

## **Anexo I** (normativo) **Vibrações em pisos**

### **I.1 Generalidades**

#### **I.1.1 Escopo**

**I.1.1.1** Estruturas de pisos com pouca massa e amortecimento reduzido podem estar sujeitas a vibrações que causam desconforto durante as atividades humanas normais ou causam prejuízo ao funcionamento de equipamentos. Este Anexo trata dos princípios básicos necessários para se realizar análise dinâmica de estruturas de pisos que suportam laje de concreto, submetidos a ações induzidas por pessoas cujas respostas possam ser consideradas estados-limites de serviço. Excitações que possam conduzir a estados-limites últimos estão fora do escopo deste Anexo.

**I.1.1.2** As formulações apresentadas em I.2 referem-se a um método simplificado para avaliação da resposta de pisos com geometria regular e carregamento que possa ser considerado uniformemente distribuído à excitação provocada pelo caminhar de pessoas.

**I.1.1.3** Em pisos com geometria e carregamentos mais complexos ou sujeitos a outros tipos de excitação, como, por exemplo, excitações rítmicas oriundas de atividades aeróbicas, é necessária uma avaliação mais precisa, conforme apresentada em I.3.

**I.1.1.3** Em I.4 são apresentados critérios de aceitabilidade da resposta da estrutura em relação ao conforto dos usuários, em função da ocupação do piso.

#### **I.1.2 Considerações**

**I.1.2.1** Para esse estado-limite de serviço, devem-se utilizar as combinações frequentes de serviço, dadas em 4.8.7.3.3. Porém, no caso específico de análise de vibrações decorrentes do caminhar de pessoas, devem-se tomar os fatores de redução  $\psi_1$  e  $\psi_2$  iguais a 0,1. Em alguns casos, entretanto, esses valores devem ser tomados iguais a zero, como no caso de garagens, escadas, passarelas e áreas de circulação de público de centros comerciais ("mall"), de aeroportos, rodoviárias e assemelhados.

**I.1.2.2** Para evitar que a estrutura de piso entre em ressonância com o primeiro harmônico do caminhar de pessoas, sua frequência natural não deve ser inferior a 3 Hz. Em pisos com frequências naturais inferiores a 3 Hz, a critério do responsável técnico pelo projeto, deve-se demonstrar por uma avaliação precisa (ver I.3), que a resposta da estrutura do piso, mesmo em ressonância com o primeiro harmônico do caminhar de pessoas, não ultrapasse os valores apresentados em I.4.

**I.1.2.3** Para efeito deste Anexo, os elementos da estrutura (laje, vigas e pilares) podem ser considerados contínuos nos apoios, mesmo que tenham sido calculados como simplesmente apoiados. Além disso, as vigas que apoiam laje podem ser consideradas mistas de aço e concreto, mesmo que tenham sido calculadas como não mistas, com base no valor dinâmico do módulo de elasticidade do concreto. Simplificadamente, esse valor pode ser tomado igual a 38 GPa, para concreto de densidade normal, e 22 GPa, para concreto de baixa densidade.

### **I.2 Avaliação simplificada para o caminhar de pessoas**

**I.2.1** O procedimento simplificado, válido para pisos com frequência fundamental entre 3 Hz e 9 Hz, compreende as seguintes etapas:

