradas, devem ser obedecidas as seguintes condições:

a) para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras menor ou igual a 65 cm, pode ser dispensada a verificação da flexão da mesa, e para a verificação do cisalhamento da região das nervuras, permite-se a consideração dos critérios de laje; isto é:

$$- l_{cc} \leq 65 \text{ cm} \left\{ \begin{array}{l} \text{não é necessário fazer verificação da mesa à flexão;} \\ \text{força cortante nas nervuras verificada como nas lajes maciças.} \end{array} \right.$$

b) para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 cm e 110 cm, exige-se a verificação da flexão da mesa, e as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas; permite-se essa verificação como lajes se o espaçamento entre eixos de nervuras for até 90 cm e a largura média das nervuras for maior que 12 cm; isto é:

$$- 65 \text{ cm} < l_{cc} \leq 110 \text{ cm} \left\{ \begin{array}{l} \text{é necessário fazer a verificação da mesa à flexão;} \\ \text{força cortante nas nervuras verificada como nas vigas.} \end{array} \right.$$

$$l_{cc} \leq 90 \text{ cm e } b_{w, \text{nerv}} > 12 \text{ cm} \left\{ \text{força cortante nas nervuras verificada como nas lajes maciças.} \right.$$

c) para lajes nervuradas com espaçamento entre eixos de nervuras maior que 110 cm, a mesa deve ser projetada como laje maciça, apoiada na grelha de vigas, respeitando-se os seus limites mínimos de espessura,” isto é:

$$l_{cc} > 110 \text{ cm} \left\{ \text{mesa calculada como laje maciça apoiada nas nervuras.} \right.$$

Esta recomendação é reforçada pelo texto do item 14.7.7: “Quando essas hipóteses não forem verificadas, deve-se analisar a laje nervurada considerando a capa como laje maciça apoiada em grelha de vigas”. Os limites mínimos de espessura referem-se às espessuras mínimas estabelecidas pela norma para as lajes maciças, apresentadas no item 13.2.4.1.

O cálculo simplificado consiste em determinar os esforços solicitantes (momentos fletores e reações de apoio) e deslocamentos (flechas) de acordo com as tabelas desenvolvidas para as lajes maciças segundo a Teoria das Placas (tabelas de Bares, Czerny, etc.).

A NBR 6118 (item 14.7.7) especifica que as lajes nervuradas unidirecionais “devem ser calculadas segundo a direção das nervuras, desprezadas a rigidez transversal e a rigidez à torção. As lajes nervuradas bidirecionais (conforme ABNT NBR 14859-2) podem ser calculadas, para efeito de esforços solicitantes, como lajes maciças.”

Em versão anterior da norma (NB 1/78), era previsto que, nas lajes nervuradas armadas em uma direção (unidirecionais), deveriam ser dispostas nervuras transversais a cada 2 m sempre que houvesse cargas concentradas a distribuir na laje e sempre que o vão principal ultrapassasse 4 m. Essa recomendação deve ser adotada porque aumenta a resistência e rigidez da laje.

Quando for necessário o projeto de uma laje nervurada de modo mais refinado que aquele proporcionado pelo cálculo simplificado, deve-se calcular os esforços solicitantes e deslocamentos considerando-se a laje como uma grelha, ou, o que é ainda mais refinado, considerar o método dos Elementos

Finitos. O cálculo da laje como uma grelha é simples e fácil de ser implementado, além de conduzir a resultados confiáveis e de boa precisão. No Brasil existem programas computacionais comerciais para o projeto de lajes nervuradas que permitem o cálculo por analogia de grelha e pelo método dos Elementos Finitos.

4.4 AÇÕES

As ações nas lajes nervuradas podem ter várias e diferentes causas, como previstas nas normas NBR 6118 (item 11) e NBR 8681, sendo as mais importantes as ações permanentes (g) e as cargas variáveis (q), conforme apresentadas na NBR 6120. As cargas de paredes apoiadas na laje podem ser determinadas segundo os mesmos critérios de cálculo especificados para as lajes maciças, como apresentados no item 3.4. As demais cargas permanentes devem ser obrigatoriamente consideradas e calculadas.

O peso próprio das lajes nervuradas pode ser calculado por metro quadrado de área. Uma forma de cálculo consiste em separar uma área da laje, cujo centro coincide com o cruzamento de duas nervuras, com lados de dimensões iguais à distância entre os eixos das nervuras.

Na Figura 68 está mostrada a área de uma laje com nervuras em duas direções, igualmente espaçadas, com 24 cm de altura total e espessura de capa de 4 cm. O procedimento consiste em determinar o volume de concreto e as espessuras médias, de concreto e de enchimento, correspondentes à área delimitada da laje.

O volume de concreto resulta:

$$V_c = (48 \times 48 \times 4) + (48 \times 8 \times 20) + 2 (20 \times 8 \times 20) = 23.296 \text{ cm}^3$$

(capa) (nervura) (nervura)

A espessura média de concreto é:

$$\bar{e}_c = \frac{V_c}{\text{Área}} = \frac{23296}{48 \cdot 48} = 10,11 \text{ cm}$$

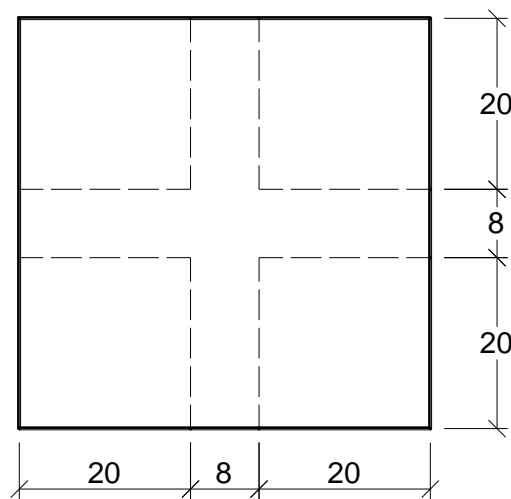


Figura 68 – Área da laje considerada no cálculo do peso próprio.

A espessura média do material de enchimento é a diferença entre a altura total da laje e a espessura média de concreto:

$$\bar{e}_{\text{ench}} = h - \bar{e}_c = 24 - 10,11 = 13,89 \text{ cm}$$

Considerando $\gamma_{\text{conc}} = 25 \text{ kN/m}^3$ e $\gamma_{\text{ench}} = 6 \text{ kN/m}^3$, o peso próprio total da laje é:

$$\begin{aligned} \text{concreto} &= 0,1011 \times 25 = 2,53 \text{ kN/m}^2 \\ \text{enchimento} &= 0,1389 \times 6,0 = 0,83 \text{ "} \\ \text{Total (g}_{\text{pp}}) &= 3,36 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

4.5 MOMENTOS FLETORES NOS APOIOS INTERMEDIÁRIOS

Semelhantemente às lajes maciças contínuas sobre vigas de apoio comuns, nas lajes nervuradas também surgem momentos fletores negativos, que solicitam as lajes na região do apoio, como ilustrado na Figura 69. O projeto de lajes nervuradas contínuas e com a mesa superior (capa) apoiada na borda superior das nervuras, quanto aos momentos fletores negativos, pode ser feito admitindo-se uma das seguintes hipóteses, obedecendo-se os limites impostos para a posição da linha neutra (x/d) quando for o caso:

- a seção da nervura (seção retangular), com armadura simples negativa, é suficiente para resistir ao momento fletor negativo;
- se a seção da nervura é insuficiente com armadura simples, pode-se utilizar armadura dupla, desde que $b_w \geq 8$ cm;
- a seção da nervura é insuficiente, mas pode-se aumentar a seção (normalmente aumenta-se a altura);
- eliminar a continuidade, isto é, considerar as lajes isoladas e totalmente independentes, o que significa dizer que estará se considerando o momento fletor negativo igual a zero. Neste caso, a fim de evitar fissuras, deve-se colocar uma armadura negativa construtiva, como por exemplo ϕ 6,3 mm cada 15 ou 20 cm, ou em maior quantidade em função dos vãos e carregamentos, principalmente.

Outra solução consiste em impor uma armadura negativa nas nervuras, e então determinar o momento fletor resistente proporcionado pelas nervuras. Este momento fletor seria imposto à laje na seção sobre a viga de apoio, o que pode ser feito facilmente por meio de engastes elásticos. Os esforços e deformações calculadas para a laje nervurada seriam função do momento fletor negativo aplicado na borda, com a garantia da seção no apoio estar verificada.

Uma solução, bem menos usual na prática, consiste em fazer a laje nervurada com mesa dupla na extensão dos momentos fletores negativos. Esta solução leva à maior resistência aos momentos negativos, com a desvantagem da execução da laje ser mais trabalhosa.

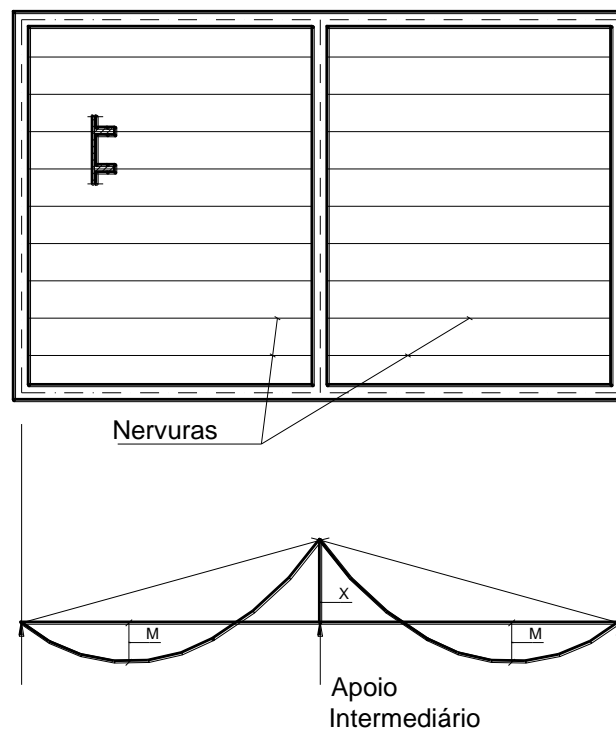


Figura 69 – Lajes nervuradas com continuidade na região de momentos fletores negativos.

4.6 DIMENSIONAMENTO

Os momentos fletores determinados de acordo com a Teoria das Placas, M_x , M_y , M'_x (ou X_x) e M'_y (ou X_y), são momentos atuantes em faixas de largura unitária. No caso de lajes nervuradas com nervuras nas duas direções (bidirecionais) é necessário determinar o momento fletor atuante em cada nervura, o que depende da distância entre as nervuras.

4.6.1 Flexão nas Nervuras

Quando a mesa está comprimida, no cálculo da armadura de flexão (A_s) pode-se considerar a contribuição da mesa. Neste caso, o cálculo é para seção T ($b_f \cdot h$). Quando a mesa está tracionada, o cálculo é como seção retangular ($b_w \cdot h$), pois a mesa tracionada não pode ser considerada no cálculo à flexão. Devem ainda ser observados:

- extensão da armadura longitudinal (cobrimento do diagrama de momentos fletores);
- ancoragem da armadura longitudinal nos apoios;
- taxas mínimas de armadura;
- fissuração, etc.

4.6.2 Força Cortante

O dimensionamento das lajes nervuradas à força cortante é feito em função do espaçamento entre as nervuras. Quando a distância de eixo a eixo das nervuras é menor que 65 cm a força cortante deve ser verificada de forma análoga ao das lajes maciças, como apresentado no item 3.11.2. Quando essa distância é superior a 65 cm e menor que 110 cm, a força cortante nas nervuras deve ser verificado como nas vigas de Concreto Armado, o que será estudado na disciplina Estruturas de Concreto II. Neste caso, sempre haverá uma armadura transversal nas nervuras, mesmo que mínima, ao longo de todo o comprimento da nervura.

A NBR 6118 (item 20.1) especifica que “Os estribos em lajes nervuradas, quando necessários, não podem ter espaçamento superior a 20 cm.”

4.7 EXEMPLO

4.7.1 Laje em Cruz (nervuras nas duas direções), $\ell_{cc} < 65$ cm

São conhecidos:

concreto C30

$c = 2,0$ cm

aço CA-50

brita 1

$\gamma_{conc} = 25$ kN/m³

carga variável $q = 2,0$ kN/m²

piso final cerâmico ($\gamma_{piso} = 0,15$ kN/m²)

$\gamma_f = \gamma_c = 1,4$; $\gamma_s = 1,15$

enchimento da laje com blocos cerâmicos furados ($\gamma_{bloco\ cer} = 13$ kN/m³)

espessura de 2 cm para o revestimento inferior de argamassa ($\gamma_{arg.\ revest} = 19$ kN/m³) e de 3 cm para o contrapiso ($\gamma_{arg.\ contrap} = 21$ kN/m³)

A planta de fôrma com o detalhe das nervuras está mostrada na Figura 70.

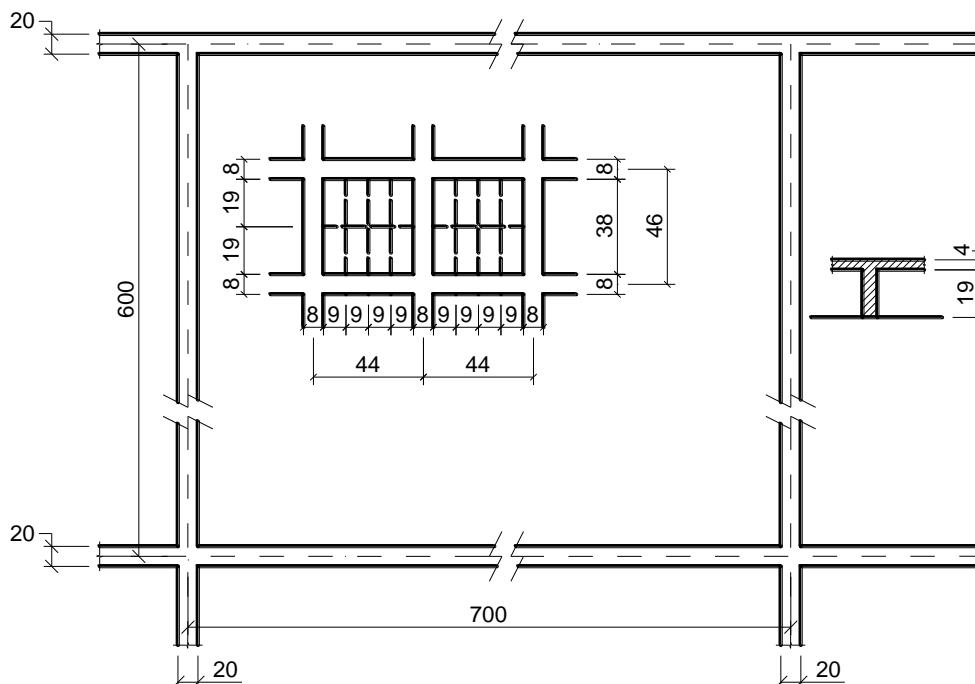


Figura 70 – Planta de fôrma com detalhe das nervuras.

RESOLUÇÃO

1º Cálculo das cargas

Para cálculo do peso próprio da laje será considerada a área de laje mostrada na Figura 71.

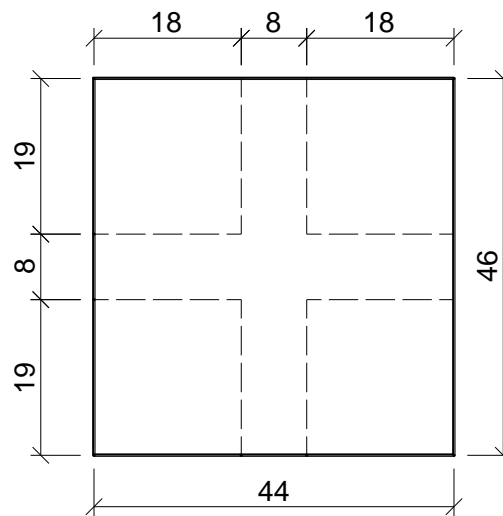


Figura 71 – Área da laje a ser considerada para cálculo do peso próprio.

