

LAJES NERVURADAS

1. INTRODUÇÃO

Uma laje nervurada é constituída por um conjunto de vigas que se cruzam, solidarizadas pela mesa. Esse elemento estrutural terá comportamento intermediário entre o de laje maciça e o de grelha.

Segundo a NBR 6118:2003, lajes nervuradas são "lajes moldadas no local ou com nervuras pré-moldadas, cuja zona de tração é constituída por nervuras entre as quais pode ser colocado material inerte."

As evoluções arquitetônicas, que forçaram o aumento dos vãos, e o alto custo das formas tornaram as lajes maciças desfavoráveis economicamente, na maioria dos casos. Surgem, como uma das alternativas, as lajes nervuradas (ver figura 17.1).



Figura 17.1 – Laje nervurada bidirecional (FRANCA & FUSCO, 1997)

Resultantes da eliminação do concreto abaixo da linha neutra, elas propiciam uma redução no peso próprio e um melhor aproveitamento do aço e do concreto. A resistência à tração é concentrada nas nervuras, e os materiais de enchimento têm como função única substituir o concreto, sem colaborar na resistência.

Essas reduções propiciam uma economia de materiais, de mão-de-obra e de fôrmas, aumentando assim a viabilidade do sistema construtivo. Além disso, o emprego de lajes nervuradas simplifica a execução e permite a industrialização, com redução de perdas e aumento da produtividade, racionalizando a construção.

2. FUNÇÕES ESTRUTURAIS DAS LAJES

As lajes recebem as ações verticais, perpendiculares à superfície média, e as transmitem para os apoios. Essa situação confere à laje o comportamento de placa.

Outra função das lajes é atuar como diafragmas horizontais rígidos, distribuindo as ações horizontais entre os diversos pilares da estrutura. Nessas circunstâncias, a laje sofre ações ao longo de seu plano, comportando-se como chapa.

Conclui-se, portanto, que as lajes têm dupla função estrutural: de placa e de chapa.

O comportamento de chapa é fundamental para a estabilidade global da estrutura, principalmente nos edifícios altos. É através das lajes que os pilares contraventados se apóiam nos elementos de contraventamento, garantindo a segurança da estrutura em relação às ações laterais.

Embora o arranjo de armaduras, em geral, seja determinado em função dos esforços de flexão relativos ao comportamento de placa, a simples desconsideração de outros esforços pode ser equivocada. Uma análise do efeito de chapa se faz necessária, principalmente em lajes constituídas por elementos pré-moldados. Na figura 17.2, é mostrado um exemplo de transferência de forças e de tensões em laje formada por painéis pré-moldados, comportando-se como diafragma.

3. CARACTERÍSTICAS DAS LAJES NERVURADAS

Serão considerados os tipos de lajes nervuradas, a presença de capitéis e de vigas-faixa e os materiais de enchimento.