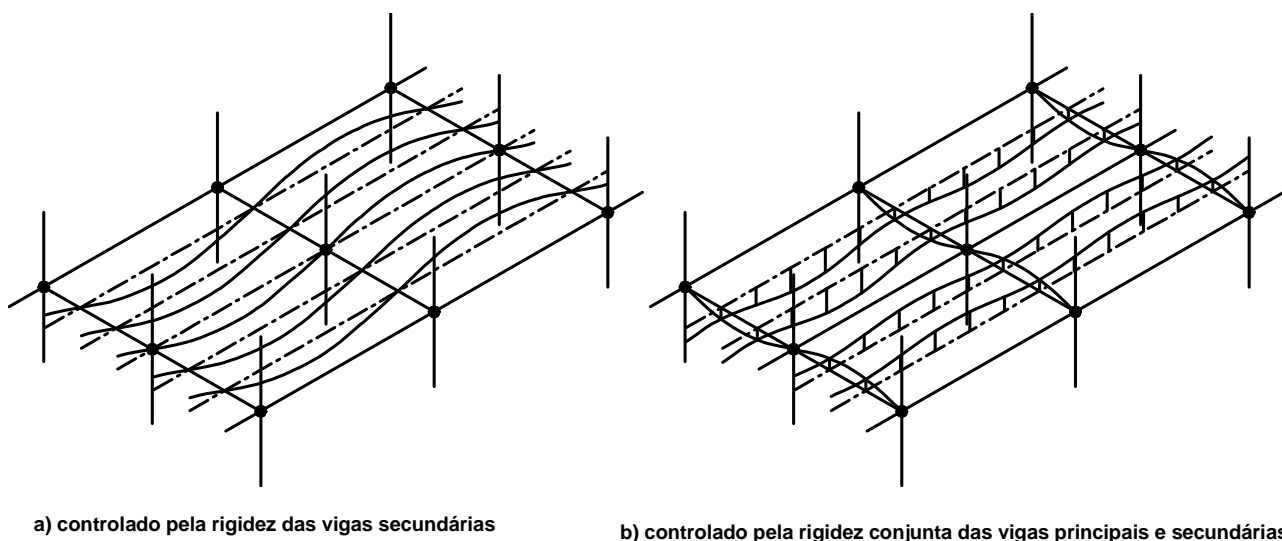
- a) avaliação da frequência fundamental, de acordo com I.2.2;
- b) avaliação da massa modal do piso, de acordo com I.2.3;

- c) obtenção da resposta, de acordo com I.2.4, com base na avaliação da razão de amortecimento crítico do piso apresentada na Tabela I.2;
- d) comparação com os critérios de aceitabilidade, conforme I.4.

**I.2.2** Em pisos com geometria regular e carregamento uniformemente distribuído, compreendendo laje sobre vigas secundárias, suportadas por vigas principais, dois modos de vibração devem ser avaliados: o modo das vigas secundárias e o modo das vigas principais, conforme ilustrados na Figura I.1. No primeiro modo, formam-se linhas nodais sobre as vigas principais, de forma que as vigas secundárias vibrem como simplesmente apoiadas. No segundo modo, as vigas principais vibram simplesmente apoiadas nos pilares e as vigas secundárias vibram como se fossem engastadas nos apoios. Para cada modo, a frequência fundamental  $f_0$  (em hertz) pode ser calculada de acordo com a expressão:

$$f_0 = \frac{18}{\sqrt{\delta}}$$

em que  $\delta$  é o deslocamento vertical total máximo do piso, em milímetros, calculado de acordo com a Tabela I.1. Nessa Tabela,  $m$  é a massa uniformemente distribuída sobre o piso, em quilograma por metro quadrado (ver I.1.2.1);  $g$  é a aceleração da gravidade;  $E$  é o módulo de elasticidade do aço;  $I_b$  é o momento de inércia da viga mista secundária, com  $b_{ef}$  igual a  $L_b/4$  ou  $b$ , o que for menor (ver L.2.2.1);  $b$  é a distância entre vigas secundárias;  $I_p$  é o momento de inércia da viga mista principal, com  $b_{ef}$  igual a  $L_p/4$  ou  $L_b$ , o que for menor (ver L.2.2.1);  $I_s$  é o momento de inércia por unidade de largura da laje, dividido pela razão modular  $\alpha_E = E/E_c$ , sendo  $E$  e  $E_c$  os módulos de elasticidade do aço e do concreto, respectivamente (ver também I.1.2.3), e  $n_e$  é o número de espaçamentos das vigas secundárias em relação à viga principal. Para efeito deste Anexo, as propriedades geométricas podem ser calculadas considerando o concreto como não fissurado.