Volume de concreto:

$$V_c = (46 \times 44 \times 4) + (46 \times 8 \times 19) + 2(18 \times 8 \times 19) = 20.560 \text{ cm}^3$$

Espessura média equivalente de concreto:

$$\bar{e}_c = \frac{V_c}{\text{Área}} = \frac{20560}{46 \cdot 44} = 10,16 \text{ cm}$$

Espessura média do material de enchimento:

$$\bar{e}_{\text{ench}} = h - \bar{e}_c = 23 - 10,16 = 12,84 \text{ cm}$$

Carga total atuante na laje:

concreto	= 0,1016 · 25	= 2,54 kN/m ²
enchimento	= 0,1284 · 13	= 1,67 “
revest. infer.	= 0,02 · 19	= 0,38 “
contrapiso	= 0,03 · 21	= 0,63 “
piso		= 0,15 “
carga variável (q)		= 2,00 “
Total (p)		= 7,37 kN/m²

2º Esforços solicitantes

a) Momentos fletores

Laje do tipo 1 → apoiada nos quatro lados.

$$\lambda = \frac{\ell_y}{\ell_x} = \frac{700}{600} = 1,17 \rightarrow \text{Tabela A-8: } \mu_x = 5,53 ; \mu_y = 4,22$$

$$M_x = \mu_x \frac{p \ell_x^2}{100} = 5,53 \frac{7,37 \cdot 6^2}{100} = 14,67 \text{ kN.m/m} = 1.467 \text{ kN.cm/m}$$

$$M_y = \mu_y \frac{p \ell_x^2}{100} = 4,22 \frac{7,37 \cdot 6^2}{100} = 11,20 \text{ kN.m/m} = 1.120 \text{ kN.cm/m}$$

b) Reações de apoio

Na Tabela A-5 encontram-se: $v_x = 2,87$ e $v_y = 2,50$. As reações nas vigas de apoio da laje são:

$$V_x = v_x \frac{p \ell_x}{10} = 2,87 \frac{7,37 \cdot 6}{10} = 12,69 \text{ kN/m}$$

$$V_y = v_y \frac{p \ell_x}{10} = 2,50 \frac{7,37 \cdot 6}{10} = 11,06 \text{ kN/m}$$

c) Esforços solicitantes por nervura

Os esforços por nervura são obtidos multiplicando-se os esforços por metro pela distância entre os eixos das nervuras, observando-se a distância conforme a direção considerada:

$$M_{x,nerv} = 1467 \cdot 0,44 = 645 \text{ kN.cm} \quad ; \quad M_{y,nerv} = 1120 \cdot 0,46 = 515 \text{ kN.cm}$$

$$V_{x,nerv} = 12,69 \cdot 0,44 = 5,58 \text{ kN/m} \quad ; \quad V_{y,nerv} = 11,06 \cdot 0,46 = 5,09 \text{ kN/m}$$

3º) Dimensionamento à flexão

O detalhamento esquemático das armaduras de flexão nas duas direções está mostrado na Figura 72.

a) Direção x

$$M_d = \gamma_f \cdot M = 645 \cdot 1,4 = 903 \text{ kN.cm} \quad ; \quad d = h - 2,5 \text{ cm} = 23 - 2,5 = 20,5 \text{ cm}$$

A mesa está comprimida pelos momentos fletores positivos, de modo que a seção resistente à flexão pode ser suposta T, com largura colaborante b_f igual à distância de eixo a eixo das nervuras. Considerando inicialmente que a seção T será calculada como se fosse retangular com dimensões $b_f \cdot h$, tem-se:

$$K_c = \frac{b_w d^2}{M_d} = \frac{44 \cdot 20,5^2}{903} = 20,5 \quad \rightarrow \text{Tabela A-25: } \beta_x = 0,04, \text{ domínio 2, } K_s = 0,023$$

$$\beta_x = x/d = 0,04 \leq 0,45 \quad \rightarrow \text{ok!}$$

$$x = 0,04 \cdot 20,5 = 0,82 \text{ cm} \rightarrow 0,8x < h_f = 4 \text{ cm} \quad \rightarrow \text{confirma o cálculo como seção retangular.}$$

$$A_{sx} = K_s \frac{M_d}{d} = 0,023 \frac{903}{20,5} = 1,01 \text{ cm}^2/\text{nerv} \quad \rightarrow 2 \phi 8 \text{ mm (1,00 cm}^2)$$

$$A_{s,mín} = 0,0015 \cdot 8 \cdot 23 = 0,28 \text{ cm}^2/\text{nerv}$$

b) Direção y

Semelhantemente ao que foi feito para a direção x, porém, com $d = h - 3 \text{ cm} = 23 - 3 = 20 \text{ cm}$:

$$M_d = \gamma_f \cdot M = 1,4 \cdot 515 = 721 \text{ kN.cm}$$

$$K_c = \frac{46 \cdot 20^2}{721} = 25,5 \quad \rightarrow \text{Tabela A-25: } \beta_x = 0,03, \text{ domínio 2, } K_s = 0,023$$

$$A_{sy} = 0,023 \frac{721}{20} = 0,83 \text{ cm}^2/\text{nervura} \rightarrow 2 \phi 8 \text{ mm (1,00 cm}^2\text{)}$$

A NBR 6118 (item 18.3.7) especifica que deve existir uma armadura nos planos de ligação entre mesas e almas de vigas, de pelo menos $1,5 \text{ cm}^2$ por metro (exemplos: $\phi 5 \text{ c}/13 = 1,54 \text{ cm}^2$ ou $\phi 6,3 \text{ c}/20 = 1,58 \text{ cm}^2$). Como foi considerada a mesa da laje para compor vigas de seção T, nas duas direções, será disposta uma armadura em malha próxima à face inferior da capa, com $\phi 5 \text{ c}/13 \text{ cm}$. Essa armadura aumenta a resistência da capa à flexão e à força cortante.

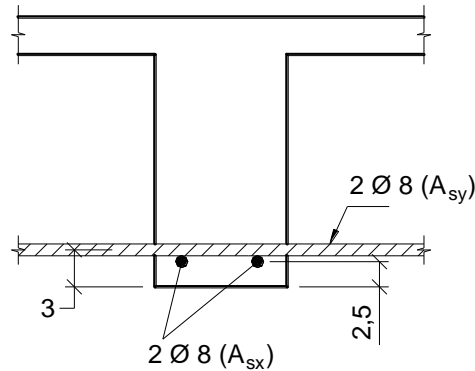


Figura 72 – Detalhamento das armaduras de flexão nas nervuras.

4º) Verificações

A verificação da resistência da mesa à flexão não é necessária, pois $\ell_{cc} < 65 \text{ cm}$ (nas duas direções) e não há força concentrada aplicada sobre a laje. É necessário verificar a laje nervurada à força cortante, e como ℓ_{cc} é menor que 65 cm , esta verificação pode ser feita como laje maciça. Essa verificação não será efetuada, mas geralmente as lajes nervuradas apoiadas em vigas de borda, bem como as lajes maciças, não necessitam de armadura transversal.

A ancoragem das armaduras longitudinais das nervuras nas vigas de apoio e a flecha máxima que ocorre na laje necessitam ser calculadas e verificadas.

5º) Detalhamento final

O detalhamento esquemático das armaduras está mostrado na Figura 73. As barras N1 e N3 são as armaduras das nervuras, e as barras N2 e N4 são as barras de reforço da mesa, dispostas próximas à face inferior.

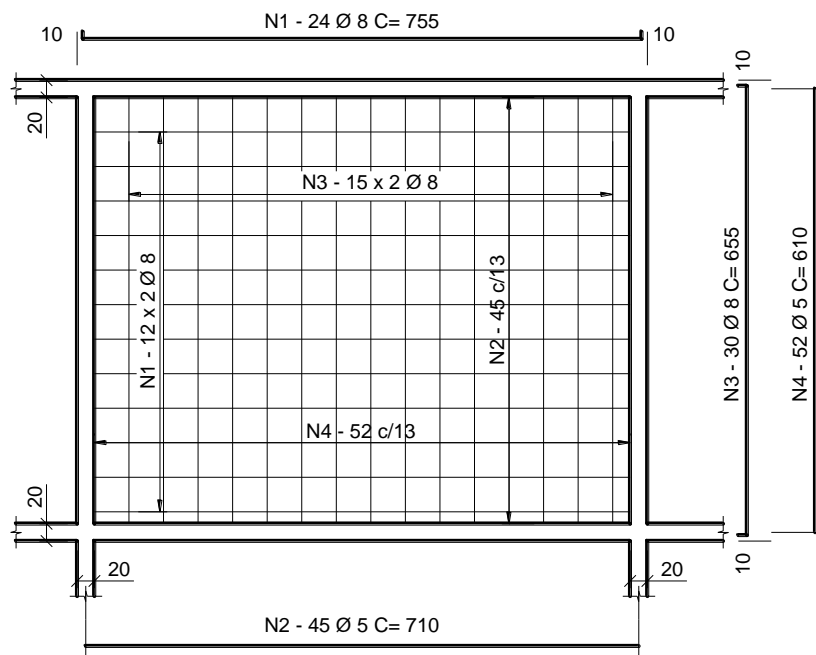


Figura 73 – Detalhamento das armaduras da laje.

5. LAJES PRÉ-FABRICADAS

As normas brasileiras NBR 14859 (Partes 1, 2 e 3) apresentam as características exigíveis para lajes pré-fabricadas de concreto. A NBR 15522 trata das vigotas e pré-lajes de concreto. Define-se como laje pré-fabricada ou pré-moldada a laje que tem suas partes constituintes fabricadas em escala industrial no canteiro de uma fábrica. Pode ser de Concreto Armado ou de Concreto Protendido. São aplicadas tanto nas edificações de pequeno porte como também nas de grande porte. Neste texto se dará ênfase às lajes pré-fabricadas para as construções de pequeno porte, como casas, edifícios de baixa altura, sobrados, galpões, etc.

5.1 DEFINIÇÕES

Conforme as várias normas citadas no item anterior, as seguintes lajes pré-fabricadas podem ser assim definidas:

- a) **laje pré-fabricada unidirecional:** são as lajes constituídas por nervuras principais longitudinais, dispostas em uma única direção. Podem ser empregadas algumas nervuras transversais, perpendiculares às nervuras principais;
- b) **laje pré-fabricada bidirecional:** laje nervurada, constituída por nervuras principais nas duas direções;
- c) **pré-laje:** são placas com espessura de 3 cm a 5 cm e larguras padronizadas, constituídas por concreto estrutural, executadas industrialmente fora do local de utilização definitivo da estrutura, ou mesmo em canteiros de obra. Englobam total ou parcialmente a armadura inferior de tração, integrando a seção de concreto da nervura. As pré-lajes podem ser unidirecionais ou bidirecionais, e as placas podem ser de concreto armado ou de concreto protendido;
- d) **laje alveolar protendida:** conjunto formado por painéis alveolares protendidos pré-fabricados, montados por justaposição lateral, eventual capa de concreto estrutural e material de rejuntamento.

As lajes pré-fabricadas uni e bidirecionais são constituídas por nervuras (também chamadas vigotas ou trilhos) de concreto e armadura, blocos de enchimento e capeamento superior de concreto. São muito comuns em edificações de baixa altura, em lajes de piso e de cobertura (forro). Nas décadas passadas foi bastante comum a laje com nervuras em forma de T invertido (Figura 74), a qual caiu em desuso, substituída pelas lajes do tipo treliçada (Figura 75 e Figura 76) e protendida.

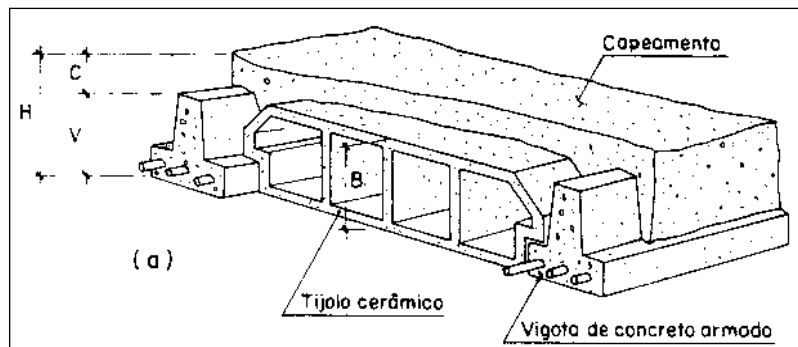


Figura 74 – Laje pré-fabricada com nervuras em T invertido.

A seguir são apresentadas as principais características desses dois tipos de laje pré-fabricada.

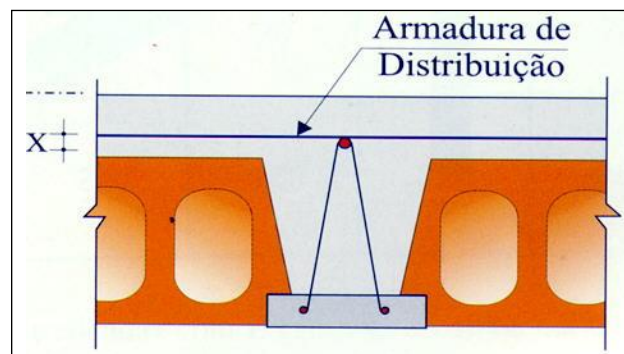


Figura 75 – Laje pré-fabricada do tipo treliçada (FAULIM, 1998).

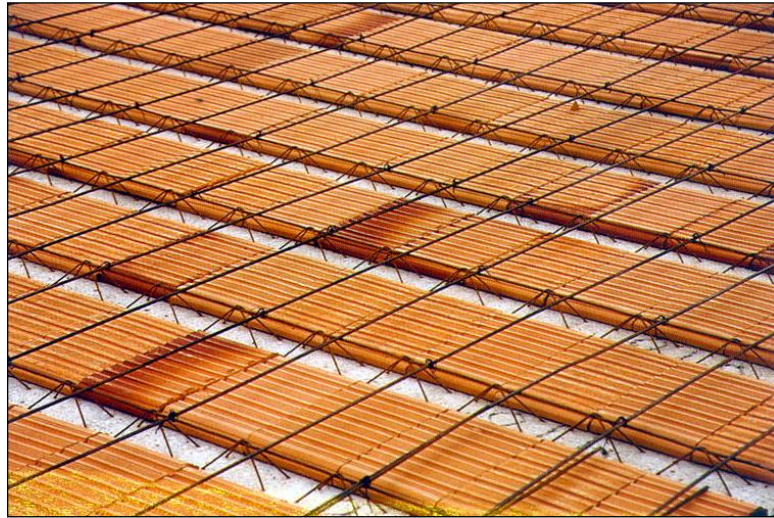


Figura 76 – Laje pré-fabricada do tipo treliçada (FAULIM, 1998).

5.2 LAJE TRELIÇA

A laje treliça surgiu na Europa com o propósito de ser uma opção mais econômica que as lajes maciças de concreto, sendo utilizada em vários países do mundo. Possibilitam vencer grandes vãos com menor peso próprio e redução de mão de obra durante sua execução.

Na laje treliça a armadura das nervuras tem a forma de uma treliça espacial (Figura 77). O banzo inferior é constituído por duas barras e o banzo superior por uma barra. Os banzos inferior e superior são unidos por barras diagonais inclinadas (em sinusóide), soldadas por eletrofusão. Proporcionam rigidez ao conjunto, melhoram o transporte e manuseio das vigotas já prontas e aumentam a resistência aos esforços cortantes.

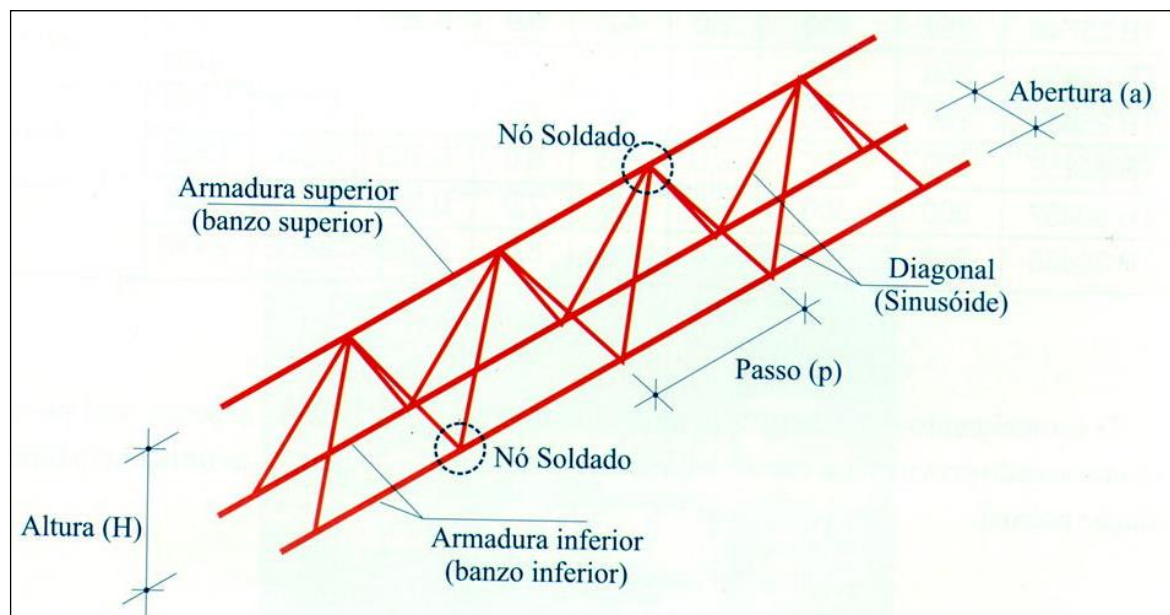


Figura 77 – Armação em forma de treliça espacial (FAULIM, 1998).

As vigotas ou trilhos são constituídos pela armação treliçada com as barras do banzo inferior envolvidas por concreto, em forma de uma placa fina, como mostrado na Figura 78.

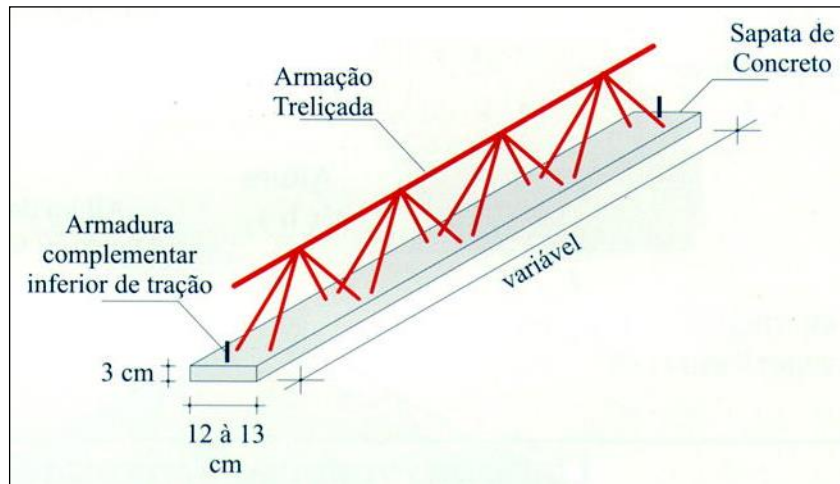


Figura 78 – Nervura da laje treliçada (FAULIM, 1998).