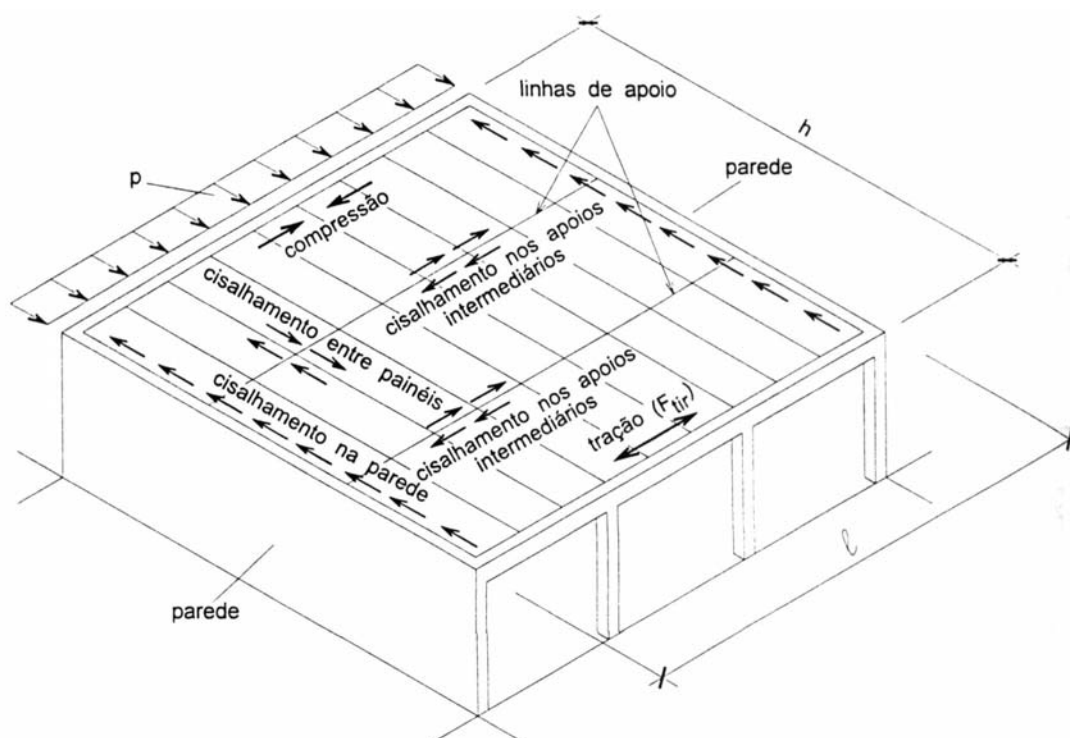


Figura 17.2 – Comportamento de laje como diafragma (EL DEBS, 2000)

3.1. Tipos de Lajes Nervuradas

As lajes nervuradas podem ser moldadas no local ou podem ser executadas com nervuras pré-moldadas.

a) Laje moldada no local

Todas as etapas de execução são realizadas "in loco". Portanto, é necessário o uso de fôrmas e de escoramentos, além do material de enchimento. Pode-se utilizar fôrmas para substituir os materiais inertes. Essas fôrmas já são encontradas em polipropileno ou em metal, com dimensões moduladas, sendo necessário utilizar desmoldantes iguais aos empregados nas lajes maciças (Figura 17.3).

b) Laje com nervuras pré-moldadas

Nessa alternativa, as nervuras são compostas de vigotas pré-moldadas, que dispensam o uso do tabuleiro da fôrma tradicional. Essas vigotas são capazes de suportar seu peso próprio e as ações de construção, necessitando apenas de

cimbramentos intermediários. Além das vigotas, essas lajes são constituídas de elementos de enchimento, que são colocados sobre os elementos pré-moldados, e também de concreto moldado no local. Há três tipos de vigotas (Figura 17.4).



Figura 17.3 – Laje nervurada moldada no local

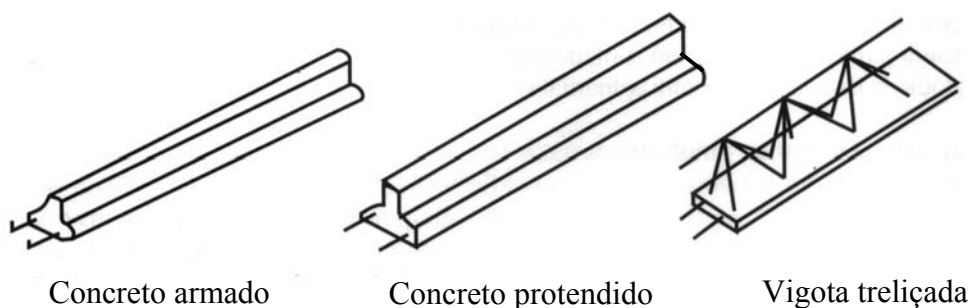


Figura 17.4 – Vigotas pré-moldadas (FRANCA & FUSCO,1997)

3.2. Lajes Nervuradas com Capitéis e com Vigas-faixa

Em regiões de apoio, tem-se uma concentração de tensões transversais, podendo ocorrer ruína por punção ou por cisalhamento. Por serem mais frágeis, esses tipos de ruína devem ser evitados, garantindo-se que a ruína, caso ocorra, seja por flexão. Além disso, de acordo com o esquema estático adotado, pode ser que apareçam esforços solicitantes elevados, que necessitem de uma estrutura mais robusta.

Nesses casos, entre as alternativas possíveis, pode-se adotar (Figura 17.5):

- região maciça em volta do pilar, formando um capitel;
- faixas maciças em uma ou em duas direções, constituindo vigas-faixa.



