

## **3**

### **Critérios de Conforto Humano**

#### **3.1**

##### **Introdução**

Casos que envolvem vibrações em pisos induzidas por atividades humanas nas estruturas civis têm sido cada vez mais freqüente nos dias atuais. Esse fato torna indispensável ao projetista o conhecimento das ações dinâmicas responsáveis pelas vibrações das estruturas, metodologias de análises estruturais e técnicas de controle e redução de vibrações.

Várias normas, critérios de projeto e guias práticos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos, com a finalidade de servirem de base a projetistas e construtores, para que, em conjunto, consigam minimizar os efeitos nocivos das vibrações. Neste capítulo, serão apresentadas algumas das recomendações prescritas por diversas normas técnicas, no intuito de abordar a aceitabilidade da utilização de pisos referentes aos critérios de conforto humano.

#### **3.2**

##### **Critérios de projeto para minimizar efeitos de vibração**

É necessário ressaltar que, apesar de o problema de vibrações em pisos decorrentes de atividades humanas terem crescido sensivelmente nos últimos anos devido ao emprego de estruturas cada vez mais leves e esbeltas, este assunto não é um problema recente.

Critérios de projeto foram apresentados já em 1828 pelo pesquisador Tredgold [61], procurando minimizar os efeitos indesejáveis de vibrações em pisos com um acréscimo na altura das seções das vigas utilizadas para vencer grandes vãos. Inúmeros critérios de projeto têm sido, desde então, desenvolvidos no mundo inteiro, procurando estabelecer limites de vibração toleráveis ao conforto humano.

Reiher e Meister [62] em 1946, desenvolveram uma escala que permite descrever o nível de percepção e aceitabilidade humana de vibrações permanentes. A escala calibrada em função das freqüências e amplitudes de deslocamento foi definida através de ensaios experimentais, onde um grupo de indivíduos em pé fica submetido a vibrações permanentes, com uma variação de

freqüência de 1,0Hz a 100Hz com amplitudes variando de 0,01mm a 10mm. Dando continuidade a essa pesquisa, Lezen [63], após estudar o comportamento de dois pisos em laboratório e de 46 diferentes tipos de pisos de edificações projetados para diversas ocupações, como escritórios, igrejas, salas de aula e outros tipos de edificações, conclui que, modificando a escala original Reiher e Meister [62], ela poderia ser utilizada para sistemas de pisos com amortecimento menores que 5%. A escala modificada é apresentada na Figura 3.1.

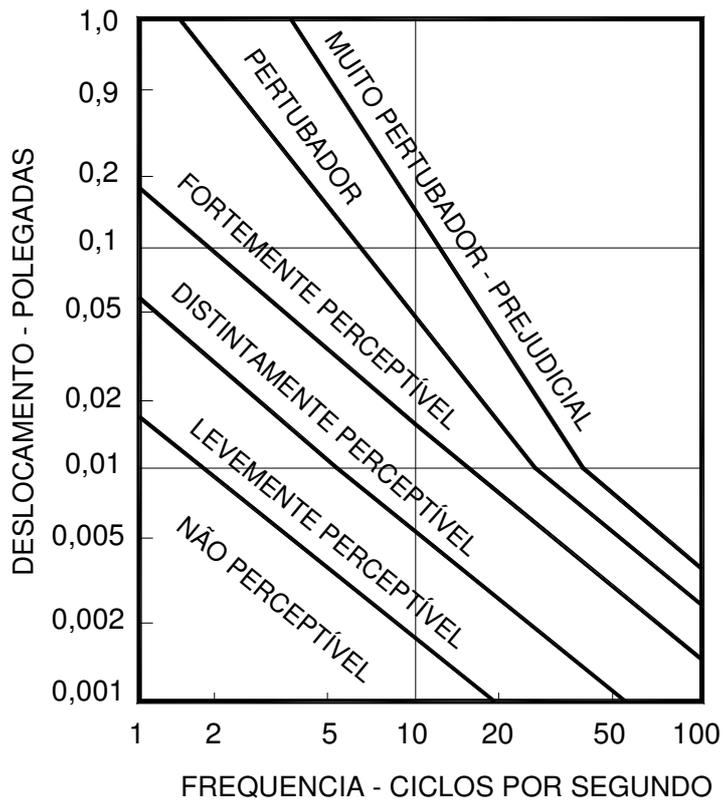


Figura 3.1 – Escala modificada de Reiher – Meister [62], [63]

Em 1985, Allen, Rainer e Pernica [64], ao longo de seus trabalhos de pesquisa, propuseram valores mínimos recomendados para a freqüência natural das estruturas, avaliadas segundo o tipo de ocupação e segundo as características da estrutura. Esses valores são baseados nos valores dos carregamentos dinâmicos gerados por atividades rítmicas como dança e exercícios aeróbicos, e nos valores limites de aceleração requeridos por essas atividades.