As vigotas, em conjunto com a capa de concreto (ou mesa), fornecem a resistência necessária à laje, atuando para resistir aos momentos fletores e às forças cortantes. Servem de apoio também aos blocos cerâmicos ou de isopor (EPS). As vigotas treliçadas constituem as nervuras principais (vigas) da laje treliçada.

As vigotas podem conter barras longitudinais adicionais, que proporcionam maior resistência à flexão possibilitando vencer vãos maiores.

Os blocos de enchimento exercem a função de dar forma ao concreto (Figura 79), dando forma às nervuras e à capa, além de proporcionarem superfícies inferiores lisas. Os materiais de enchimento devem ser preferencialmente leves e de custo baixo, sendo mais comuns os de material cerâmico, principalmente para as edificações de pequeno porte. Outros materiais são o concreto celular autoclavado e o EPS. Por serem elementos vazados e constituídos de material mais leve que o concreto, reduzem o peso próprio das lajes. Os blocos cerâmicos são produzidos segundo diversas e diferentes dimensões, conforme o fabricante (Tabela 24). São normalmente fornecidos pelo fabricante em conjunto com as vigotas da laje treliçada.

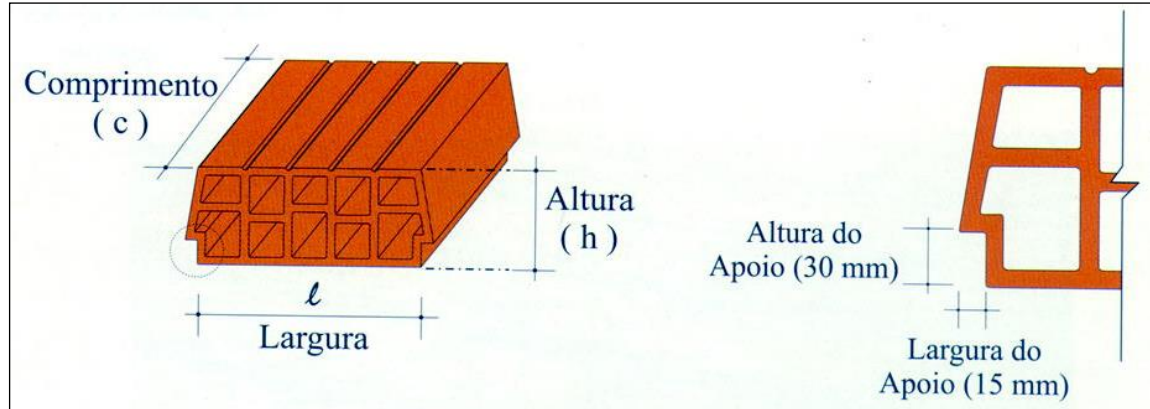


Figura 79 – Bloco cerâmico de enchimento (FAULIM, 1998).

Tabela 24 - Dimensões dos blocos cerâmicos de enchimento (FAULIM, 1998).

Designação	H 7/25/20	H 7/30/20	H 10/30/20	H 12/30/20	H 16/30/20	H 20/30/20
Altura h (cm)	7	7	12	16	20	10
Largura ℓ (cm)	25	30	30	30	30	30
Comprimento c (cm)	20	20	20	20	20	20
Massa Unitária (kg/peça)	2,0	2,3	3,0	3,8	4,8	5,2

5.2.1 Nervura Transversal

As nervuras transversais devem ser dispostas na direção perpendicular às nervuras principais, a cada dois metros. São construídas entre os blocos, afastados entre si para permitir a penetração do concreto e a colocação de armadura longitudinal, como indicado na Figura 80.

As nervuras transversais exercem a função de travamento lateral das nervuras principais, levando a uma melhor uniformidade do comportamento estrutural das nervuras, contribuindo na redistribuição dos esforços solicitantes.

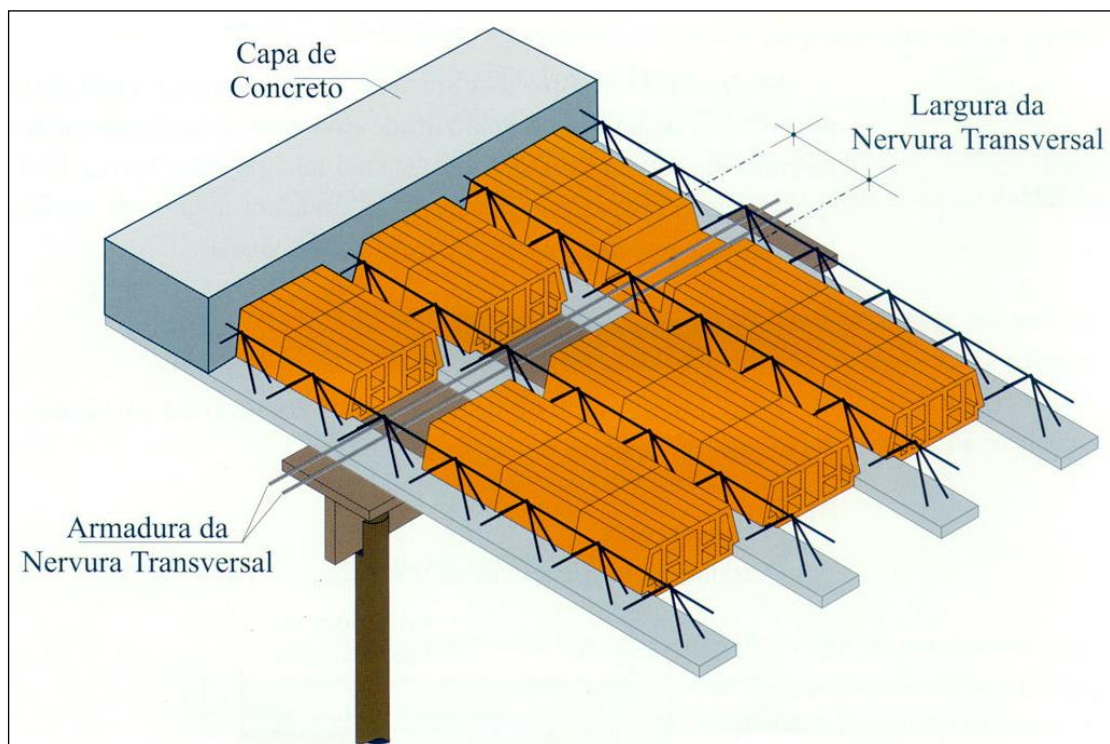


Figura 80 – Nervura transversal (FAULIM, 1998).

5.2.2 Armadura Complementar

A armadura complementar tem a função de aumentar a resistência das lajes aos momentos fletores positivos e negativos. A armadura positiva é composta por barras de aço dispostas ao longo do comprimento das nervuras, as quais se somam às duas barras do banzo inferior. Pode estar situada dentro da placa de concreto ou sobre ela, como indicado na Figura 81. A armadura longitudinal negativa é posicionada próxima à face superior da capa (Figura 82), e tem o objetivo de aumentar a resistência da laje aos momentos negativos.

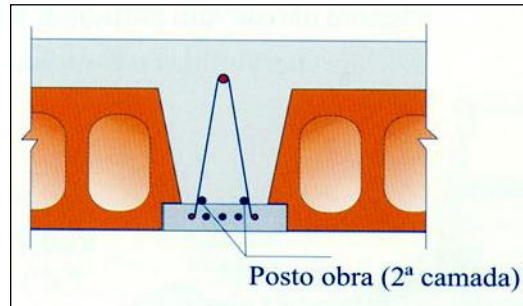


Figura 81 – Armadura complementar positiva (FAULIM, 1998).

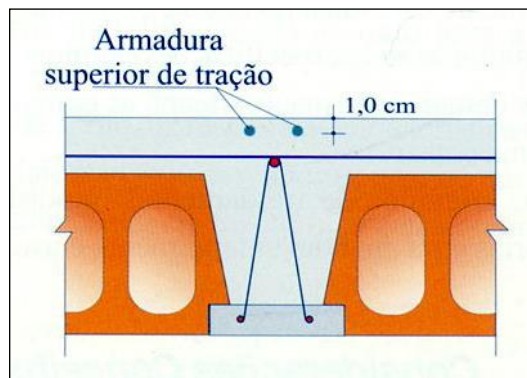


Figura 82 – Armadura complementar negativa (FAULIM, 1998).

5.2.3 Armadura de Distribuição

É a armadura que fica posicionada transversalmente às nervuras e sobre a barra do banzo superior da treliça (Figura 83). Esta armadura tem algumas funções: aumentar a resistência da mesa à flexão e à força cortante, fazer as nervuras trabalharem mais conjuntamente e melhorar a ligação entre a mesa e as nervuras a fim de criar a seção T.

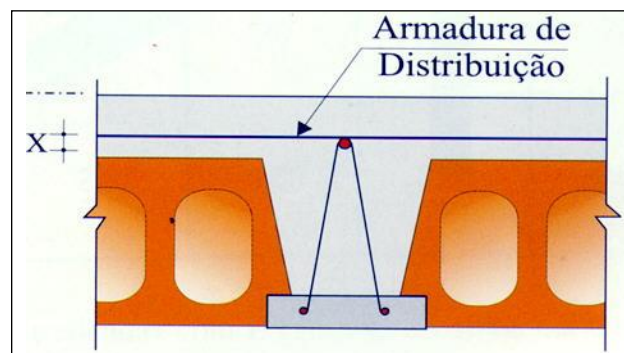


Figura 83 – Armadura complementar na capa (FAULIM, 1998).

5.2.4 Parede Sobre Laje

Parede paralela às nervuras pode ser sustentada pela associação de duas ou mais nervuras, ou por uma viga de concreto, moldada no local, com a altura da laje (Figura 84 e Figura 85). Ambas as soluções requerem um cálculo de verificação ou dimensionamento, a fim de evitar fissuras e/ou flechas indesejáveis.

Alvenaria sobre a Laje

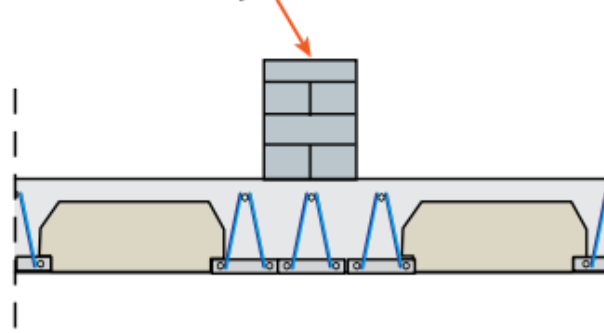
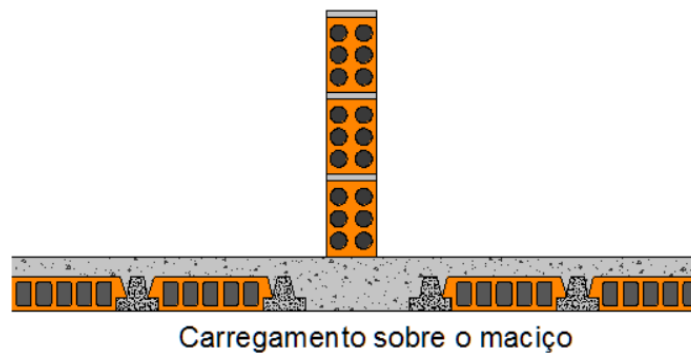


Figura 84 – Parede sobre três nervuras (Fonte: Catálogo ArcelorMittal).



Carregamento sobre o maciço

Figura 85 – Parede sobre região maciça de concreto (Fonte: http://faq.altoqi.com.br/content/274/1651/pt-br/paredes-de-alvenaria-apoiadas-em-lajes-pre_moldadas.html).

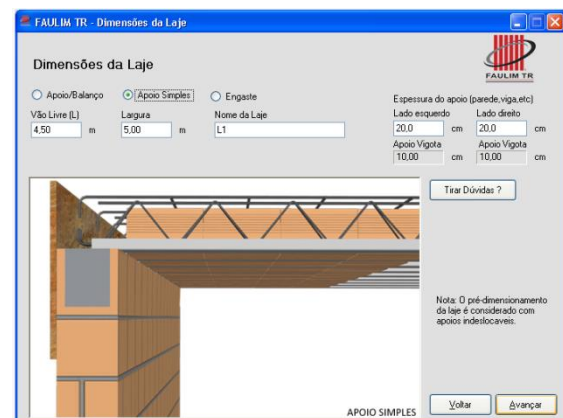
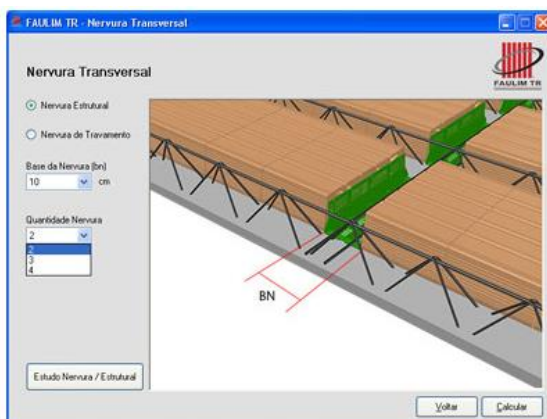
5.2.5 Escolha da Laje

Para a escolha das dimensões da laje, os principais parâmetros iniciais são os seguintes:

- vãos efetivos;
- ações, abrangendo os carregamentos permanentes e variáveis;
- vinculação nos apoios;
- tipo de utilização da laje.

Com o auxílio de tabelas ou programas computacionais, normalmente fornecidas pelo fabricante da laje, pode-se determinar as características da laje para diversas finalidades, como as especificações da armadura em treliça, a lajota cerâmica, as armaduras complementares, nervuras transversais, etc. Deve-se ter atenção especial com relação à flecha final da laje. A Figura 86 ilustra imagens do programa computacional do fabricante Faulim¹⁶.

Especial atenção deve ser dispensada a lajes com possibilidade de vibração em função da utilização, como pisos de academias de ginástica, por exemplo.



¹⁶ Faulim: http://www.faulim.com.br/departamentotecnico/software_listagem.php

The image shows two parts of the FAULIM TR software. On the left is a window titled 'Resultado Simplificado' (Simplified Result) with various input and output fields. On the right is a window titled 'EXEMPLO DE MONTAGEM' (EXAMPLE OF ASSEMBLY) showing a 3D cutaway of a slab with reinforcement and formwork.

Resultado Simplificado

Vão livre: 4,50
 Vão teórico: 4,70 Largura: 5,00
 Nome da Laje: L1
 Vínculo de apoio: Apoio Simples Fck: 200 Aço: ACD CA50

Cargas Consideradas:
 Carga Acidental: 50,00
 Cargas Permanentes Adicionais: 50,00
 Carga Permanente de Peso Próprio: 249,87
 Carga Total: 100,00
 Carga de Parede: 0

Materiais para Vigota:
 Armadura Treçada: TR12 845 Armadura Complementar Adicional Positiva: 0 apo adicional
 Área de aço Treçada: 0,393 cm² Área de aço Escolhido: 0,785 cm²
 Área de aço Adicional: 0,522 cm² Área de aço Total Escolhido: 1,178 cm²
 Área de aço Total: 0,915 cm² Escalonamento 0 adicional

Elemento de Enchimento:
 Material: Cerâmico Altura: H 12/30/20
 Nervura Transversal: Qtd Nervura: 2 Base: 10,0
 Aço Nervura: [2Ø10,0mm CA50 ou 3Ø7,0mm CA60]
 Aços Complementares Adicionados na Obra:
 Armadura Distribuição: 1Ø4,2mmCA60 a cada 15cm ou EQ-92
 Armadura Negativa: 1Ø6,3mm cada Vigota Área: 0,312 cm²

Dimensões Gerais:
 Carga de Concreto: 5,0 Distância máxima escoras (m): 1,10
 Laje Acabada: 17,00
 Intel-Eixo: 43,00 Consumo Concreto (m³/m²): 0,071

Flêchas - Deformações da Laje Usar Contra Flêcha ? Digite >
 Flêcha devido a Carga Acidental: -1,22 < 1,34 Flêcha aceitável para carga acidental L/250
 Flêcha total Final: 1,41 < 1,88 Flêcha aceitável para carga total L/250

EXEMPLO DE MONTAGEM

Armadura negativa Armadura do nervura transversal Armadura de distribuição

Lojota
 Condição Multifuncional
 Suporte para linha de escora
 Guia para controventamento
 Distância entre as linhas de escora
 Aplicação de contra flêxa (curva) Composição do solo para receber as escoras

Figura 86 – Programa computacional para projeto de laje treçada da empresa FAULIM.

6. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*, NBR 6118. ABNT, 2014, 238p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*, NBR 6120. ABNT, 2019, 61p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Ações e segurança nas estruturas – Procedimento*, NBR 8681. ABNT, 2003, 18p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Lajes pré-fabricadas de concreto. Parte 1: Vigotas, minipainéis e painéis - Requisitos*, NBR 14859-1. ABNT, 2016, 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Lajes pré-fabricadas de concreto. Parte 2: Elementos inertes para enchimento e fôrma - Requisitos*, NBR 14859-2. ABNT, 2016, 18p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Lajes pré-fabricadas de concreto. Parte 3: Armadura treçadas eletrossoldadas para lajes pré-fabricadas - Requisitos*, NBR 14859-3. ABNT, 2017, 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Lajes alveolares pré-moldadas de concreto protendido - Requisitos e procedimentos*, NBR 14861. ABNT, 2011, 36p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Laje pré-fabricada - Avaliação do desempenho de vigotas e pré-lajes sob carga de trabalho*, NBR 15522. ABNT, 2007, 12p.
- HAHN, J. *Vigas continuas, porticos, placas y vigas flotantes sobre lecho elastico*. Barcelona, Ed. Gustavo Gili, 1972.
- LAJES FAULIM (1998). Manual.
- LEONHARDT, F. ; MÖNNIG, E. *Construções de concreto - Princípios básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado*, vol. 1/3. Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 1984.
- PINHEIRO, L. M. *Concreto armado: tabelas e ábacos*. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Departamento de Engenharia de Estruturas, 1994.
- ROCHA, A. M. *Concreto armado*, vol. 3. São Paulo, Ed. Nobel, 1987.
- SICAL. (2001). *Catálogos*.
- SOUZA, V.C.M.; CUNHA, A.J.P. (1994). *Lajes em Concreto Armado e Protendido*. Niterói, Ed. da Universidade Federal Fluminense, 580p.