Figura 17.5 – Capitel e viga-faixa

3.3 Materiais de enchimento

Como foi visto, a principal característica das lajes nervuradas é a diminuição da quantidade de concreto, na região tracionada, podendo-se usar um material de enchimento. Além de reduzir o consumo de concreto, há um alívio do peso próprio. Portanto, o material de enchimento deve ser o mais leve possível, mas com resistência suficiente para suportar as operações de execução. Deve-se ressaltar que a resistência do material de enchimento não é considerada no cálculo da laje.

Podem ser utilizados vários tipos de materiais de enchimento, entre os quais: blocos cerâmicos, blocos vazados de concreto e blocos de EPS (poliestireno expandido), também conhecido como isopor. Esses blocos podem ser substituídos por vazios, obtidos com fôrmas constituídas por caixotes reaproveitáveis.

a) Blocos cerâmicos ou de concreto

Em geral, esses blocos são usados nas lajes com vigotas pré-moldadas (Figura 17.6), devido à facilidade de execução. Eles são melhores isolantes térmicos do que o concreto maciço. Uma de suas restrições é o peso específico elevado, para um simples material de enchimento.

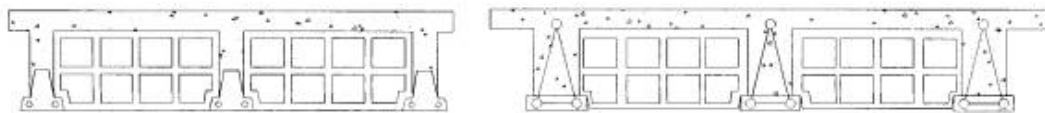


Figura 17.6 – Lajes com vigotas pré-moldadas (PEREIRA, 2001)

b) Blocos de EPS

Os blocos de EPS vêm ganhando espaço na execução de lajes nervuradas, sendo utilizados principalmente junto com as vigotas treliçadas pré-moldadas (Figura 17.7). As principais características desses blocos são:

- Permite execução de teto plano;
- Facilidade de corte com fio quente ou com serra;
- Resiste bem às operações de montagem das armaduras e de concretagem, com vedação eficiente;
- Coeficiente de absorção muito baixo, o que favorece a cura do concreto moldado no local;
- Baixo módulo de elasticidade, permitindo uma adequada distribuição das cargas;
- Isolante termo-acústico.

c) Caixotes reaproveitáveis

A maioria dessas formas é de polipropileno ou de metal. Sua principal vantagem são os vazios que resultam, diminuindo o peso próprio da laje (ver figura 17.5).

Após a execução, para retirar os caixotes, pode-se injetar ar comprimido. O número de reutilizações dessas formas pode ultrapassar cem vezes.

As fôrmas reaproveitáveis dispensam o uso do tabuleiro tradicional, que pode ser substituído por pranchas colocadas apenas na região das nervuras. As vigotas pré-moldadas substituem com vantagens essas pranchas, simplificando a execução.



Figura 17.7 – Blocos de EPS com vigotas treliçadas (FRANCA & FUSCO, 1997)

4. CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

A prática usual consiste em adotar painéis com vãos maiores que os das lajes maciças, apoiados em vigas mais rígidas que as nervuras.

Apresentam-se a seguir as dimensões limites, segundo a NBR 6118: 2003, item 13.2.4.2. A vinculação será definida com base na resistência do concreto à compressão.

4.1 Dimensões mínimas

As prescrições quanto às dimensões mínimas da mesa e das nervuras são indicadas na Figura 17.8.

a) Espessura da mesa

Quando não houver tubulações horizontais embutidas, a espessura da mesa deve ser maior ou igual a $1/15$ da distância entre nervuras e não menor que 3 cm;

A espessura da mesa deve ser maior ou igual a 4cm, quando existirem tubulações embutidas de diâmetro máximo 12,5mm.

b) Largura das nervuras

A largura das nervuras não deve ser inferior a 5cm;

Se houver armaduras de compressão, a largura das nervuras não deve ser inferior a 8cm.

4.2 Critérios de projeto

Os critérios de projeto dependem do espaçamento e entre os eixos das nervuras.

Para $e \leq 65$ 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;

Para e entre 65 e 110cm, exige-se a verificação da flexão da mesa e as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas; permite-se essa verificação como laje se o espaçamento entre eixos de nervuras for até 90cm e a largura média das nervuras for maior que 12cm;

Para lajes nervuradas com espaçamento entre eixos maior que 110cm, a mesa deve ser projetada como laje maciça, apoiada na grelha de vigas, respeitando-se os seus limites mínimos de espessura.