**Figura I.1 – Modos de vibração do piso**

**I.2.3** A massa modal do piso pode ser avaliada a partir de uma área efetiva de participação do piso, de acordo com as seguintes expressões:

- para o modo A, controlado pela rigidez das vigas secundárias:

$$M_A = M_b = 0,5mL_bB_b$$

em que  $B_b$  é a largura colaborante do piso relativa à viga secundária, dada por:

$$B_b = k_b L_b \left( \frac{I_s b}{I_b} \right)^{0,25} \leq \frac{2}{3} n_p L_p$$

sendo  $k_b$  igual a 1,0, para vigas de borda de laje não conectadas à fachada, e 2,0, nos demais casos.

- para o modo B, controlado pela rigidez conjunta das vigas secundárias e principais:

$$M_B = \frac{\delta_b}{\delta_b + \delta_p} M_b + \frac{\delta_p}{\delta_b + \delta_p} M_p$$

em que:

$$\delta_b = \frac{m g b L_b^4}{384 E I_b}$$

$$\delta_p = \begin{cases} \kappa \frac{m g b L_b L_p^3}{48 E I_p}, & \text{para } n_e = 2 \\ \kappa \frac{23 m g b L_b L_p^3}{648 E I_p}, & \text{para } n_e = 3 \\ \kappa \frac{5 m g L_b L_p^4}{384 E I_p}, & \text{para } n_e \geq 4 \end{cases}$$

$$\kappa = \frac{L_p}{B_b}, \quad 0,5 \leq \kappa \leq 1,0$$

$$M_p = 0,5 m L_p B_p$$

sendo que  $B_p$  é a largura colaborante do piso relativa à viga principal, dada por:

- para região interna do piso, isto é, se a viga principal for interna:

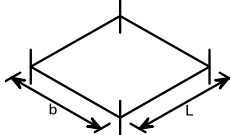
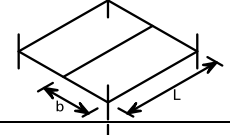
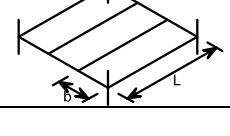
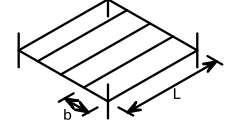
$$B_p = 1,8 L_p \left( \frac{I_b L_b}{I_p b} \right)^{0,25} \leq \frac{2}{3} n_b L_b$$

- para região externa do piso, isto é, se a viga principal for de borda:

$$B_p = \frac{2}{3} L_b$$

Nas expressões acima,  $n_p$  e  $n_b$  são a quantidade de vãos das vigas principais e secundárias, respectivamente (ver Figura I.2).

Tabela I.1 – Cálculo dos deslocamentos do piso

Arranjo das lajes de piso	$n_e$	Modo A	Modo B
	1	$\delta = \frac{mgb}{384E} \left( \frac{5L_b^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$	----
	2	$\delta = \frac{mgb}{384E} \left( \frac{5L_b^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$	$\delta = \frac{mgb}{384E} \left( \frac{8n_e^3 b^3 L_b}{I_p} + \frac{L_b^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$
	3	$\delta = \frac{mgb}{384E} \left( \frac{5L_b^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$	$\delta = \frac{mgb}{384E} \left( \frac{368n_e^3 b^3 L_b}{27I_p} + \frac{L_b^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$
	4 ou mais	$\delta = \frac{mgb}{384E} \left( \frac{5L_b^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$	$\delta = \frac{mgb}{384E} \left( \frac{5n_e^4 b^3 L_b}{I_p} + \frac{L_b^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$