TABELAS ANEXAS

Tabela A-1									
FLECHAS EM LAJES COM CARGA UNIFORME – VALORES DE α									
$\lambda = \frac{\ell_y}{\ell_x}$	Tipo de Laje								
	1	2A	2B	3	4A	4B	5A	5B	6
1,00	4,76	3,26	3,26	2,46	2,25	2,25	1,84	1,84	1,49
1,05	5,26	3,68	3,48	2,72	2,60	2,35	2,08	1,96	1,63
1,10	5,74	4,11	3,70	2,96	2,97	2,45	2,31	2,08	1,77
1,15	6,20	4,55	3,89	3,18	3,35	2,53	2,54	2,18	1,90
1,20	6,64	5,00	4,09	3,40	3,74	2,61	2,77	2,28	2,02
1,25	7,08	5,44	4,26	3,61	4,14	2,68	3,00	2,37	2,14
1,30	7,49	5,88	4,43	3,80	4,56	2,74	3,22	2,46	2,24
1,35	7,90	6,32	4,58	3,99	5,01	2,77	3,42	2,53	2,34
1,40	8,29	6,74	4,73	4,15	5,41	2,80	3,62	2,61	2,41
1,45	8,67	7,15	4,87	4,31	5,83	2,85	3,80	2,67	2,49
1,50	9,03	7,55	5,01	4,46	6,25	2,89	3,98	2,73	2,56
1,55	9,39	7,95	5,09	4,61	6,66	2,91	4,14	2,78	2,62
1,60	9,71	8,32	5,18	4,73	7,06	2,92	4,30	2,82	2,68
1,65	10,04	8,68	5,22	4,86	7,46	2,92	4,45	2,83	2,73
1,70	10,34	9,03	5,26	4,97	7,84	2,93	4,59	2,84	2,77
1,75	10,62	9,36	5,36	5,06	8,21	2,93	4,71	2,86	2,81
1,80	10,91	9,69	5,46	5,16	8,58	2,94	4,84	2,88	2,85
1,85	11,16	10,00	5,53	5,25	8,93	2,94	4,96	2,90	2,88
1,90	11,41	10,29	5,60	5,33	9,25	2,95	5,07	2,92	2,90
1,95	11,65	10,58	5,68	5,41	9,58	2,95	5,17	2,94	2,93
2,00	11,89	10,87	5,76	5,49	9,90	2,96	5,28	2,96	2,96
∞	15,63	15,63	6,50	6,50	15,63	3,13	6,50	3,13	3,13

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

$$a_i = \frac{\alpha p \ell_x^4}{12 EI}$$

p = carga uniforme ℓ_x = menor vão ℓ_y = maior vão
 E = módulo elasticidade h = altura da laje

Tabela A-2									
FLECHAS EM LAJES COM CARGA UNIFORME – VALORES DE α e α_B									
$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	Tipo								$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$
	7		8		9		10		
	α	α_B	α	α_B	α	α_B	α	α_B	
< 0,30	-	-	-	-	53,13	150,00	53,13	150,00	< 0,30
0,30	215,71	412,59	134,64	231,63	41,98	110,02	37,64	97,00	0,30
0,35	163,97	309,59	95,26	164,37	37,48	96,70	31,65	78,05	0,35
0,40	122,22	206,59	55,88	97,11	32,98	83,37	25,65	59,09	0,40
0,45	88,76	160,99	41,73	71,35	29,06	71,61	20,89	46,71	0,45
0,50	65,29	115,39	27,58	45,59	25,14	59,85	16,13	34,33	0,50
0,55	52,96	92,40	21,35	34,38	22,12	51,42	13,22	27,07	0,55
0,60	40,63	69,40	15,11	23,16	19,09	42,98	10,31	19,81	0,60
0,65	33,58	56,48	12,07	18,03	16,80	37,00	8,53	15,96	0,65
0,70	26,52	43,56	9,03	12,89	14,50	31,01	6,74	12,11	0,70
0,75	22,14	35,64	7,41	10,31	12,79	26,67	5,63	9,82	0,75
0,80	17,75	27,71	5,78	7,73	11,08	22,33	4,52	7,53	0,80
0,85	15,23	23,54	4,82	6,32	9,78	19,25	3,84	6,19	0,85
0,90	12,71	19,37	3,86	4,90	8,47	16,16	3,15	4,84	0,90
0,95	10,92	16,48	3,26	4,08	7,49	13,96	2,71	4,04	0,95
1,00	9,13	13,58	2,66	3,25	6,50	11,76	2,26	3,24	1,00
1,05	9,46	13,85	2,71	3,26	6,91	12,19	2,34	3,26	1,05
1,10	9,79	14,11	2,76	3,28	7,32	12,60	2,42	3,27	1,10
1,15	10,12	14,38	2,81	3,29	7,72	13,01	2,49	3,29	1,15
1,20	10,45	14,64	2,86	3,30	8,13	13,46	2,57	3,30	1,20
1,25	10,69	14,77	2,88	3,31	8,46	13,72	2,61	3,31	1,25
1,30	10,93	14,91	2,90	3,31	8,80	13,97	2,64	3,31	1,30
1,35	11,18	15,04	2,93	3,32	9,13	14,23	2,68	3,32	1,35
1,40	11,42	15,17	2,95	3,33	9,46	14,48	2,71	3,33	1,40
1,45	11,66	15,31	2,97	3,33	9,80	14,74	2,75	3,33	1,45
1,50	11,90	15,44	2,99	3,34	10,13	14,99	2,78	3,34	1,50
1,55	12,04	15,50	3,00	3,34	10,35	15,09	2,79	3,34	1,55
1,60	12,18	15,55	3,00	3,34	10,57	15,19	2,80	3,34	1,60
1,65	12,31	15,61	3,01	3,35	10,79	15,29	2,81	3,35	1,65
1,70	12,45	15,66	3,01	3,35	11,01	15,39	2,82	3,35	1,70
1,75	12,59	15,72	3,02	3,35	12,23	15,50	2,83	3,35	1,75
1,80	12,73	15,78	3,02	3,35	11,44	15,60	2,84	3,35	1,80
1,85	12,87	15,83	3,03	3,35	11,66	15,70	2,85	3,35	1,85
1,90	13,00	15,89	3,03	3,36	11,88	15,80	2,86	3,36	1,90
1,95	13,14	15,94	3,04	3,36	12,10	15,90	2,87	3,36	1,95
2,00	13,28	16,00	3,04	3,36	12,32	16,00	2,88	3,36	2,00
∞	15,63	16,00	3,13	3,36	15,63	16,00	3,13	3,36	∞

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

$$a_i = \frac{\alpha p l_x^4}{12 EI}$$

α = coeficiente centro da laje α_b = coeficiente centro da borda livre

p = carga uniforme l = menor valor entre l_a e l_b

h = altura da laje E = módulo de elasticidade

Tabela A-3								
VALORES de α PARA CÁLCULO DE FLECHA EM LAJES COM CARGA TRIANGULAR								
$\gamma = \frac{\ell_a}{\ell_b}$	Tipo							
< 0,50	7,82	2,87	3,66	1,57	7,82	2,87	3,66	1,57
0,50	5,93	2,58	3,32	1,54	4,94	2,38	3,09	1,47
0,55	5,50	2,48	3,19	1,51	4,37	2,21	2,84	1,42
0,60	5,07	2,38	3,06	1,47	3,79	2,03	2,59	1,37
0,65	4,67	2,28	2,91	1,44	3,30	1,87	2,36	1,30
0,70	4,26	2,17	2,75	1,41	2,80	1,70	2,13	1,22
0,75	3,90	2,06	2,61	1,38	2,44	1,55	1,94	1,14
0,80	3,54	1,95	2,46	1,34	2,07	1,40	1,74	1,06
0,85	3,23	1,85	2,31	1,29	1,80	1,26	1,56	0,98
0,90	2,92	1,74	2,16	1,24	1,52	1,11	1,37	0,90
0,95	2,65	1,62	2,02	1,18	1,34	0,99	1,21	0,83
1,00	2,38	1,50	1,87	1,12	1,15	0,87	1,05	0,75
1,05	2,62	1,71	2,11	1,30	1,22	0,93	1,14	0,82
1,10	2,86	1,92	2,35	1,48	1,29	0,99	1,23	0,90
1,15	3,11	2,13	2,62	1,68	1,36	1,05	1,30	0,96
1,20	3,35	2,34	2,89	1,88	1,43	1,11	1,37	1,02
1,25	3,59	2,54	3,15	2,08	1,49	1,17	1,44	1,07
1,30	3,81	2,74	3,39	2,28	1,52	1,21	1,47	1,11
1,35	4,03	2,94	3,63	2,48	1,54	1,24	1,50	1,15
1,40	4,25	3,14	3,86	2,68	1,57	1,27	1,53	1,19
1,45	4,46	3,33	4,09	2,88	1,60	1,30	1,55	1,22
1,50	4,64	3,53	4,28	3,09	1,62	1,32	1,57	1,24
1,55	4,82	3,72	4,48	3,30	1,64	1,34	1,58	1,26
1,60	5,01	3,91	4,68	3,51	1,67	1,36	1,60	1,28
1,65	5,19	4,10	4,87	3,71	1,69	1,38	1,62	1,31
1,70	5,36	4,26	5,05	3,90	1,72	1,43	1,64	1,34
1,80	5,71	4,55	5,40	4,25	1,79	1,54	1,68	1,43
1,85	5,88	4,69	5,57	4,43	1,82	1,59	1,70	1,47
1,90	6,05	4,83	5,74	4,61	1,85	1,65	1,72	1,51
1,95	6,23	4,98	5,91	4,78	1,89	1,70	1,74	1,56
2,00	6,40	5,12	6,08	4,96	1,92	1,76	1,76	1,60

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

$$a_i = \frac{\alpha p \ell_x^4}{12 EI}$$

p = carga máxima
 h = altura da laje
 ℓ = menor valor entre ℓ_a e ℓ_b
 E = módulo de elasticidade
 α = coeficiente da flecha máxima

Tabela A-4									
FLECHAS EM LAJES COM CARGA TRIANGULAR – VALORES DE α e α_B									
$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	Tipo								$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$
	α	α_B	α	α_B	α	α_B	α	α_B	
< 0,30	-	-	-	-	15,31	40,00	15,31	40,00	< 0,30
0,30	73,83	123,05	46,33	75,28	13,03	30,40	11,58	24,61	0,30
0,35	57,30	95,65	33,24	52,53	11,33	26,42	9,46	19,18	0,35
0,40	40,77	68,25	20,15	29,77	9,62	22,44	7,33	13,74	0,40
0,45	32,30	53,08	15,33	21,92	8,75	19,38	6,01	11,00	0,45
0,50	23,83	37,90	10,51	14,07	7,88	16,32	4,69	8,25	0,50
0,55	19,38	30,04	8,47	10,66	7,06	14,13	4,11	6,71	0,55
0,60	14,93	22,17	6,42	7,24	6,24	11,94	3,53	5,16	0,60
0,65	12,45	18,00	5,19	5,58	5,52	10,15	3,09	4,05	0,65
0,70	9,96	13,82	3,96	3,91	4,79	8,35	2,64	2,93	0,70
0,75	8,45	11,31	3,27	3,02	4,29	7,17	2,28	2,31	0,75
0,80	6,93	8,79	2,58	2,12	3,78	5,98	1,92	1,69	0,80
0,85	6,01	7,28	2,17	1,65	3,38	5,13	1,62	1,36	0,85
0,90	5,08	5,77	1,75	1,18	2,97	4,27	1,32	1,02	0,90
0,95	4,37	4,86	1,49	0,93	2,66	3,67	1,14	0,82	0,95
1,00	3,65	3,94	1,23	0,67	2,34	3,06	0,95	0,62	1,00
1,05	3,83	3,96	1,26	0,64	2,55	3,16	1,01	0,60	1,05
1,10	4,02	3,98	1,28	0,62	2,76	3,26	1,08	0,58	1,10
1,15	4,20	4,00	1,31	0,59	2,96	3,36	1,14	0,56	1,15
1,20	4,38	4,02	1,33	0,56	3,17	3,46	1,20	0,54	1,20
1,25	4,52	3,98	1,35	0,53	3,34	3,46	1,23	0,52	1,25
1,30	4,66	3,95	1,36	0,51	3,51	3,45	1,26	0,50	1,30
1,35	4,80	3,91	1,38	0,48	3,68	3,45	1,29	0,47	1,35
1,40	4,94	3,87	1,39	0,46	3,86	3,45	1,31	0,45	1,40
1,45	5,07	3,84	1,41	0,43	4,03	3,44	1,34	0,43	1,45
1,50	5,21	3,80	1,42	0,41	4,20	3,44	1,37	0,41	1,50
1,55	5,31	3,76	1,42	0,40	4,34	3,42	1,38	0,40	1,55
1,60	5,42	3,71	1,42	0,39	4,48	3,39	1,38	0,39	1,60
1,65	5,52	3,67	1,43	0,38	4,62	3,37	1,39	0,38	1,65
1,70	5,62	3,62	1,43	0,37	4,76	3,34	1,40	0,37	1,70
1,75	5,73	3,58	1,43	0,36	4,90	3,32	1,41	0,36	1,75
1,80	5,83	3,54	1,43	0,35	5,04	3,30	1,41	0,35	1,80
1,85	5,93	3,49	1,43	0,35	5,18	3,27	1,42	0,35	1,85
1,90	6,03	3,45	1,44	0,34	5,32	3,25	1,43	0,34	1,90
1,95	6,14	3,40	1,44	0,33	5,46	3,22	1,43	0,33	1,95
2,00	6,24	3,36	1,44	0,32	5,60	3,20	1,44	0,32	2,00

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

$$a_i = \frac{\alpha p l_x^4}{12 EI}$$

p = carga máxima
 h = altura da laje
 α = coeficiente centro da laje

l = menor valor entre l_a e l_b
 E = módulo de elasticidade
 α_b = coeficiente centro da borda livre

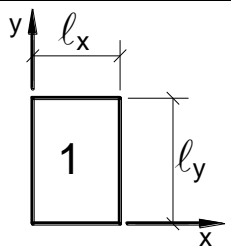
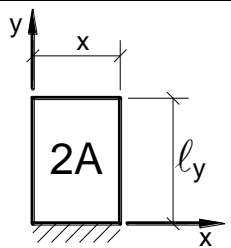
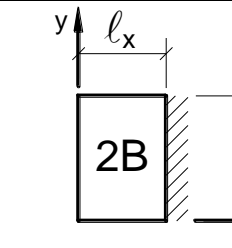
Tabela A-5									
REAÇÕES DE APOIO EM LAJES COM CARGA UNIFORME									
$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	Tipo								$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$
									
	v_x	v_y	v_x	v_y	v'_y	v_x	v'_x	v_y	
1,00	2,50	2,50	1,83	2,75	4,02	2,75	4,02	1,83	1,00
1,05	2,62	2,50	1,92	2,80	4,10	2,82	4,13	1,83	1,05
1,10	2,73	2,50	2,01	2,85	4,17	2,89	4,23	1,83	1,10
1,15	2,83	2,50	2,10	2,88	4,22	2,95	4,32	1,83	1,15
1,20	2,92	2,50	2,20	2,91	4,27	3,01	4,41	1,83	1,20
1,25	3,00	2,50	2,29	2,94	4,30	3,06	4,48	1,83	1,25
1,30	3,08	2,50	2,38	2,95	4,32	3,11	4,55	1,83	1,30
1,35	3,15	2,50	2,47	2,96	4,33	3,16	4,62	1,83	1,35
1,40	3,21	2,50	2,56	2,96	4,33	3,20	4,68	1,83	1,40
1,45	3,28	2,50	2,64	2,96	4,33	3,24	4,74	1,83	1,45
1,50	3,33	2,50	2,72	2,96	4,33	3,27	4,79	1,83	1,50
1,55	3,39	2,50	2,80	2,96	4,33	3,31	4,84	1,83	1,55
1,60	3,44	2,50	2,87	2,96	4,33	3,34	4,89	1,83	1,60
1,65	3,48	2,50	2,93	2,96	4,33	3,37	4,93	1,83	1,65
1,70	3,53	2,50	2,99	2,96	4,33	3,40	4,97	1,83	1,70
1,75	3,57	2,50	3,05	2,96	4,33	3,42	5,01	1,83	1,75
1,80	3,61	2,50	3,10	2,96	4,33	3,45	5,05	1,83	1,80
1,85	3,65	2,50	3,15	2,96	4,33	3,47	5,09	1,83	1,85
1,90	3,68	2,50	3,20	2,96	4,33	3,50	5,12	1,83	1,90
1,95	3,72	2,50	3,25	2,96	4,33	3,52	5,15	1,83	1,95
2,00	3,75	2,50	3,29	2,96	4,33	3,54	5,18	1,83	2,00
> 2,00	5,00	2,50	5,00	2,96	4,33	4,38	6,25	1,83	> 2,00

Tabela elaborada por PINHEIRO (1994) conforme NBR 6118.