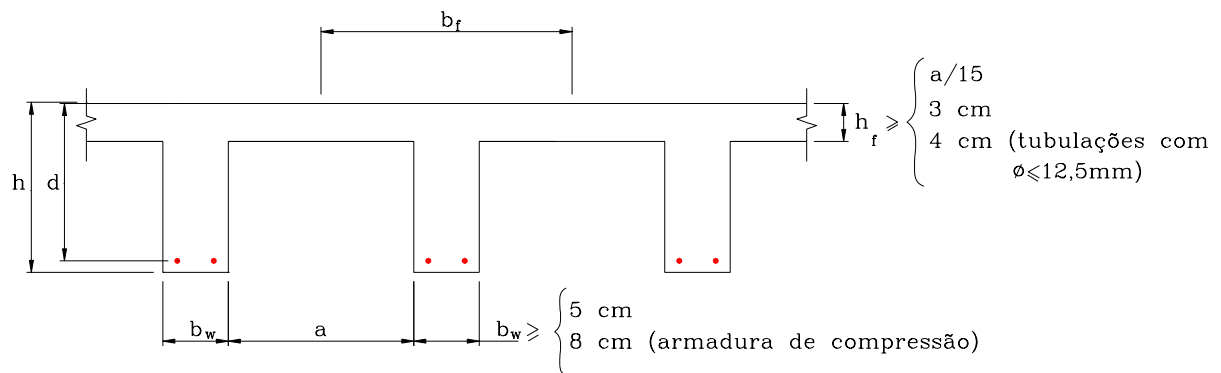


Figura 17.8 – Seção típica e dimensões mínimas

4.3 Vinculação

Para as lajes nervuradas, procura-se evitar engastes e balanços, visto que, nesses casos, têm-se esforços de compressão na face inferior, região em que a área de concreto é reduzida. Nos casos em que o engastamento for necessário, duas providências são possíveis:

- limitar o momento fletor ao valor correspondente à resistência da nervura à compressão;
- utilizar mesa na parte inferior (Figura 17.9), situação conhecida como laje dupla, ou região maciça de dimensão adequada.

5. AÇÕES E ESFORÇOS SOLICITANTES

As ações devem ser calculadas de acordo com a NBR 6120:1980 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações.

A laje nervurada pode ser tratada como placa em regime elástico. Assim, o cálculo dos esforços solicitantes em nada difere daquele realizado para lajes maciças.

Para cálculo dos momentos fletores e das reações de apoio, podem ser utilizadas as tabelas de PINHEIRO (1993). Para obter os esforços nas nervuras, conhecidos os esforços por unidade de largura, basta multiplicar esse valor pela distância entre eixos das nervuras.