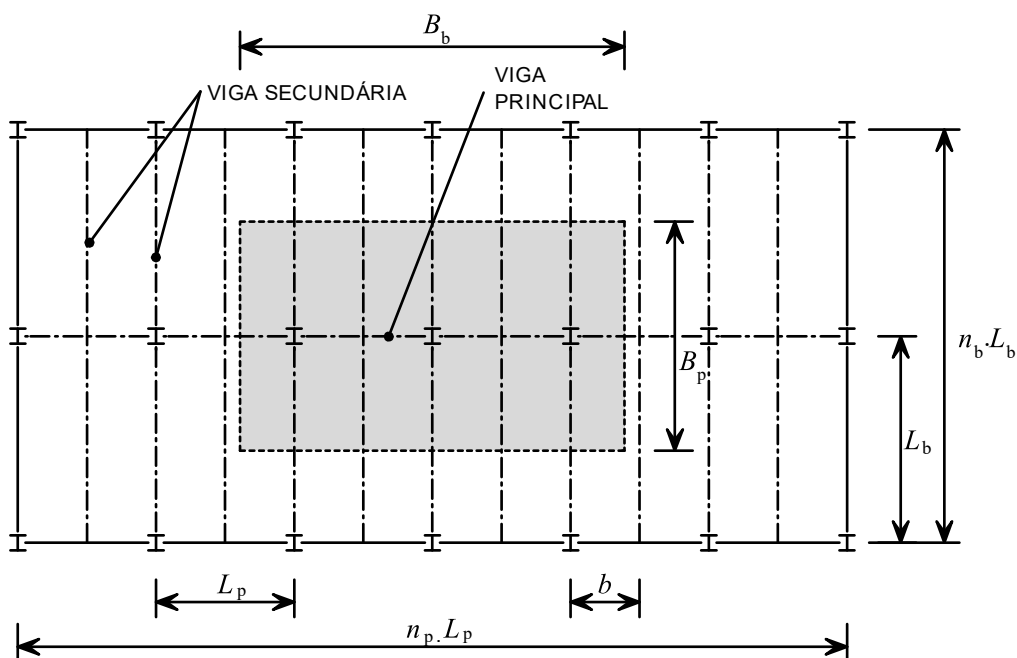


Figura I.2 – Definição das variáveis para o cálculo da massa modal

**1.2.4** A resposta da estrutura pode ser avaliada com base na aceleração de pico  $a_p$  ou no valor eficaz da aceleração ponderada, isto é, a raiz da média quadrática da aceleração ponderada,  $a_{w,rms}$ , a critério do responsável técnico pelo projeto.

A aceleração de pico pode ser calculada por:

$$a_p = 0,55 \frac{P_0 e^{-0,35 f_0}}{2M\beta}$$

O valor eficaz da aceleração ponderada pode ser obtido pela expressão:

$$a_{w,rms} = \frac{\zeta P_0}{2\sqrt{2}M\beta} W$$

Nas expressões acima,  $P_0$  é o peso de uma pessoa, tomado igual a 750 newtons,  $f_0$  é a frequência fundamental do piso, em hertz,  $M$  é a massa modal do piso, em quilogramas,  $\beta$  é a razão de amortecimento crítico do piso, obtido pela soma dos componentes apropriados apresentados na Tabela I.2,  $\zeta$  é o coeficiente dinâmico que deve ser tomado igual a 0,15 para frequência fundamental igual ou inferior a 5,0 Hz e igual a 0,10 nos demais casos;  $W$  é o fator de ponderação da aceleração (adimensional), em função da frequência fundamental, que deve ser tomado igual a 1,0, para frequência igual ou superior a 4 Hz e igual ou inferior a 8 Hz; para frequência inferior a 4 Hz,  $W$  deve ser tomado igual a  $0,5\sqrt{f_0}$  e, para frequência superior a 8 Hz, igual a  $8/f_0$ .

**Tabela I.2 – Componentes da razão de amortecimento crítico**

Componente	Razão de amortecimento crítico
sistema estrutural	0,010
forros e instalações suspensos no piso	0,010
escritórios convencionais e escolas	0,010
escritórios corporativos <sup>a</sup>	0,005
área de circulação de público de centros comerciais ("mall"), de aeroportos, rodoviárias e assemelhados	0,000
centros comerciais e lojas em geral	0,010
Garagens, passarelas <sup>d</sup> e escadas	0,005
residências, hotéis e hospitais <sup>b</sup>	0,010
paredes divisórias de altura total	0,020 a 0,050 <sup>c</sup>
<sup>a</sup> andar corrido, espaços abertos (poucas divisórias de baixa altura) e uso reduzido de mobiliário. <sup>b</sup> salas de atendimento e de internação. <sup>c</sup> depende da quantidade e localização; quanto maior a quantidade e mais próximas ao centro do piso, maior o amortecimento. <sup>d</sup> Ver P.5.	