$V = v \frac{p l_x}{10}$ $p =$ carga uniforme $l_x =$ menor vão

(*) os alívios foram considerados pela metade, prevendo a possibilidade de engastes parciais.

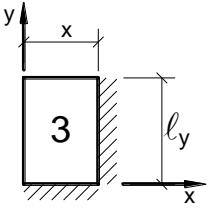
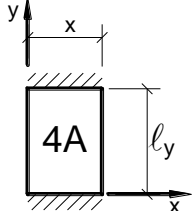
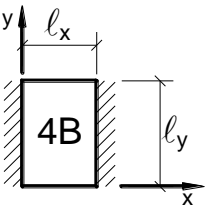
Tabela A-6										
REAÇÕES DE APOIO EM LAJES COM CARGA UNIFORME										
$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	Tipo								$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	
										
	v_x	v'_x	v_y	v'_y	v_x	v'_y	v'_x	v_y		
1,00	2,17	3,17	2,17	3,17	1,44	3,56	3,56	1,44	1,00	
1,05	2,27	3,32	2,17	3,17	1,52	3,66	3,63	1,44	1,05	
1,10	2,36	3,46	2,17	3,17	1,59	3,75	3,69	1,44	1,10	
1,15	2,45	3,58	2,17	3,17	1,66	3,84	3,74	1,44	1,15	
1,20	2,53	3,70	2,17	3,17	1,73	3,92	3,80	1,44	1,20	
1,25	2,60	3,80	2,17	3,17	1,80	3,99	3,85	1,44	1,25	
1,30	2,63	3,90	2,17	3,17	1,88	4,06	3,89	1,44	1,30	
1,35	2,73	3,99	2,17	3,17	1,95	4,12	3,93	1,44	1,35	
1,40	2,78	4,08	2,17	3,17	2,02	4,17	3,97	1,44	1,40	
1,45	2,84	4,15	2,17	3,17	2,09	4,22	4,00	1,44	1,45	
1,50	2,89	4,23	2,17	3,17	2,17	4,25	4,04	1,44	1,50	
1,55	2,93	4,29	2,17	3,17	2,24	4,28	4,07	1,44	1,55	
1,60	2,98	4,36	2,17	3,17	2,31	4,30	4,10	1,44	1,60	
1,65	3,02	4,42	2,17	3,17	2,38	4,32	4,13	1,44	1,65	
1,70	3,06	4,48	2,17	3,17	2,45	4,33	4,15	1,44	1,70	
1,75	3,09	4,53	2,17	3,17	2,53	4,33	4,18	1,44	1,75	
1,80	3,13	4,58	2,17	3,17	2,59	4,33	4,20	1,44	1,80	
1,85	3,16	4,63	2,17	3,17	2,63	4,33	4,22	1,44	1,85	
1,90	3,19	4,67	2,17	3,17	2,72	4,33	4,24	1,44	1,90	
1,95	3,22	4,71	2,17	3,17	2,78	4,33	4,26	1,44	1,95	
2,00	3,25	4,75	2,17	3,17	2,83	4,33	4,28	1,44	2,00	
> 2,00	4,38	6,25	2,17	3,17	5,00	4,33	5,00	1,44	> 2,00	

Tabela elaborada por PINHEIRO (1994) conforme NBR 6118.

$V = v \frac{p l_x}{10}$ $p =$ carga uniforme $l_x =$ menor vão

(*) os alvíos foram considerados pela metade, prevendo a possibilidade de engastes parciais.

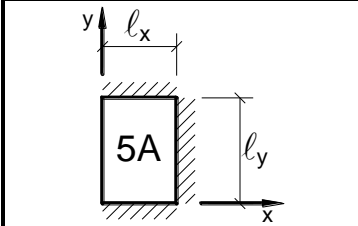
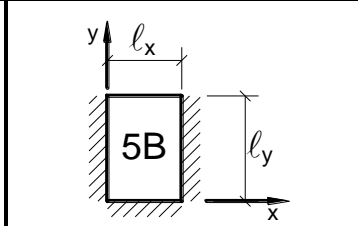
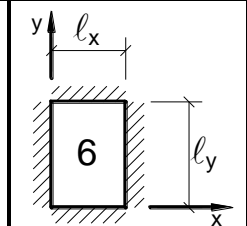
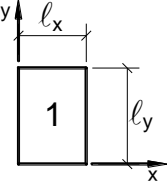
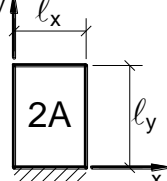
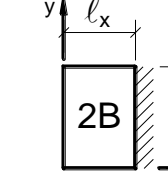
Tabela A-7									
REAÇÕES DE APOIO EM LAJES COM CARGA UNIFORME									
$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	Tipo								$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$
									
	v_x	v'_x	v'_y	v'_x	v_y	v'_y	v'_x	v'_y	
1,00	1,71	2,50	3,03	3,03	1,71	2,50	2,50	2,50	1,00
1,05	1,79	2,63	3,08	3,12	1,71	2,50	2,62	2,50	1,05
1,10	1,88	2,75	3,11	3,21	1,71	2,50	2,73	2,50	1,10
1,15	1,96	2,88	3,14	3,29	1,71	2,50	2,83	2,50	1,15
1,20	2,05	3,00	3,16	3,36	1,71	2,50	2,92	2,50	1,20
1,25	2,13	3,13	3,17	3,42	1,71	2,50	3,00	2,50	1,25
1,30	2,22	3,25	3,17	3,48	1,71	2,50	3,08	2,50	1,30
1,35	2,30	3,36	3,17	3,54	1,71	2,50	3,15	2,50	1,35
1,40	2,37	3,47	3,17	3,59	1,71	2,50	3,21	2,50	1,40
1,45	2,44	3,57	3,17	3,64	1,71	2,50	3,28	2,50	1,45
1,50	2,50	3,66	3,17	3,69	1,71	2,50	3,33	2,50	1,50
1,55	2,56	3,75	3,17	3,73	1,71	2,50	3,39	2,50	1,55
1,60	2,61	3,83	3,17	3,77	1,71	2,50	3,44	2,50	1,60
1,65	2,67	3,90	3,17	3,81	1,71	2,50	3,48	2,50	1,65
1,70	2,72	3,98	3,17	3,84	1,71	2,50	3,53	2,50	1,70
1,75	2,76	4,04	3,17	3,87	1,71	2,50	3,57	2,50	1,75
1,80	2,80	4,11	3,17	3,90	1,71	2,50	3,61	2,50	1,80
1,85	2,85	4,17	3,17	3,93	1,71	2,50	3,65	2,50	1,85
1,90	2,89	4,22	3,17	3,96	1,71	2,50	3,68	2,50	1,90
1,95	2,92	4,28	3,17	3,99	1,71	2,50	3,72	2,50	1,95
2,00	2,96	4,33	3,17	4,01	1,71	2,50	3,75	2,50	2,00
> 2,00	4,38	6,25	3,17	5,00	1,71	2,50	5,00	2,50	> 2,00

Tabela elaborada por PINHEIRO (1994) conforme NBR 6118.

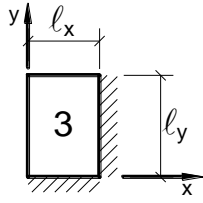
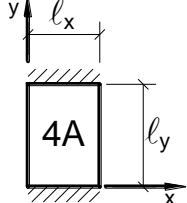
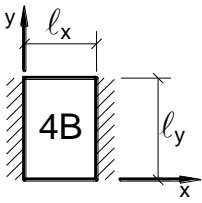
$V = v \frac{p l_x}{10}$ $p =$ carga uniforme $l_x =$ menor vão

(*) os alvíos foram considerados pela metade, prevendo a possibilidade de engastes parciais.

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

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994).

$M = \mu \frac{p l_x^2}{100}$ $p =$ carga uniforme $l_x =$ menor vão

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

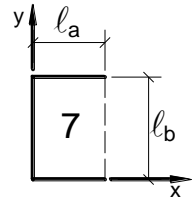
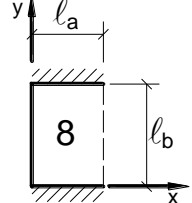
Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994).

$M = \mu \frac{p l_x^2}{100}$
 $p =$ carga uniforme
 $l_x =$ menor vão

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

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994).

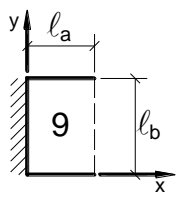
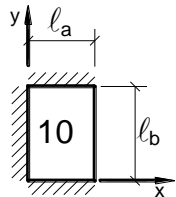
$M = \mu \frac{p l_x^2}{100}$ $p =$ carga uniforme $l_x =$ menor vão

Tabela A-11									
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA UNIFORME									
Tipo							Tipo		
$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	μ_x	μ_y	μ_{yb}	μ_x	μ_y	μ_{yb}	μ'_y	μ'_{yb}	$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$
0,30	11,33	15,89	28,44	10,44	14,22	25,55	41,89	77,00	0,30
0,35	10,63	15,60	27,19	8,85	12,86	22,37	35,69	62,94	0,35
0,40	9,94	15,31	25,94	7,25	11,50	19,19	29,50	48,88	0,40
0,45	9,13	14,48	24,47	6,22	10,39	16,82	25,89	41,36	0,45
0,50	8,32	13,64	23,00	5,20	9,28	14,44	22,28	33,84	0,50
0,55	7,58	12,95	21,56	4,57	8,35	12,82	19,64	28,76	0,55
0,60	6,83	12,25	20,11	3,94	7,42	11,19	17,00	23,67	0,60
0,65	6,21	11,59	18,71	3,46	6,76	9,94	15,26	20,55	0,65
0,70	5,59	10,92	17,31	2,98	6,10	8,69	13,51	17,43	0,70
0,75	5,09	10,24	15,86	2,61	5,54	7,77	12,28	15,38	0,75
0,80	4,59	9,55	14,41	2,23	4,98	6,84	11,05	13,33	0,80
0,85	4,16	9,09	13,61	1,96	4,65	6,15	10,12	11,91	0,85
0,90	3,73	8,63	12,80	1,68	4,31	5,46	9,19	10,49	0,90
0,95	3,39	8,14	11,94	1,47	3,97	4,96	8,45	9,49	0,95
1,00	3,05	7,64	11,08	1,26	3,62	4,45	7,71	8,48	1,00
1,05	3,05	7,94	11,31	1,23	3,68	4,45	7,80	8,48	1,05
1,10	3,06	8,24	11,55	1,19	3,74	4,46	7,88	8,47	1,10
1,15	3,06	8,53	11,78	1,16	3,80	4,47	7,97	8,46	1,15
1,20	3,07	8,83	12,01	1,12	3,86	4,47	8,05	8,46	1,20
1,25	3,03	9,01	12,12	1,09	3,90	4,47	8,09	8,46	1,25
1,30	3,00	9,19	12,22	1,06	3,93	4,47	8,13	8,46	1,30
1,35	2,97	9,38	12,33	1,03	3,97	4,48	8,17	8,46	1,35
1,40	2,94	9,56	12,43	0,99	4,01	4,48	8,20	8,45	1,40
1,45	2,91	9,74	12,54	0,96	4,05	4,49	8,24	8,45	1,45
1,50	2,88	9,92	12,64	0,92	4,08	4,49	8,28	8,45	1,50
1,55	2,84	10,04	12,69	0,90	4,09	4,49	8,29	8,45	1,55
1,60	2,81	10,16	12,74	0,88	4,10	4,49	8,29	8,45	1,60
1,65	2,77	10,29	12,80	0,86	4,11	4,49	8,30	8,45	1,65
1,70	2,74	10,41	12,85	0,84	4,12	4,49	8,30	8,45	1,70
1,75	2,70	10,53	12,90	0,82	4,13	4,50	8,31	8,45	1,75
1,80	2,66	10,65	12,95	0,80	4,13	4,50	8,31	8,45	1,80
1,85	2,63	10,77	13,00	0,78	4,14	4,50	8,32	8,45	1,85
1,90	2,59	10,90	13,06	0,76	4,15	4,50	8,32	8,45	1,90
1,95	2,56	11,02	13,11	0,74	4,16	4,50	8,33	8,45	1,95
2,00	2,52	11,14	13,16	0,72	4,17	4,50	8,33	8,45	2,00
> 2,00	2,52	12,50	13,16	0,72	4,17	4,50	8,33	8,45	> 2,00

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

$M = \mu \frac{p \ell^2}{100}$ $p =$ carga uniforme $\ell =$ menor valor entre l_a e l_b

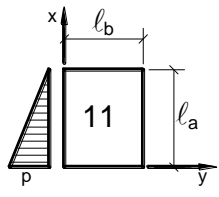
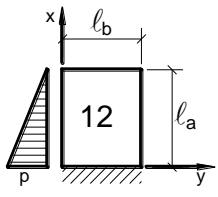
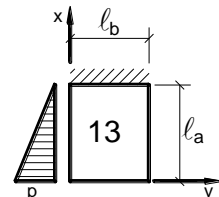
$M_b =$ momento ao longo da borda livre

Tabela A-12												
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA UNIFORME												
Tipo											Tipo	
$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	μ_x	μ'_x	μ_y	μ_{yb}	μ_x	μ'_x	μ_y	μ_{yb}	μ'_y	μ'_{yb}	$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	
< 0,30	-12,50	50,00	0,78	6,22	-12,5	50,00	2,11	8,67	14,56	37,00	< 0,30	
0,30	-7,33	43,08	0,78	6,22	-4,89	38,33	2,11	8,67	14,56	37,00	0,30	
0,35	-5,17	39,98	1,89	7,89	-2,57	33,08	3,18	9,74	14,84	35,53	0,35	
0,40	-3,00	36,87	3,00	9,56	-0,25	27,83	4,25	10,81	15,13	34,06	0,40	
0,45	-1,78	33,89	3,62	10,54	0,54	23,94	4,53	10,77	14,26	31,21	0,45	
0,50	-0,56	30,91	4,24	11,52	1,32	20,04	4,80	10,72	13,40	28,36	0,50	
0,55	0,25	28,02	4,62	11,82	1,62	17,40	4,86	9,99	12,48	25,26	0,55	
0,60	1,06	25,13	5,00	12,11	1,92	14,76	4,92	9,25	11,56	22,17	0,60	
0,65	1,47	22,90	5,25	12,12	1,91	12,91	4,68	8,55	10,81	19,63	0,65	
0,70	1,88	20,66	5,49	12,12	1,90	11,06	4,43	7,84	10,06	17,08	0,70	
0,75	2,06	18,84	5,61	11,81	1,82	9,86	4,14	7,15	9,42	15,17	0,75	
0,80	2,23	17,02	5,72	11,50	1,73	8,65	3,86	6,45	8,77	13,25	0,80	
0,85	2,26	15,59	5,66	11,05	1,64	7,78	3,59	5,86	8,19	11,87	0,85	
0,90	2,28	14,16	5,60	10,59	1,54	6,91	3,33	5,26	7,60	10,49	0,90	
0,95	2,25	12,99	5,48	10,07	1,40	6,25	3,11	4,81	7,12	9,50	0,95	
1,00	2,21	11,82	5,36	9,55	1,25	5,59	2,88	4,35	6,64	8,51	1,00	
1,05	2,33	11,91	5,72	9,91	1,25	5,59	2,98	4,37	6,82	8,50	1,05	
1,10	2,45	12,00	6,08	10,27	1,24	5,58	3,08	4,39	6,99	8,50	1,10	
1,15	2,57	12,08	6,44	10,62	1,24	5,58	3,18	4,41	7,17	8,49	1,15	
1,20	2,69	12,17	6,80	10,98	1,24	5,57	3,27	4,43	7,34	8,48	1,20	
1,25	2,67	12,20	7,09	11,20	1,20	5,57	3,34	4,44	7,44	8,48	1,25	
1,30	2,64	12,22	7,37	11,42	1,17	5,57	3,41	4,45	7,54	8,47	1,30	
1,35	2,62	12,25	7,55	11,64	1,14	5,57	3,49	4,46	7,64	8,47	1,35	
1,40	2,59	12,28	7,93	11,85	1,11	5,58	3,56	4,47	7,73	8,47	1,40	
1,45	2,57	12,31	8,22	12,07	1,09	5,58	3,63	4,48	7,83	8,46	1,45	
1,50	2,54	12,33	8,50	12,29	1,06	5,58	3,70	4,49	7,93	8,46	1,50	
1,55	2,56	12,35	8,68	12,37	1,04	5,58	3,74	4,49	7,97	8,46	1,55	
1,60	2,58	12,36	8,86	12,45	1,01	5,58	3,77	4,49	8,00	8,46	1,60	
1,65	2,59	12,38	9,04	12,53	0,99	5,57	3,81	4,49	8,04	8,46	1,65	
1,70	2,61	12,39	9,22	12,61	0,97	5,57	3,84	4,49	8,08	8,46	1,70	
1,75	2,63	12,41	9,41	12,68	0,95	5,57	3,88	4,50	8,12	8,46	1,75	
1,80	2,65	12,42	9,59	12,76	0,93	5,57	3,92	4,50	8,15	8,45	1,80	
1,85	2,67	12,44	9,76	12,84	0,91	5,57	3,95	4,50	8,19	8,45	1,85	
1,90	2,68	12,45	9,94	12,92	0,88	5,56	3,99	4,50	8,23	8,45	1,90	
1,95	2,70	12,47	10,13	13,00	0,86	5,56	4,02	4,50	8,26	8,45	1,95	
2,00	2,72	12,48	10,31	13,08	0,84	5,56	4,06	4,50	8,30	8,45	2,00	
> 2,00	2,72	12,48	12,50	13,08	0,84	5,56	4,17	4,50	8,33	8,45	> 2,00	