Na Tabela 3.1, são apresentados os valores das freqüências naturais onde pode-se notar que os valores mínimos requeridos são maiores do que 6,0Hz.

Tabela 3.1 – Frequência natural mínima requerida por Allen, Rainer e Pernica [64]

Frequência natural mínima de acordo com o tipo de ocupação (Hz)		
Características dos pisos	Piso de danças * Piso de ginástica #	Estádios e arenas #
Construções em concreto	7,0	5,0
Construções mistas	9,0	6,0
Construções em madeira	12,0	8,0

\* Pico de aceleração limite 0,02g - # Pico de aceleração limite 0,05g

Procedimentos para a determinação da espessura mínima de lajes planas retangulares submetidas a cargas harmônicas decorrentes de ações dinâmicas devidas à utilização humana são apresentados por Pasquetti, Kripka e Meira JR. [65]. Esses autores prescrevem ábacos para aplicação de lajes de edifícios residenciais, com o objetivo de auxiliar os projetistas na concepção estrutural de projetos envolvendo ações dinâmicas decorrentes de caminhadas rápidas, e até mesmo atividades rítmicas.

Através de investigações experimentais, em 2002, Batista e Varela [66] constatam que os problemas envolvendo excitações dinâmicas produzidas por atividades humanas são mais agudos e freqüentes em painéis contínuos que apresentam multimodos de vibração tais como os painéis contínuos de lajes mistas, lajes em grelha, lajes nervuradas e lajes pré-moldadas em concreto armado. Batista e Varela [66] verificam ainda que o acréscimo de 60% da espessura em concreto da laje original não resulta em uma solução eficiente, assim como no caso de painéis divisores leves. A solução ideal é a instalação de atenuadores dinâmicos sincronizados ADS's. Esses atenuadores são dispositivos capazes de produzir reduções da amplitude máxima de resposta numa dada frequência natural de vibração. Tal medida corretiva é adotada após estudos preliminares de viabilidade (técnica e econômica) e praticidade, em comparação com outras técnicas convencionais que envolvem, usualmente, alterações estruturais estáticas de enrijecimento ou escoramento. A Figura 3.2 é ilustrada com a redução nas amplitudes de vibração com e sem os ADS's. Esses problemas são abordados à luz de resultados experimentais e computacionais obtidos através de simulações realizadas com modelo de edificação real.

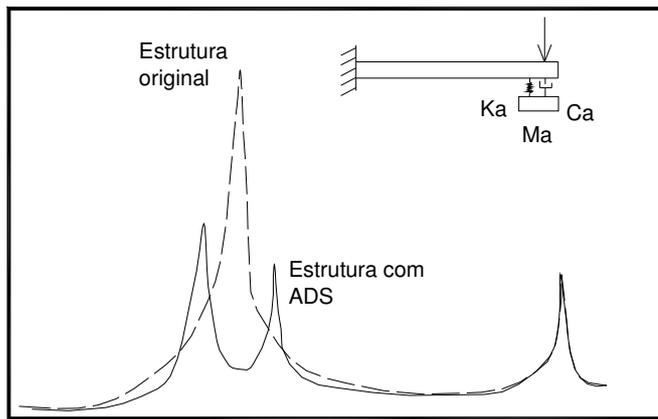


Figura 3.2 – Redução de vibração com a utilização de atenuadores dinâmicos [66]

Outra situação onde a avaliação do comportamento dos sistemas estruturais de pisos deve ser criteriosamente investigada é quando ocorre uma mudança de utilização da estrutura. Uma estrutura originalmente dimensionada apenas para ser submetida a cargas estáticas passa por questões de adaptação ao uso, a ser solicitada por cargas dinâmicas.