**I.2.5** A aceitação da estrutura é avaliada em função do tipo de resposta obtida. Se a resposta for em termo da aceleração de pico, seu valor deve ser diretamente comparado com os limites de aceleração de pico apresentados em I.4, isto é, a aceleração calculada deve ser igual ou inferior aos limites conforme a ocupação do piso, apresentados na Tabela I.3. Se a resposta for em termo do valor eficaz, deve-se obter inicialmente o fator de resposta,  $R$ , que deverá ser igual ou inferior aos limites apresentados na Tabela I.3 em função da ocupação do piso. O fator de resposta é calculado pela expressão seguinte:

$$R = \frac{a_{w,rms}}{0,005}$$

### **I.3 Avaliação precisa**

Para efeito deste Anexo, uma avaliação considerada precisa para o problema da vibração em pisos deve ser realizada por meio de análises dinâmicas da estrutura, levando-se em conta pelo menos:

- a) as características e a natureza das excitações dinâmicas, por exemplo, as decorrentes do caminhar das pessoas e de atividades rítmicas;
- b) as condições de contorno do piso;
- c) as frequências naturais da estrutura do piso;
- d) as razões de amortecimento modal crítico;
- e) as massas modais efetivas do piso;
- f) as respostas do piso às excitações dinâmicas;
- g) os critérios de aceitabilidade para conforto humano em função do uso e ocupação das áreas do piso, por exemplo, os apresentados em I.4, e para o funcionamento de equipamentos.

Procedimentos com base no método dos elementos finitos para uma avaliação considerada precisa do problema, inclusive de pisos submetidos a excitações rítmicas, podem ser encontrados em P.5.

### **I.4 Critérios de aceitabilidade**

A estrutura do piso é considerada adequada ao estado-limite de conforto dos usuários relativamente ao caminhar de pessoas, se a resposta da estrutura, medida em termos da aceleração de pico ou do valor eficaz da aceleração, for igual ou inferior aos limites apresentados na Tabela I.3, em função da ocupação do piso.



Tabela I.3 – Critérios de aceitabilidade

Ocupação	Aceleração de pico limite (m/s <sup>2</sup> )	Fator de resposta limite
escritórios	0,050	8
escolas <sup>a</sup>	0,050	8
área de circulação de público de centros comerciais ("mall"), de aeroportos, rodoviárias e assemelhados	0,150	24
centros comerciais e lojas em geral	0,050	8
garagens, passarelas e escadas internas	0,15	24
passarelas e escadas externas	0,200	32
residências e hotéis	0,050	8
hospitais - salas de atendimento, internação e apartamentos	0,025 a 0,050 <sup>b</sup>	4 a 8 <sup>b</sup>
hospitais - salas de cirurgia e laboratórios <sup>c</sup>	0,006 a 0,012 <sup>d</sup>	1 a 2 <sup>d</sup>
<p><sup>a</sup> salas de aula e áreas comuns;</p> <p><sup>b</sup> a ser avaliada conforme a sensibilidade dos pacientes; para locais onde são internados pacientes cuja condição ou tratamento conduz a uma maior sensibilidade a movimentos, utilizar o menor valor limite;</p> <p><sup>c</sup> salas de cirurgia e laboratórios convencionais; para outras situações, como centros cirúrgicos especializados ou com equipamentos eletrônicos sensíveis e laboratórios de alta precisão, ver P.5;</p> <p><sup>d</sup> a ser avaliada conforme o tipo de cirurgia e exames; salas de cirurgia e laboratórios onde são realizados procedimentos que requerem maior precisão, utilizar o menor valor limite.</p>		

/ANEXO J