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

$M = \mu \frac{p \ell^2}{100}$ $p =$ carga uniforme $\ell =$ menor valor entre l_a e l_b

$M_b =$ momento ao longo da borda livre

Tabela A-13									
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA TRIANGULAR									
Tipo				Tipo					
$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	μ_x	μ_y	μ_x	μ'_x	μ_y	μ_x	μ'_x	μ_y	$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$
< 0,50	6,41	1,60	2,98	6,67	0,92	4,23	5,83	1,28	< 0,50
0,50	5,14	1,60	2,81	6,53	0,92	3,94	5,60	1,28	0,50
0,55	4,83	1,72	2,73	6,41	0,99	3,80	5,46	1,31	0,55
0,60	4,52	1,83	2,65	6,29	1,06	3,66	5,31	1,33	0,60
0,65	4,21	1,92	2,54	6,13	1,12	3,49	5,11	1,39	0,65
0,70	3,90	2,00	2,43	5,97	1,16	3,32	4,90	1,45	0,70
0,75	3,63	2,05	2,31	5,79	1,21	3,15	4,68	1,50	0,75
0,80	3,35	2,09	2,19	5,61	1,23	2,98	4,46	1,55	0,80
0,85	3,11	2,12	2,07	5,42	1,26	2,83	4,24	1,59	0,85
0,90	2,86	2,14	1,94	5,23	1,28	2,67	4,02	1,63	0,90
0,95	2,64	2,13	1,83	5,09	1,31	2,52	3,77	1,67	0,95
1,00	2,41	2,12	1,72	4,95	1,34	2,36	3,52	1,70	1,00
1,05	2,47	2,32	1,78	5,20	1,51	2,44	3,64	1,92	1,05
1,10	2,53	2,51	1,84	5,44	1,68	2,53	3,75	2,13	1,10
1,15	2,58	2,71	1,90	5,68	1,87	2,60	3,86	2,34	1,15
1,20	2,64	2,90	1,96	5,92	2,05	2,68	3,96	2,55	1,20
1,25	2,66	3,10	2,00	6,13	2,23	2,73	4,02	2,76	1,25
1,30	2,70	3,28	2,06	6,37	2,40	2,79	4,07	2,96	1,30
1,35	2,73	3,46	2,10	6,59	2,58	2,83	4,09	3,17	1,35
1,40	2,76	3,64	2,14	6,80	2,75	2,86	4,12	3,37	1,40
1,45	2,79	3,81	2,17	7,00	2,92	2,89	4,14	3,56	1,45
1,50	2,81	3,97	2,21	7,20	3,08	2,93	4,16	3,74	1,50
1,55	2,84	4,12	2,23	7,38	3,24	2,95	4,17	3,92	1,55
1,60	2,87	4,27	2,25	7,55	3,39	2,97	4,17	4,09	1,60
1,65	2,85	4,43	2,25	7,66	3,56	2,95	4,12	4,27	1,65
1,70	2,83	4,59	2,25	7,76	3,72	2,94	4,08	4,46	1,70
1,75	2,84	4,72	2,27	7,92	3,85	2,96	4,06	4,60	1,75
1,80	2,85	4,85	2,30	8,07	3,98	2,98	4,05	4,74	1,80
1,85	2,84	4,98	2,33	8,18	4,11	2,97	4,01	4,89	1,85
1,90	2,84	5,11	2,35	8,29	4,23	2,96	3,97	5,03	1,90
1,95	2,80	5,24	2,34	8,34	4,36	2,92	3,87	5,18	1,95
2,00	2,78	5,36	2,32	8,40	4,48	2,88	3,76	5,32	2,00

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

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

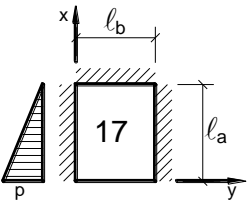
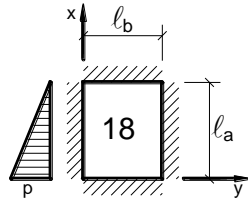
l = menor valor entre l_a e l_b

Tabela A-14												
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA TRIANGULAR												
Tipo												Tipo
$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	μ_x	μ'_{xi}	μ'_{xs}	μ_y	μ_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$
< 0,50	2,15	5,00	3,33	0,68	6,41	1,80	6,12	2,98	6,67	0,96	3,60	< 0,50
0,50	2,13	5,12	3,36	0,68	4,42	1,80	6,12	2,59	6,14	0,96	3,60	0,50
0,55	2,11	5,09	3,35	0,73	3,97	1,87	5,87	2,43	5,90	0,93	3,59	0,55
0,60	2,08	5,06	3,33	0,78	3,52	1,94	5,61	2,27	5,65	0,89	3,58	0,60
0,65	2,04	5,00	3,29	0,83	3,15	1,96	5,42	2,10	5,35	1,03	3,53	0,65
0,70	1,99	4,93	3,24	0,88	2,78	1,98	5,22	1,92	5,05	1,16	3,47	0,70
0,75	1,93	4,83	3,17	0,92	2,52	1,94	4,99	1,75	4,75	1,21	3,38	0,75
0,80	1,87	4,72	3,09	0,95	2,26	1,89	4,75	1,57	4,45	1,25	3,28	0,80
0,85	1,81	4,64	3,00	0,97	2,08	1,83	4,49	1,45	4,47	1,24	3,17	0,85
0,90	1,74	4,56	2,90	0,99	1,86	1,77	4,23	1,33	3,89	1,23	3,06	0,90
0,95	1,67	4,44	2,79	1,00	1,69	1,69	3,99	1,22	3,65	1,21	2,96	0,95
1,00	1,60	4,32	2,67	1,01	1,51	1,62	3,75	1,11	3,40	1,19	2,85	1,00
1,05	1,70	4,64	2,81	1,18	1,52	1,72	3,89	1,13	3,50	1,29	3,03	1,05
1,10	1,79	4,96	2,94	1,34	1,54	1,81	4,02	1,15	3,60	1,38	3,20	1,10
1,15	1,87	5,23	3,03	1,51	1,55	1,89	4,14	1,15	3,69	1,47	3,36	1,15
1,20	1,94	5,50	3,15	1,67	1,56	1,97	4,26	1,16	3,78	1,54	3,51	1,20
1,25	2,02	5,75	3,23	1,84	1,53	2,04	4,38	1,16	3,84	1,61	3,66	1,25
1,30	2,06	6,05	3,31	2,02	1,52	2,10	4,46	1,17	3,94	1,67	3,78	1,30
1,35	2,11	6,33	3,35	2,21	1,50	2,17	4,57	1,18	3,99	1,73	3,92	1,35
1,40	2,15	6,61	3,39	2,39	1,47	2,23	4,67	1,19	4,05	1,79	4,05	1,40
1,45	2,18	6,82	3,45	2,56	1,46	2,28	4,75	1,20	4,11	1,84	4,16	1,45
1,50	2,21	7,04	3,51	2,72	1,44	2,32	4,82	1,21	4,18	1,90	4,27	1,50
1,55	2,22	7,21	3,56	2,88	1,42	2,36	4,94	1,22	4,22	1,96	4,36	1,55
1,60	2,23	7,37	3,61	3,03	1,41	2,40	5,06	1,23	4,27	2,02	4,46	1,60
1,65	2,22	7,49	3,63	3,20	1,37	2,44	5,15	1,23	4,30	2,08	4,55	1,65
1,70	2,22	7,60	3,64	3,37	1,33	2,47	5,23	1,23	4,33	2,13	4,63	1,70
1,75	2,24	7,77	3,68	3,51	1,31	2,49	5,32	1,25	4,38	2,18	4,69	1,75
1,80	2,27	7,94	3,73	3,66	1,30	2,51	5,41	1,26	4,44	2,23	4,75	1,80
1,85	2,29	8,08	3,74	3,81	1,26	2,53	5,49	1,26	4,48	2,28	4,81	1,85
1,90	2,31	8,23	3,75	3,95	1,23	2,54	5,57	1,26	4,51	2,33	4,86	1,90
1,95	2,30	8,32	3,74	4,10	1,17	2,56	5,65	1,25	4,50	2,38	4,92	1,95
2,00	2,28	8,40	3,72	4,24	1,12	2,58	5,72	1,24	4,48	2,43	4,98	2,00

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

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

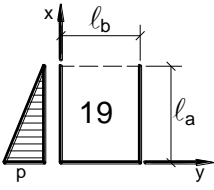
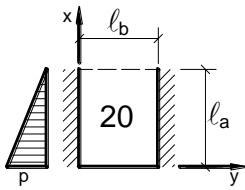
$l =$ menor valor entre l_a e l_b

Tabela A-15										
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA TRIANGULAR										
Tipo									Tipo	
$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	μ_x	μ'_x	μ_y	μ'_y	μ_x	μ'_{xi}	μ'_{xs}	μ_y	μ'_y	$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$
< 0,50	4,23	5,83	1,16	4,64	2,15	5,00	3,33	0,80	2,92	< 0,50
0,50	3,62	5,12	1,16	4,64	2,07	4,94	3,23	0,80	2,92	0,50
0,55	3,38	4,83	1,23	4,61	1,99	4,84	3,16	0,79	2,95	0,55
0,60	3,13	4,53	1,31	4,58	1,91	4,74	3,08	0,78	2,97	0,60
0,65	2,90	4,18	1,39	4,53	1,81	4,59	2,93	0,80	2,98	0,65
0,70	2,67	3,82	1,47	4,47	1,70	4,44	2,78	0,82	2,98	0,70
0,75	2,47	3,48	1,52	4,33	1,62	4,26	2,62	0,87	2,94	0,75
0,80	2,27	3,13	1,56	4,19	1,53	4,08	2,45	0,92	2,91	0,80
0,85	2,08	2,84	1,55	4,02	1,44	3,89	2,28	0,97	2,89	0,85
0,90	1,88	2,55	1,54	3,85	1,34	3,70	2,11	1,01	2,86	0,90
0,95	1,72	2,30	1,52	3,73	1,24	3,50	1,94	1,02	2,78	0,95
1,00	1,55	2,05	1,49	3,61	1,14	3,30	1,76	1,03	2,70	1,00
1,05	1,58	1,99	1,60	3,75	1,17	3,43	1,75	1,14	2,90	1,05
1,10	1,60	1,93	1,71	3,89	1,20	3,56	1,75	1,25	3,09	1,10
1,15	1,60	1,90	1,80	4,03	1,21	3,66	1,73	1,34	3,26	1,15
1,20	1,59	1,86	1,89	4,18	1,22	3,76	1,73	1,42	3,43	1,20
1,25	1,56	1,80	1,98	4,32	1,20	3,83	1,69	1,51	3,59	1,25
1,30	1,57	1,76	2,05	4,46	1,22	3,92	1,67	1,58	3,74	1,30
1,35	1,56	1,69	2,12	4,61	1,21	3,98	1,63	1,66	3,90	1,35
1,40	1,55	1,63	2,19	4,75	1,20	4,04	1,59	1,74	4,05	1,40
1,45	1,55	1,58	2,25	4,87	1,21	4,11	1,56	1,81	4,17	1,45
1,50	1,55	1,54	2,30	4,98	1,22	4,18	1,53	1,88	4,28	1,50
1,55	1,55	1,49	2,35	5,08	1,22	4,22	1,49	1,95	4,38	1,55
1,60	1,55	1,43	2,40	5,18	1,23	4,27	1,45	2,01	4,48	1,60
1,65	1,54	1,38	2,44	5,28	1,23	4,30	1,40	2,07	4,56	1,65
1,70	1,53	1,33	2,49	5,38	1,23	4,33	1,35	2,13	4,65	1,70
1,75	1,53	1,31	2,51	5,47	1,25	4,38	1,33	2,17	4,71	1,75
1,80	1,52	1,30	2,53	5,55	1,26	4,44	1,30	2,21	4,77	1,80
1,85	1,48	1,26	2,56	5,64	1,26	4,48	1,26	2,25	4,83	1,85
1,90	1,44	1,23	2,58	5,73	1,26	4,51	1,23	2,29	4,88	1,90
1,95	1,40	1,17	2,61	5,82	1,25	4,50	1,15	2,33	4,94	1,95
2,00	1,36	1,12	2,63	5,91	1,24	4,48	1,08	2,37	5,00	2,00

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

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

ℓ = menor valor entre l_a e l_b

Tabela A-16									
MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA TRIANGULAR									
Tipo									Tipo
$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$	μ_x	μ_y	μ_{yb}	μ_x	μ_y	μ_{yb}	μ'_y	μ'_{yb}	$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$
0,30	5,78	5,78	9,56	5,89	5,00	8,11	15,33	23,56	0,30
0,35	5,49	5,67	9,09	5,32	4,66	7,15	13,48	18,87	0,35
0,40	5,19	5,56	8,63	4,75	4,31	6,19	11,63	14,19	0,40
0,45	4,80	5,30	8,11	4,16	3,96	5,39	10,35	11,65	0,45
0,50	4,40	5,04	7,60	3,56	3,60	4,60	9,08	9,12	0,50
0,55	4,05	4,97	7,05	3,09	3,33	3,95	8,16	7,37	0,55
0,60	3,69	4,89	6,50	2,61	3,06	3,31	7,28	5,61	0,60
0,65	3,39	4,54	6,02	2,28	2,82	2,86	6,64	4,62	0,65
0,70	3,08	4,18	5,53	1,94	2,59	2,41	6,00	3,63	0,70
0,75	2,83	4,01	5,09	1,72	2,41	2,09	5,52	3,03	0,75
0,80	2,58	3,83	4,64	1,50	2,22	1,77	5,03	2,42	0,80
0,85	2,36	3,63	4,25	1,31	2,07	1,54	4,64	2,03	0,85
0,90	2,13	3,43	3,86	1,12	1,91	1,31	4,25	1,63	0,90
0,95	1,95	3,27	3,57	1,00	1,79	1,14	3,95	1,38	0,95
1,00	1,76	3,10	3,27	0,87	1,67	0,96	3,65	1,13	1,00
1,05	1,77	3,25	3,29	0,84	1,72	0,93	3,72	1,08	1,05
1,10	1,77	3,40	3,31	0,82	1,77	0,90	3,79	1,03	1,10
1,15	1,78	3,55	3,32	0,79	1,82	0,86	3,86	0,97	1,15
1,20	1,79	3,70	3,34	0,76	1,87	0,83	3,93	0,92	1,20
1,25	1,77	3,82	3,31	0,74	1,90	0,80	3,97	0,88	1,25
1,30	1,75	3,93	3,27	0,71	1,92	0,77	4,00	0,85	1,30
1,35	1,74	4,05	3,24	0,69	1,95	0,74	4,04	0,81	1,35
1,40	1,72	4,17	3,21	0,66	1,98	0,70	4,07	0,77	1,40
1,45	1,70	4,26	3,17	0,63	2,00	0,67	4,11	0,74	1,45
1,50	1,69	4,40	3,14	0,61	2,03	0,64	4,14	0,70	1,50
1,55	1,66	4,48	3,10	0,59	2,04	0,62	4,15	0,68	1,55
1,60	1,64	4,56	3,06	0,57	2,04	0,60	4,16	0,65	1,60
1,65	1,61	4,64	3,02	0,55	2,05	0,57	4,17	0,63	1,65
1,70	1,59	4,72	2,98	0,53	2,05	0,55	4,18	0,60	1,70
1,75	1,56	4,80	2,95	0,50	2,06	0,53	4,20	0,58	1,75
1,80	1,54	4,88	2,91	0,48	2,07	0,51	4,21	0,56	1,80
1,85	1,51	4,96	2,87	0,46	2,07	0,49	4,22	0,53	1,85
1,90	1,50	5,04	2,83	0,44	2,08	0,46	4,23	0,51	1,90
1,95	1,47	5,12	2,79	0,42	2,08	0,44	4,24	0,48	1,95
2,00	1,44	5,20	2,75	0,40	2,09	0,42	4,25	0,46	2,00

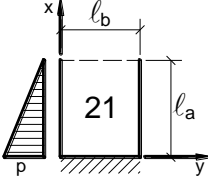
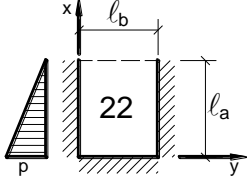
Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