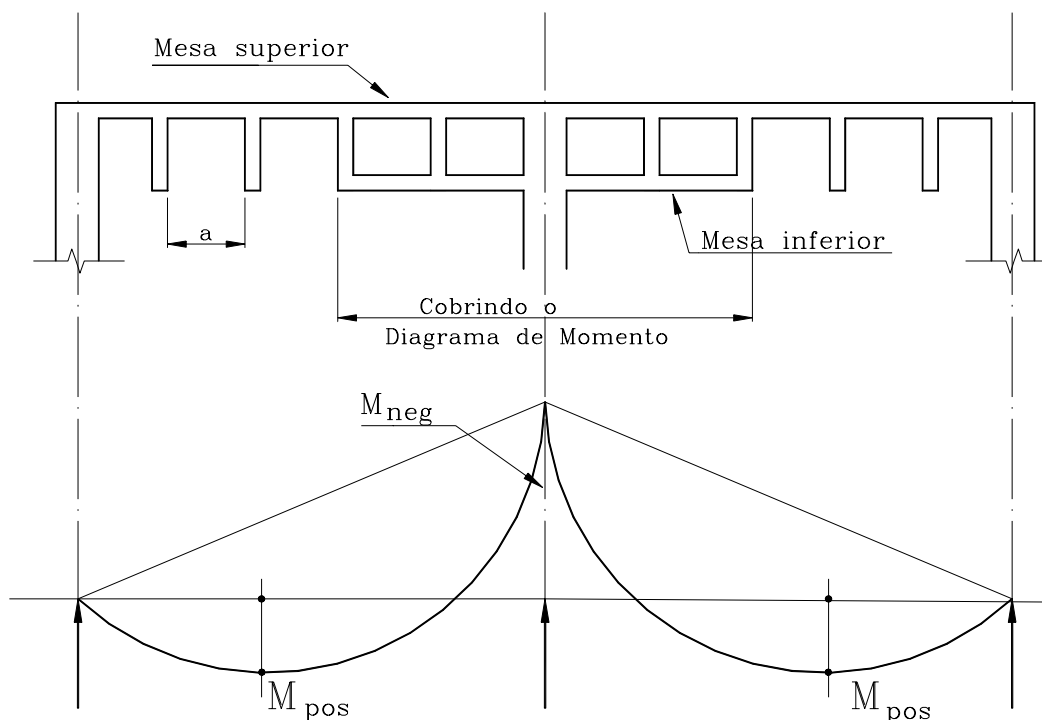


Figura 17.9 – Diagrama de momentos para lajes nervuradas contínuas (engastadas)

Vale lembrar que, em lajes nervuradas de grandes dimensões em planta e submetidas a cargas concentradas elevadas, o cálculo deve considerar a posição dessas cargas, a localização e a rigidez das nervuras, as condições de apoio das lajes, a posição dos pilares e a deformabilidade das vigas de sustentação. Para isso podem ser utilizados programas computacionais adequados.

6. VERIFICAÇÕES

Podem ser necessárias as seguintes verificações: flexão nas nervuras, cisalhamento nas nervuras, flexão na mesa, cisalhamento na mesa e flecha da laje.

6.1. Flexão nas nervuras

Obtidos os momentos fletores por nervura, o cálculo da armadura necessária deve ter em vista:

- No caso de mesa comprimida, que é o usual, a seção a ser considerada é uma seção T. Em geral a linha neutra encontra-se na mesa, e a seção comporta-se como retangular com seção resistente $b_f \cdot h$;
- No caso de mesa tracionada, quando não se tem laje dupla, a seção resistente é retangular $b_w \cdot h$ (ver nomenclatura na figura 17.8).

Vale lembrar que outros aspectos devem ser considerados: ancoragens nos apoios, deslocamentos dos diagramas, armaduras mínimas, fissuração etc.

No item 17.3.5.2.1 da NBR 6118:2003, as taxas mínimas de armadura variam em função da forma da seção e do f_{ck} do concreto (Tabela 17.1).

Nas seções tipo T, a área da seção a ser considerada deve ser caracterizada pela alma acrescida da mesa colaborante.

Tabela 17.1 – Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas (Tabela 17.3 da NBR 6118:2003)

Forma da seção	Valores de $\rho_{\min}^* \% (A_{s,\min}/A_c)$							
	ω	f_{ck}						
		20	25	30	35	40	45	50
Retangular	0,035	0,150	0,150	0,173	0,201	0,230	0,259	0,288
T (mesa comprimida)	0,024	0,150	0,150	0,150	0,150	0,158	0,177	0,197
T (mesa tracionada)	0,031	0,150	0,150	0,153	0,178	0,204	0,229	0,255
Circular	0,070	0,230	0,288	0,345	0,403	0,518	0,518	0,575

* Os valores de ρ_{\min} estabelecidos nesta tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $\gamma_C = 1,4$ e $\gamma_S = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, ρ_{\min} deve ser recalculado com base no valor de ω_{\min} dado.

6.2. Cisalhamento nas nervuras

De acordo com a NBR 6118:2003, itens 13.2.4.2 e 17.4.1.1.2-b, a verificação do cisalhamento nas nervuras depende da distância entre elas:

a) Distância entre eixos das nervuras menor ou igual a 65cm

Para lajes com espaçamento entre eixos menor ou igual a 65cm, para a verificação do cisalhamento da região das nervuras, permite-se considerar os critérios de laje.

A verificação da necessidade de armadura transversal nas lajes é dada pelo item 19.4.1 da NBR 6118:2003. As lajes podem prescindir de armadura transversal para resistir aos esforços de tração oriundos da força cortante, quando a força cortante de cálculo obedecer à expressão:

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

A resistência de projeto ao cisalhamento, para lajes sem protensão, é dada por:

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

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

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

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

k é um 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.

f_{ctd} é a resistência de cálculo do concreto ao cisalhamento;

A_{s1} é a área da armadura de tração que se estende até não menos que d + ℓ_{b,nec} além da seção considerada, com ℓ_{b,nec} definido em 9.4.2.5 e figura 19.1 (NBR 6118:2003);

b_w é a largura mínima da seção ao longo da altura útil d.