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

ℓ = menor valor entre l_a e l_b

Tabela A-17

MOMENTOS FLETORES EM LAJES COM CARGA TRIANGULAR

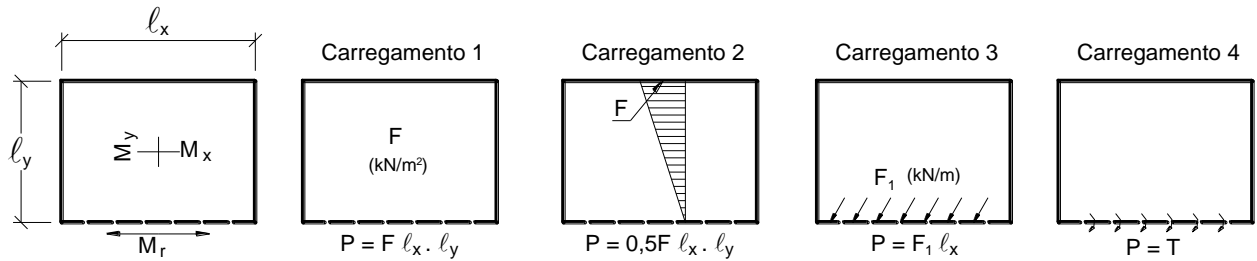
Tipo									Tipo		
	μ_x	μ'_x	μ_y	μ_{yb}	μ_x	μ'_x	μ_y	μ_{yb}		μ'_y	μ'_{yb}
$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$											$\gamma = \frac{l_a}{l_b}$
< 0,30	-4,17	16,67	0,33	1,67	-4,17	16,67	0,78	2,67	5,33	9,22	< 0,30
0,30	-1,67	15,04	0,33	1,67	-0,89	13,69	0,78	2,67	5,33	9,22	0,30
0,35	-0,81	14,23	0,64	2,12	-0,32	12,58	1,05	2,83	5,14	8,71	0,35
0,40	0,06	13,42	0,94	2,56	0,25	11,47	1,31	3,00	4,94	8,19	0,40
0,45	0,49	12,50	1,17	2,82	0,53	10,32	1,42	2,86	4,81	7,25	0,45
0,50	0,92	11,58	1,40	3,08	0,80	9,16	1,52	2,72	4,68	6,23	0,50
0,55	1,10	10,81	1,58	3,24	0,97	8,22	1,58	2,51	4,56	5,47	0,55
0,60	1,28	10,03	1,75	3,39	1,14	7,28	1,64	2,31	4,44	4,61	0,60
0,65	1,37	9,34	1,86	3,35	1,18	6,47	1,65	2,09	4,28	3,98	0,65
0,70	1,45	8,64	1,96	3,31	1,22	5,65	1,65	1,88	4,12	3,35	0,70
0,75	1,48	8,05	2,01	3,22	1,22	5,09	1,64	1,71	3,94	2,89	0,75
0,80	1,50	7,46	2,07	3,13	1,22	4,53	1,63	1,55	3,77	2,44	0,80
0,85	1,47	7,01	2,05	2,98	1,16	4,22	1,55	1,39	3,56	2,07	0,85
0,90	1,43	6,55	2,03	2,83	1,10	3,90	1,47	1,22	3,36	1,70	0,90
0,95	1,39	6,15	2,00	2,67	1,01	3,68	1,38	1,09	3,18	1,45	0,95
1,00	1,35	5,74	1,97	2,51	0,91	3,45	1,29	0,95	3,01	1,19	1,00
1,05	1,40	5,93	2,14	2,60	0,90	3,52	1,34	0,92	3,13	1,14	1,05
1,10	1,45	6,12	2,31	2,70	0,89	3,50	1,39	0,89	3,24	1,10	1,10
1,15	1,49	6,30	2,48	2,79	0,88	3,67	1,43	0,85	3,36	1,05	1,15
1,20	1,54	6,49	2,65	2,88	0,86	3,74	1,48	0,82	3,47	1,00	1,20
1,25	1,57	6,65	2,78	2,88	0,83	3,80	1,52	0,79	3,53	0,96	1,25
1,30	1,59	6,80	2,95	2,88	0,80	3,86	1,55	0,76	3,59	0,91	1,30
1,35	1,61	6,96	3,10	2,88	0,77	3,92	1,59	0,73	3,65	0,87	1,35
1,40	1,64	7,11	3,24	2,88	0,74	3,98	1,62	0,69	3,70	0,83	1,40
1,45	1,66	7,27	3,39	2,88	0,71	4,04	1,66	0,66	3,76	0,78	1,45
1,50	1,69	7,43	3,54	2,88	0,68	4,10	1,69	0,63	3,82	0,74	1,50
1,55	1,68	7,53	3,65	2,86	0,66	4,13	1,72	0,61	3,85	0,71	1,55
1,60	1,67	7,64	3,76	2,84	0,64	4,17	1,75	0,59	3,88	0,68	1,60
1,65	1,66	7,74	3,87	2,82	0,62	4,21	1,76	0,56	3,91	0,66	1,65
1,70	1,65	7,85	3,98	2,80	0,60	4,25	1,78	0,54	3,94	0,63	1,70
1,75	1,64	7,95	4,09	2,78	0,58	4,29	1,80	0,52	3,97	0,60	1,75
1,80	1,64	8,06	4,19	2,75	0,56	4,33	1,82	0,50	4,00	0,57	1,80
1,85	1,63	8,16	4,30	2,73	0,54	4,37	1,84	0,48	4,03	0,54	1,85
1,90	1,62	8,27	4,41	2,71	0,52	4,40	1,87	0,45	4,06	0,52	1,90
1,95	1,61	8,38	4,52	2,69	0,50	4,44	1,89	0,43	4,09	0,49	1,95
2,00	1,60	8,48	4,63	2,67	0,48	4,48	1,91	0,41	4,12	0,46	2,00

Valores extraídos de BARES e adaptada por PINHEIRO (1994)

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

 ℓ = menor valor entre ℓ_a e ℓ_b

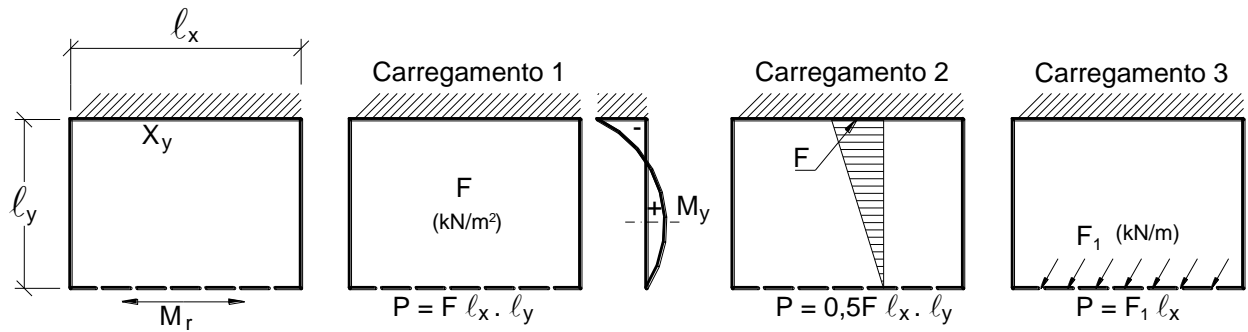
Tabela A-18 – Momentos fletores e flechas em lajes com três bordas apoiadas e uma livre.



$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	$M_r = \frac{P}{m_r}$	$M_x = \frac{P}{m_x}$	$M_y = \frac{P}{m_y}$	$M_{xy} = \frac{P}{m_{xy}}$	$a_r = \omega_r \frac{K l_x^2}{E_c h^3}$
-----------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------------	--

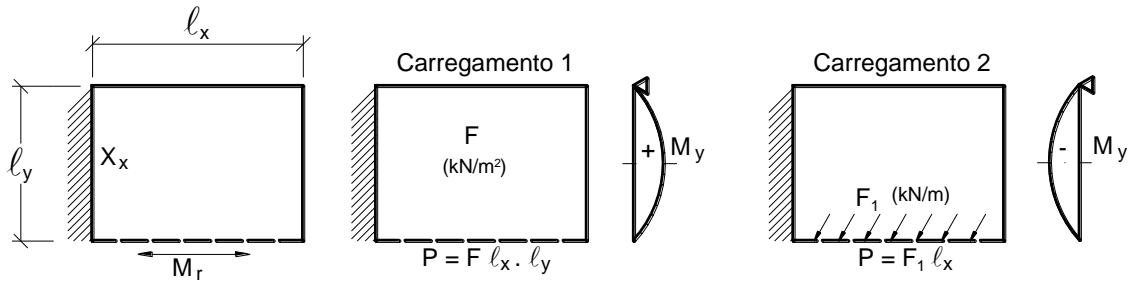
Carrega-mento	λ	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25	0,125
1	m_r	12,6	11,9	11,3	10,7	10,2	9,8	9,4	9,1	9,1	9,2	9,8	11,0	13,7	16,2	30,0
	m_x	15,3	14,9	14,5	14,1	13,8	13,7	13,6	13,8	14,2	15,2	17,0	29,2	26,3	31,5	49,0
	m_y	62,4	58,4	54,2	50,0	45,9	41,7	37,1	33,2	29,9	27,4	25,9	26,3	29,7	33,7	60,0
	m_{xy2}	22,3	20,6	19,3	17,9	16,7	15,4	14,1	12,9	11,8	10,8	10,1	9,4	8,8	8,6	8,4
	m_{xy1}	412	300	220	161	118	86,5	63,6	47,0	35,0	26,3	20,1	15,8	12,8	11,6	10,0
	ω_r	9,10	8,70	8,35	8,05	7,80	7,60	7,45	7,35	7,35	7,40	7,65	8,25	9,90	11,60	21,70
2	m_r	24,9	22,7	20,7	19,0	17,5	16,2	15,2	14,4	14,0	14,0	14,7	16,5	20,5	24,1	>40
	m_x	17,6	17,3	17,1	17,0	17,0	17,1	17,4	18,0	19,1	20,8	23,8	28,9	38,7	47,0	>70
	m_y	33,6	32,1	30,5	29,2	27,3	25,6	24,4	23,5	22,6	22,2	22,4	23,9	28,2	32,4	>60
	m_{xy2}	18,1	17,5	16,9	16,3	15,7	15,1	14,5	13,9	13,4	12,9	12,6	12,5	12,4	12,8	14,0
	M_{xy1}	-133	-134	-138	-150	-179	-263	-930	349	121	64,4	40,7	28,3	21,3	18,9	15,1
	ω_r															
3	m_r	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,2	4,3	4,5	4,9	5,6	6,9	8,1	15,9
	m_x	18,0	16,1	14,3	13,1	11,9	10,9	10,2	9,6	9,4	9,3	9,7	10,8	13,1	16,1	31,3
	$-m_y$	36,2	33,0	30,8	29,2	27,9	27,2	27,2	29,3	32,8	39,4	52,5	91,0	200	500	∞
	m_{xy}	65,0	51,5	40,5	32,4	25,6	20,4	16,0	12,6	10,2	8,3	6,9	5,8	5,2	4,9	4,2
	ω_r							3,10	3,05	3,05	3,10	3,35	3,70	4,45	5,75	7,00
4	m_r	2,95	2,94	2,93	2,92	2,91	2,90	2,85	2,80	2,74	2,65	2,50	2,35	2,29	2,08	2,0
	m_x	-18,2	-18,4	-18,8	-20,5	-23,2	-31,0	-69,0	105,0	30,0	12,5	7,9	5,7	4,6	4,2	4,0
	$-m_y$	32,1	22,4	16,5	12,8	9,8	7,6	6,1	4,8	3,4	3,1	2,5	2,2	2,1	2,0	2,0
	ω_r							2,00	1,95	1,90	1,85	1,78	1,71	1,63	1,54	1,49

Tabela A-19 – Momentos fletores em lajes com uma borda livre.



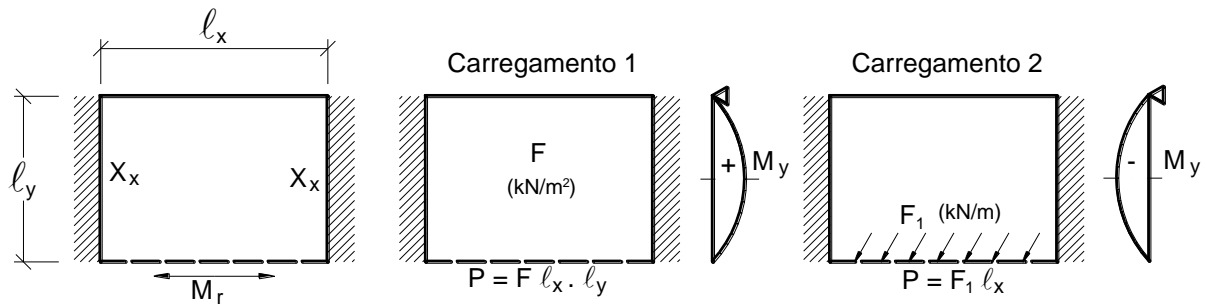
$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	$M_r = \frac{P}{m_r}$	$M_x = \frac{P}{m_x}$	$M_y = \frac{P}{m_y}$	$M_{xy} = \frac{P}{m_{xy}}$	$X_y = \frac{P}{n_y}$
-----------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------------	-----------------------

Carregam	λ	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25
1	m_r	13,1	12,5	12,1	11,7	11,5	11,4	11,5	12,0	13,0	15,2	19,4	29,4	60,2	105
	m_x	18,1	18,1	18,1	18,3	18,8	19,7	21,0	23,3	27,0	34,2	48,0	79,0	174	293
	m_y	84	77	70	64	59	55	52	54	57	68	72	85	107	124
	n_y	12,1	11,3	10,5	9,8	9,1	8,5	7,9	7,4	7,1	6,8	6,8	7,1	8,1	9,0
	m_{xy}	262	195	146	110	84	64	48	40	33	29	26	26	30	35
2	m_r	27,3	25,4	23,8	22,6	21,6	21,3	21,0	21,7	23,5	27,6	35,2	53,5	110	189
	m_x	22,3	22,7	23,3	24,3	25,6	27,5	30,5	35,0	42,3	55,0	80,5	137	307	504
	m_y	48	46	45	44	43	43	44	46	50	57	68	85	112	132
	$-n_y$	10,1	9,8	9,5	9,2	8,9	8,7	8,5	8,4	8,4	8,5	8,9	9,8	11,5	13,2
	m_{xy}	-174	-187	-215	-282	-510	∞	343	161	101	75	63	59	65	74
3	m_r	4,3	4,3	4,3	4,3	4,4	4,6	4,8	5,2	5,7	6,4	8,0	11,6	21	26
	m_x	21,7	19,8	17,5	15,2	14,2	13,7	12,5	12,6	13,5	16,1	22,2	33	52	70
	$-m_y$	39,8	35,7	32,5	29,6	27,0	24,5	22,1	20,8	18,6	16,2	14,1	12,5	11,5	11,8
	$-n_y$	35,3	29,9	21,3	16,5	12,9	10,3	8,4	7,0	5,9	5,1	4,5	4,2	4,3	4,5
	m_{xy}	7,5	7,3	7,0	6,8	6,6	6,5	6,4	6,4	6,5	6,6	6,8	7,4	9,1	10,7

Tabela A-20 – Momentos fletores em lajes com uma borda livre.

$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	$M_r = \frac{P}{m_r}$	$M_x = \frac{P}{m_x}$	$M_y = \frac{P}{m_y}$	$M_{xy} = \frac{P}{m_{xy}}$	$X_r = \frac{P}{n_r}$	$X_x = \frac{P}{n_x}$
-----------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------------	-----------------------	-----------------------

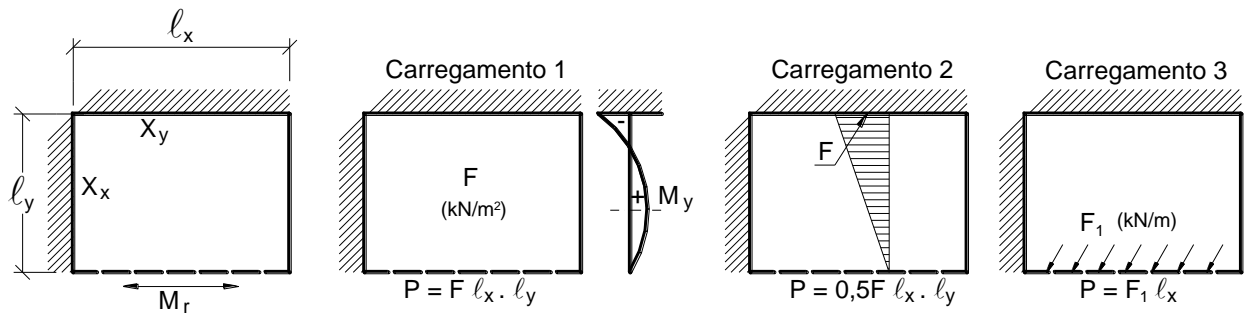
Carregam.	λ	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25
1	m_r	21,3	20,4	19,0	17,7	16,6	15,3	14,3	12,9	12,4	11,7	11,4	11,6	13,5	16,4
	m_x	25,2	23,9	22,8	21,8	20,9	20,1	19,4	18,9	18,7	18,6	19,5	21,6	26,6	31,8
	m_y	76	71	66	61	57	53	49	43	37	31	30	31	32	35
	$-n_r$	11,6	10,7	9,8	9,0	8,3	7,6	6,9	6,3	5,7	5,1	4,5	4,0	3,8	3,3
	$-n_x$	12,4	11,6	11,1	10,6	10,2	9,8	9,3	8,9	8,6	8,3	8,2	8,2	8,1	8,0
	m_{xy}	34	31,4	29,2	27,0	24,8	22,6	20,4	18,4	16,4	14,6	12,9	11,5	10,4	9,9
2	m_r	5,1	5,1	5,1	5,2	5,2	5,5	5,6	5,6	5,6	5,7	5,8	6,1	7,0	8,4
	m_x	78	60	46	34,7	25,8	21,8	17,7	14,0	11,0	9,1	7,9	7,5	7,3	8,0
	$-m_y$	24	23	22	22	22	23	23	24	24	25	30	43	72	138
	$-n_r$	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	2,0	2,0
	$-n_x$	208	134	83	56	38	29	21,4	16,2	12,0	9,3	7,7	6,3	5,3	5,2

Tabela A-21 – Momentos fletores em lajes com uma borda livre.

$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	$M_r = \frac{P}{m_r}$	$M_x = \frac{P}{m_x}$	$M_y = \frac{P}{m_y}$	$M_{xy} = \frac{P}{m_{xy}}$	$X_r = \frac{P}{n_r}$	$X_x = \frac{P}{n_x}$
-----------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------------	-----------------------	-----------------------

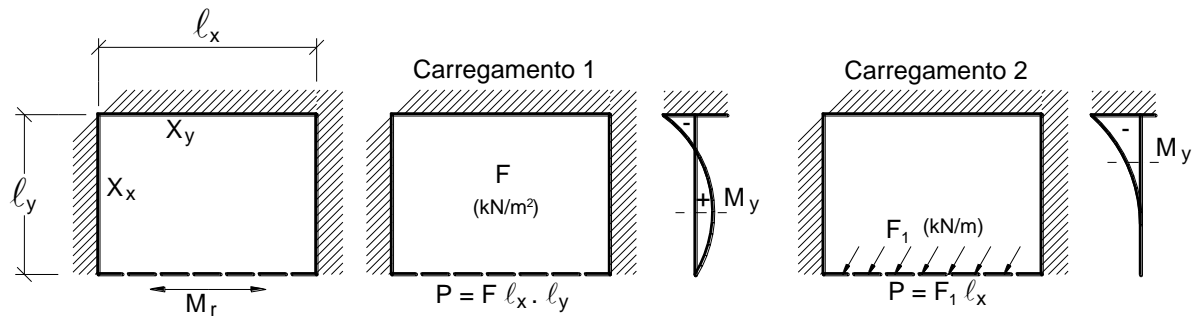
Carregam.	λ	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25
1	m_r	35,3	33,1	30,7	28,2	25,9	23,5	21,4	19,3	17,5	16,0	14,8	14,5	15,4	17,2
	m_x	37,1	35,1	33,3	31,4	29,9	28,4	26,9	25,7	24,7	23,8	23,8	24,8	28,2	32,3
	m_y	108	102	96	90	83	76	68	60	53	48	42,4	38,2	37,5	37,5
	$-n_r$	17,3	16,0	14,8	13,6	12,4	11,2	10,0	8,8	7,6	6,5	5,5	4,8	4,3	4,1
	$-n_x$	17,2	16,5	15,5	14,5	13,5	12,6	11,8	11,0	10,2	9,6	9,1	8,7	8,4	8,3
2	m_r	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,1	7,1	7,1	7,0	7,0	7,2	7,8	8,8
	m_x	140	105	77	56	42	33	27	21	17	15	14	14	14	15
	$-m_y$	20	20	20	20	20	20	20	20	20	22	26	35	65	120
	$-n_r$	2,3	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0
	$-n_x$	275	174	106	70	46,1	34,6	25,0	18,6	13,5	10,1	7,9	6,3	5,3	5,2

Tabela A-22 – Momentos fletores em lajes com uma borda livre.



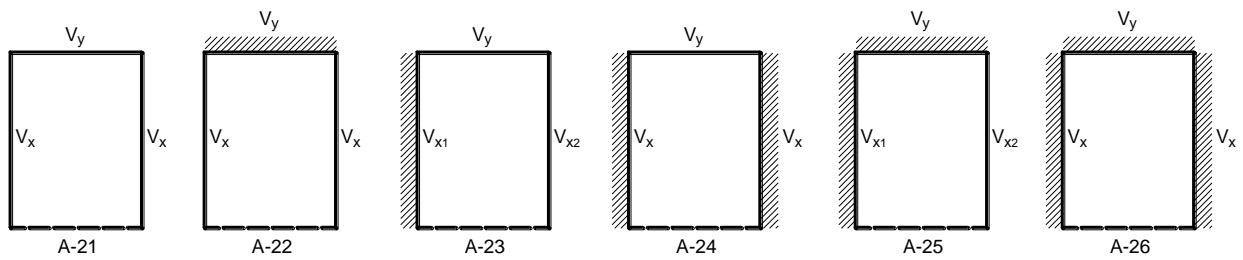
$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	$M_r = \frac{P}{m_r}$	$M_x = \frac{P}{m_x}$	$M_y = \frac{P}{m_y}$	$X_r = \frac{P}{n_r}$	$X_x = \frac{P}{n_x}$	$X_y = \frac{P}{n_y}$
-----------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Carregamento	λ	2,0	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25
1	m_r	30,1	26,7	23,7	22,5	21,0	19,8	18,6	17,4	16,4	15,6	15,1	15,4	16,0	19,1	25,2	41,0	54,0
	m_x	33,2	30,3	27,3	27,6	27,0	26,5	26,0	25,9	26,0	26,5	27,9	30,5	34,9	44,0	63,5	118	196
	m_y	201	195	137	130	123	115	106	95	83	73	67	66	71	80	105	247	550
	$-n_r$	14,7	13,3	11,9	11,2	10,3	9,6	9,0	8,4	7,8	7,2	6,7	6,3	6,0	5,9	6,0	6,9	7,6
	$-n_x$	17,9	16,3	14,8	14,1	13,4	13,0	12,6	12,3	12,1	12,2	12,3	12,9	13,6	15,1	17,4	22,3	26,1
	$-n_y$	25,3	22,9	20,5	19,3	18,0	16,7	15,4	14,1	12,8	11,5	10,3	9,2	8,4	8,0	7,9	8,4	9,1
2	m_r	95	72	56,6		45,9		37,1		31,9		28,2		30,6	36,7	48,6		101
	m_x	38	34,3	31,7		30,4		30,6		32,6		38,4		51,2	66	89		165
	m_y	77	75,1	73,3		67,8		62,0		55,1		52,4		62,0	75	98		178
	$-n_r$	44,3	39,3	33,0		27,6		22,6		18,2		14,5		11,3	11,5	11,8		14,2
	$-n_x$	19,3	17,6	16,2		15,1		14,5		14,4		15,3		17,9	20,4	24,0		40,2
	$-n_y$	18,1	16,8	15,5		14,2		13,0		11,8		10,8		10,2	10,4	11,0		13,8
3	m_r	5,5	5,5	5,5	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,7	5,7	5,8	5,9	6,6	7,2	9,8	14,0	18,5
	m_x	73	61	49	55	47	39	32	26	21	19,1	17,1	18,3	20,1	23,5	29,1	45	58
	$-m_y$	73,5	62,1	51,8	22,8	23,4	23,5	24,0	23,8	23,2	22,0	20,2	18,3	16,4	14,4	12,8	11,8	11,4
	$-n_r$	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2	2,3	2,4	2,9	3,6	4,2
	$-n_x$	81	63	47,3		34,8		24,2		16,1		11,6	11,9	10,4	10,8	11,8	13,7	14,7
	$-n_y$			301	230	152	105	70	48	34	24	14,1	10,1	7,6	6,1	5,5	5,2	5,1

Tabela A-23 – Momentos fletores em lajes com uma borda livre.

$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	$M_r = \frac{P}{m_r}$	$M_x = \frac{P}{m_x}$	$M_y = \frac{P}{m_y}$	$X_r = \frac{P}{n_r}$	$X_x = \frac{P}{n_x}$	$X_y = \frac{P}{n_y}$
-----------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------

Carregam.	λ	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25
1	m_r	35,8	23,4	31,0	28,6	26,4	24,3	22,4	20,9	19,9	19,8	21,3	26,8	46,4	77,0
	m_x	39,8	38,3	37,0	35,8	34,9	34,3	34,0	34,3	35,6	38,6	45,6	63,6	126	228
	m_y	163	152	141	130	119	109	99,5	91,0	83,4	80,0	83,4	108	208	417
	$-n_r$	17,8	16,6	15,3	14,1	12,8	11,6	10,4	9,3	8,2	7,4	6,8	6,8	7,6	8,6
	$-n_x$	18,7	17,8	17,0	16,2	15,6	15,0	14,5	14,3	14,2	14,7	15,8	18,1	23,0	27,2
	$-n_y$	26,4	24,6	22,8	21,1	19,3	17,6	15,8	14,2	12,6	11,1	9,8	9,0	9,0	9,6
2	m_r	7,0	7,0	7,1	7,1	7,2	7,2	7,3	7,3	7,4	7,9	9,2	13,0	21,2	33,5
	m_x	143	112	85	63	47,5	35,5	28,2	24,0	22,1	23,3	27,1	34,3	54	84
	$-m_y$	22	22	22	22	22	22	22	21	21	19	17	15	13	12
	$-n_r$	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	2,2	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2	2,6	3,3	4,1
	$-n_x$	262	165	102	68	47,1	35,8	27,0	20,5	15,8	13,2	12,1	12,5	13,9	15,6
	$-n_y$	∞	-	-	-	250	120	59	35	20	12,4	8,6	5,9	5,3	5,2

Tabela A-24 – Reações de apoio das lajes com uma borda livre – Carregamento uniforme.

$\lambda = \frac{l_y}{l_x}$	$R_x = p l_x v_x$	$R_{x1} = p l_x v_{x1}$	$R_{x2} = p l_x v_{x2}$	$R_y = p l_y v_y$
-----------------------------	-------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------

Caso	λ	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25
A-21	V_x	0,45	0,45	0,44	0,43	0,42	0,41	0,39	0,37	0,34	0,31	0,28	0,22	0,16	0,13
	V_y	0,28	0,20	0,32	0,34	0,36	0,40	0,44	0,49	0,54	0,59	0,64	0,72	0,80	0,84
A-22	V_x	0,34	0,32	0,30	0,28	0,27	0,26	0,24	0,21	0,19	0,18	0,15	0,14	0,12	0,10
	V_y	0,30	0,34	0,38	0,40	0,42	0,42	0,44	0,48	0,50	0,52	0,54	0,56	0,62	0,68
A-23	V_{x1}	0,54	0,53	0,53	0,52	0,51	0,51	0,50	0,48	0,47	0,45	0,43	0,39	0,36	0,34
	V_{x2}	0,37	0,36	0,35	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,28	0,26	0,23	0,21	0,18	0,15
	V_y	0,15	0,18	0,20	0,21	0,23	0,24	0,26	0,29	0,35	0,36	0,40	0,46	0,51	0,56
A-24	V_x	0,43	0,42	0,42	0,41	0,41	0,40	0,40	0,39	0,38	0,37	0,35	0,32	0,29	0,27
	V_y	0,14	0,16	0,16	0,18	0,18	0,20	0,20	0,22	0,24	0,26	0,30	0,36	0,42	0,46
A-25	V_{x1}	0,50	0,50	0,49	0,48	0,46	0,46	0,41	0,38	0,34	0,32	0,28	0,23	0,18	0,14
	V_{x2}	0,28	0,27	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21	0,18	0,15	0,12	0,10	0,10
	V_y	0,22	0,23	0,24	0,26	0,29	0,32	0,35	0,38	0,42	0,45	0,51	0,57	0,63	0,66
A-26	V_x	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37	0,35	0,34	0,32	0,30	0,27	0,23	0,19	0,17
	V_y	0,16	0,16	0,20	0,22	0,24	0,26	0,30	0,32	0,36	0,40	0,46	0,54	0,62	0,66

Tabela A-25 - Valores de K_c e K_s para o aço CA-50 (para concretos do Grupo I de resistência – $f_{ck} \leq 50$ MPa, $\gamma_c = 1,4$, $\gamma_s = 1,15$).

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

Tabela A-26						
ÁREA DE ARMADURA POR METRO DE LARGURA (cm ² /m)						
Espaçamento (cm)	Diâmetro Nominal (mm)					
	4,2	5	6,3	8	10	12,5
5	2,77	4,00	6,30	10,00	16,00	25,00
5,5	2,52	3,64	5,73	9,09	14,55	22,73
6	2,31	3,33	5,25	8,33	13,33	20,83
6,5	2,13	3,08	4,85	7,69	12,31	19,23
7	1,98	2,86	4,50	7,14	11,43	17,86
7,5	1,85	2,67	4,20	6,67	10,67	16,67
8	1,73	2,50	3,94	6,25	10,00	15,63
8,5	1,63	2,35	3,71	5,88	9,41	14,71
9	1,54	2,22	3,50	5,56	8,89	13,89
9,5	1,46	2,11	3,32	5,26	8,42	13,16
10	1,39	2,00	3,15	5,00	8,00	12,50
11	1,26	1,82	2,86	4,55	7,27	11,36
12	1,15	1,67	2,62	4,17	6,67	10,42
12,5	1,11	1,60	2,52	4,00	6,40	10,00
13	1,07	1,54	2,42	3,85	6,15	9,62
14	0,99	1,43	2,25	3,57	5,71	8,93
15	0,92	1,33	2,10	3,33	5,33	8,33
16	0,87	1,25	1,97	3,13	5,00	7,81
17	0,81	1,18	1,85	2,94	4,71	7,35
17,5	0,79	1,14	1,80	2,86	4,57	7,14
18	0,77	1,11	1,75	2,78	4,44	6,94
19	0,73	1,05	1,66	2,63	4,21	6,58
20	0,69	1,00	1,58	2,50	4,00	6,25
22	0,63	0,91	1,43	2,27	3,64	5,68
24	0,58	0,83	1,31	2,08	3,33	5,21
25	0,55	0,80	1,26	2,00	3,20	5,00
26	0,53	0,77	1,21	1,92	3,08	4,81
28	0,49	0,71	1,12	1,79	2,86	4,46
30	0,46	0,67	1,05	1,67	2,67	4,17
33	0,42	0,61	0,95	1,52	2,42	3,79

Elaborada por PINHEIRO (1994)
Diâmetros especificados pela NBR 7480.

Tabela A-27																
COMPRIMENTO DE ANCORAGEM ℓ_b (cm) para $A_{s,ef} = A_{s,calc}$ e aço CA-50 nervurado																
ϕ (mm)	Concreto															
	C15		C20		C25		C30		C35		C40		C45		C50	
	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
6,3	48	33	39	28	34	24	30	21	27	19	25	17	23	16	21	15
	33	23	28	19	24	17	21	15	19	13	17	12	16	11	15	10
8	61	42	50	35	43	30	38	27	34	24	31	22	29	20	27	19
	42	30	35	24	30	21	27	19	24	17	22	15	20	14	19	13
10	76	53	62	44	54	38	48	33	43	30	39	28	36	25	34	24
	53	37	44	31	38	26	33	23	30	21	28	19	25	18	24	17
12,5	95	66	78	55	67	47	60	42	54	38	49	34	45	32	42	30
	66	46	55	38	47	33	42	29	38	26	34	24	32	22	30	21
16	121	85	100	70	86	60	76	53	69	48	63	44	58	41	54	38
	85	59	70	49	60	42	53	37	48	34	44	31	41	29	38	27
20	151	106	125	87	108	75	95	67	86	60	79	55	73	51	68	47
	106	74	87	61	75	53	67	47	60	42	55	39	51	36	47	33
22,5	170	119	141	98	121	85	107	75	97	68	89	62	82	57	76	53
	119	83	98	69	85	59	75	53	68	47	62	43	57	40	53	37
25	189	132	156	109	135	94	119	83	108	75	98	69	91	64	85	59
	132	93	109	76	94	66	83	58	75	53	69	48	64	45	59	42
32	242	169	200	140	172	121	152	107	138	96	126	88	116	81	108	76
	169	119	140	98	121	84	107	75	96	67	88	62	81	57	76	53
40	303	212	250	175	215	151	191	133	172	120	157	110	145	102	136	95
	212	148	175	122	151	105	133	93	120	84	110	77	102	71	95	66

Valores de acordo com a NBR 6118/14
Nº Superior: Má Aderência ; Nº Inferior: Boa Aderência
 ℓ_b Sem e Com ganchos nas extremidades
 $A_{s,ef}$ = área de armadura efetiva ; $A_{s,calc}$ = área de armadura calculada

O comprimento de ancoragem deve ser maior do que o comprimento mínimo: $\ell_{b,min} \geq \begin{cases} 0,3 \ell_b \\ 10 \phi \\ 100mm \end{cases}$

$\gamma_c = 1,4$; $\gamma_s = 1,15$

Tabela A-28																
COMPRIMENTO DE ANCORAGEM ℓ_b (cm) para $A_{s,ef} = A_{s,calc}$ e aço CA-60 entalhado																
ϕ (mm)	Concreto															
	C15		C20		C25		C30		C35		C40		C45		C50	
	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com
3,4	50	35	41	29	35	25	31	22	28	20	26	18	24	17	22	16
	35	24	29	20	25	17	22	15	20	14	18	13	17	12	16	11
4,2	61	43	51	35	44	31	39	27	35	24	32	22	29	21	27	19
	43	30	35	25	31	21	27	19	24	17	22	16	21	14	19	13
5	73	51	60	42	52	36	46	32	41	29	38	27	35	25	33	23
	51	36	42	30	36	25	32	23	29	20	27	19	25	17	23	16
6	88	61	72	51	62	44	55	39	50	35	46	32	42	29	39	27
	61	43	51	35	44	31	39	27	35	24	32	22	29	21	27	19
7	102	71	84	59	73	51	64	45	58	41	53	37	49	34	46	32
	71	50	59	41	51	36	45	32	41	28	37	26	34	24	32	22
8	117	82	96	67	83	58	74	51	66	46	61	42	56	39	52	37
	82	57	67	47	58	41	51	36	46	33	42	30	39	27	37	26
9,5	139	97	114	80	99	69	87	61	79	55	72	50	67	47	62	43
	97	68	80	56	69	48	61	43	55	39	50	35	47	33	43	30

Valores de acordo com a NBR 6118/14
 N° Superior: Má Aderência ; N° Inferior: Boa Aderência
 ℓ_b Sem e Com ganchos nas extremidades
 $A_{s,ef}$ = área de armadura efetiva ; $A_{s,calc}$ = área de armadura calculada

O comprimento de ancoragem deve ser maior do que o comprimento mínimo: $\ell_{b,min} \geq \begin{cases} 0,3 \ell_b \\ 10 \phi \\ 100mm \end{cases}$

$\gamma_c = 1,4$; $\gamma_s = 1,15$