De acordo com o item 8.2.5 da NBR 6118:2003:

$$f_{ck,inf} = 0,7 f_{ct,m} = 0,7 \cdot 0,3 f_{ck}^{2/3} = 0,21 f_{ck}^{2/3} \text{ (em MPa)}$$

Resulta:

$$\tau_{Rd} = 0,0525 f_{ck}^{2/3} \text{ (em MPa)}$$

Em caso de necessidade de armadura transversal, ou seja, quando não se verifica a condição estabelecida no início deste item, aplicam-se os critérios estabelecidos nos itens 17.4.2 e 19.4.2 NBR 6118: 2003.

b) Distância entre eixos das nervuras de 65cm até 90cm

A verificação de cisalhamento pode ser como lajes, da maneira indicada no item anterior, se a largura média das nervuras for maior que 12cm (NBR 6118:2003, item 13.2.4.2-b).

c) Distância entre eixos das nervuras entre 65cm e 110cm

Para lajes com espaçamento entre eixos das nervuras entre 65cm e 110cm, as nervuras devem ser verificadas ao cisalhamento como vigas. Deve ser colocada armadura perpendicular à nervura, na mesa, por toda a sua largura útil, com área mínima de $1,5\text{cm}^2/\text{m}$.

Como foi visto no item anterior, ainda se permite a consideração de laje se o espaçamento entre eixos de nervuras for até 90cm e a espessura média das nervuras for maior que 12cm.

6.3 Flexão na mesa

Para lajes com espaçamento entre eixos de nervuras entre 65 e 110cm, exige-se a verificação da flexão da mesa (NBR 6118:2003, item 13.2.4.2-b). Essa verificação também deve ser feita se existirem cargas concentradas entre nervuras.

A mesa pode ser considerada como um painel de lajes maciças contínuas apoiadas nas nervuras. Essa continuidade implica em momentos negativos nesses apoios, devendo, portanto, ser disposta armadura para resistir a essa solicitação, além da armadura positiva.

Outra possibilidade é considerar a mesa apoiada nas nervuras. Dessa forma, podem ocorrer fissuras na ligação das mesas, sobre as nervuras.

6.4. Cisalhamento na mesa

O cisalhamento nos painéis é verificado utilizando-se os critérios de lajes maciças, da mesma forma indicada no item 6.2-a deste texto.

Em geral, o cisalhamento somente terá importância na presença de cargas concentradas de valor significativo. Recomenda-se, sempre que possível, que ações concentradas atuem diretamente nas nervuras, de forma a evitar a necessidade de armadura de cisalhamento na mesa.

6.5. Flecha

Na verificação da flecha em lajes, segundo a NBR 6118:2003, item 19.3.1, devem ser usados os critérios estabelecidos no item 17.3.2 dessa Norma, considerando-se a possibilidade de fissuração (estádio II).

O referido item 17.3.2 estabelece limites para flechas segundo a Tabela 13.2 da Norma citada, levando-se em consideração combinações de ações conforme o item 11.8.3.1 dessa Norma.

O cálculo da flecha é feito utilizando-se processos analíticos estabelecidos pela própria Norma (item 17.3.2), que divide o cálculo em duas parcelas: flecha imediata e flecha diferida.

A determinação do valor de tais parcelas é apresentada a seguir e abordada pela Norma, nos itens 17.3.2.1.1 e 17.3.2.1.2, respectivamente.

De acordo com o item 11.8.3.1 da NBR 6118:2003, as combinações de serviço classificadas como quase permanentes são aquelas que 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. A tabela 11.4 do item 11.8.3.2 da Norma traz a seguinte expressão para combinações quase permanentes:

$$F_{d,ser} = \sum F_{gi,k} + \sum \Psi_{2j} F_{qj,k}$$

onde:

$F_{d,ser}$ é o valor de cálculo das ações para combinações de serviço;

$F_{gi,k}$ são as ações devidas às cargas permanentes;

$F_{qj,k}$ são as ações devidas às cargas variáveis;

Ψ_{2j} é o coeficiente dado na tabela 11.2 do item 11.7.1, cujos valores podem ser adotados de acordo com os valores da Tabela 17.2 deste texto.

Tabela 17.2 – Valores do coeficiente Ψ_2

Tipos de ações	Ψ_2
Cargas acidentais em edifícios residenciais	0,3
Cargas acidentais em edifícios comerciais	0,4
Cargas acidentais em bibliotecas, arquivos, oficinas e garagens	0,6
Pressão dinâmica do vento	0
Variações uniformes de temperatura	0,3

a) Flecha imediata

A parcela referente à flecha imediata, como o próprio nome já diz, refere-se ao deslocamento imediatamente após a aplicação dos carregamentos, que pode ser calculado com a utilização de tabelas, tais como as apresentadas em PINHEIRO (1993), em função da vinculação das lajes.

Vale salientar que a Norma estabelece uma expressão para o cálculo da rigidez equivalente, considerando-se a possibilidade da laje estar fissurada. Essa rigidez equivalente é dada por:

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

I_c : é o momento de inércia da seção bruta de concreto;

I_{II} : é o momento de inércia da seção fissurada (estádio II);

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

M_r : momento de fissuração, que deve ser reduzido à metade, no caso de barras lisas;

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

b) Flecha diferida

A parcela referente à flecha diferida, segundo a Norma, é decorrente das cargas de longa duração, em função da fluência, e é calculada de maneira aproximada pela multiplicação da flecha imediata pelo fator α_f dado por:

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

$$\rho' = \frac{A'_s}{b_w \cdot d} \quad \text{e} \quad \Delta\xi = \xi(t) - \xi(t_0)$$

A'_s é a área de armadura de compressão (em geral $A'_s=0$)

ξ é um coeficiente em função do tempo, calculado pela expressão seguinte ou obtido diretamente na Tabela 17.3, extraída da mesma Norma.

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

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

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

t₀: é a idade, em meses, relativa à data de aplicação da carga de longa duração.

Portanto, a flecha total é obtida multiplicando-se a flecha imediata por $(1 + \alpha_f)$.

Tabela 17.3 – Valores do coeficiente ξ em função do tempo

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

c) Flecha Limite

Segundo a NBR 6118:2003, os deslocamentos limites são valores práticos utilizados para verificação em serviço do estado limite de deformações. São classificados em quatro grupos: aceitabilidade sensorial, efeitos específicos, efeitos em elementos não estruturais e efeitos em elementos estruturais. Devem obedecer aos limites estabelecidos pela tabela 18, do item 13.3 dessa Norma.

d) Contraflecha

Segundo a NBR 6118:2003 os deslocamentos excessivos podem ser parcialmente compensados por contraflechas. No caso de se adotar contraflecha de valor a_o , a flecha total a ser verificada passa a ser:

$$a_{tot} - a_o \leq a_{lim}$$

A contraflecha a_o pode ser adotada como um múltiplo de 0,5cm, com valor estimado pela soma da flecha imediata com metade da flecha diferida, ou seja:

$$a_o \cong a_i + (a_f / 2)$$

BIBLIOGRAFIA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 - **Projeto e execução de obras de concreto armado**. Rio de Janeiro, 1978.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 - **Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120 - **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTION. **ACI 318: Building code requirements for reinforced concrete**. Detroit, Michigan, 2002.
- ATEX Brasil. Encarte técnico. Lagoa Santa (MG), 2002.
- BOCCHI JÚNIOR, C.F. **Lajes nervuradas de concreto armado**. São Carlos. 183p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1995.
- DROPPA JÚNIOR, A. **Análise estrutural de lajes formadas por elementos pré-moldados tipo vigota com armação treliçada**. São Carlos. 177p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.
- EL DEBS, M.K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. São Carlos. Projeto REENGE. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.
- FERREIRA, L.M. PINHEIRO, L.M. **Lajes nervuradas: notas de aula**. São Carlos, 1999.
- FRANCA, A.B.M.; FUSCO, P.B. **As lajes nervuradas na moderna construção de edifícios**. São Paulo, AFALA & ABRAPEX, 1997.
- FUSCO, P.B. **Técnicas de armar as estruturas de concreto**. São Paulo, Pini, 1994.
- PEREIRA, V. **Manual de projeto de lajes pré-moldadas treliçadas**. São Paulo. Associação dos fabricantes de lajes de São Paulo, 2000.
- PINHEIRO, L.M. **Concreto armado: tabelas e ábacos**. São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC-USP, 1993.