Uma investigação deste assunto é apresentada por Paula e Queiroz [67], na qual uma estrutura de comportamento misto (constituída por vigas em aço e laje em concreto), dimensionada para receber apenas cargas estáticas, passou a ser submetida a carregamentos provenientes de atividades rítmicas. O problema foi analisado utilizando-se um programa computacional para análise estrutural baseado no método dos elementos finitos. O carregamento dinâmico representativo da atividade rítmica foi simulado através de carregamentos harmônicos, onde se considera a frequência básica de excitação e alguns dos seus múltiplos. Os resultados obtidos para as frequências naturais da estrutura, utilizando-se o modelo de elementos finitos, são comparados com os obtidos em ensaios realizados na própria estrutura; uma proposição de reforços para adequar a estrutura à sua nova finalidade foi também apresentada, com base na avaliação dos níveis finais de acelerações e esforços.

### 3.3 Procedimentos adotados para minimizar efeitos de vibração em pisos

No intuito de se obter um controle da resposta dinâmica e a estabilização de sistemas estruturais submetidos a cargas dinâmicas perturbadoras de vibrações, faz-se necessário conhecer todos os parâmetros envolvidos no projeto, desde as características e magnitudes das cargas dinâmicas que irão

atuar até as características e propriedades físicas dos materiais utilizados na estrutura.

Várias medidas têm sido empregadas correntemente para facilitar a dissipação desta energia, reduzindo, assim as amplitudes de vibração e, conseqüentemente, a performance com respeito à segurança, estabilidade, funcionalidade e durabilidade das estruturas. Entretanto, uma delas será a mais apropriada e menos custosa para remediar tal magnitude. Nesta seção, serão apresentadas algumas medidas de controle.

### **3.3.1 Isolamento da vibração**

Se as fontes da vibração fossem oriundas apenas de equipamentos mecânicos, esse problema poderia ser resolvido através de um simples isolamento do equipamento do resto da estrutura. Entretanto, quando se tem pessoas executando atividades sobre pisos, que propagam vibrações, o problema não é tão simples, pois as próprias pessoas são as fontes de excitação, ao mesmo tempo receptoras e atenuadoras deste carregamento.

### **3.3.2 Relocação**

A relocação é ainda uma das medidas mais utilizadas para se resolver o problema de vibrações em pisos. Sua rapidez, facilidade de execução, baixo custo e a não necessidade de um conhecimento aprofundado do assunto torna essa medida bastante eficaz.

Os ambientes mais propícios à propagação de vibração quando são realizadas atividades como: exercícios aeróbicos, danças, etc. serão, se possível, localizados no ponto mais distante do local que deva ser menos perturbado.

Essa relocação no ponto mais afastado também pode ser tomada como uma medida de isolamento da vibração em alguns casos. Mas tal solução ainda possui um fator confrontante, pois está limitada ao espaço disponível e também ao limite tolerável pela vizinhança em suas adjacências.

### **3.3.3 Enrijecimento**

Geralmente, o aumento da rigidez, como tentativa de reduzir os efeitos de vibrações em pisos, é tomada como uma medida trabalhosa e custosa, requerendo aferição de profissional habilitado. Essa medida deve ser direcionada sempre na utilização de materiais leves e rígidos para que não promova um aumento considerável da massa do sistema; fator esse que não contribuiria para o aumento da frequência natural da estrutura.

### **3.3.4 Aumento do nível de amortecimento**

Na fase inicial do projeto de concepção dos elementos que irão compor as estruturas, vários problemas envolvendo vibrações poderão ser evitados, pois, dependendo do tipo de material a ser empregado na estrutura, diferentes valores de amortecimento estrutural serão obtidos. Outra maneira eficaz de aumentar o amortecimento é a introdução de elementos que interagem com a estrutura, elementos estes que não possuem função estrutural, como divisórias, forros, mobiliário em geral, etc.

### **3.3.5 Sistema de controle ativo**

Um dos sistemas de controle ativo utilizado é o atuador de massa. Esse tipo de sistema se vale de energia externa para controlar os efeitos de vibrações indesejáveis. O atuador é um sistema que recebe um sinal de entrada decorrente das medições de acelerômetros existentes na estrutura, e que responde, após processamento em um computador, em oposição ao movimento do piso, reduzindo assim suas amplitudes de vibração. Sua instalação requer manutenção periódica. O uso de energia elétrica constante eleva o seu custo de utilização.

### **3.3.6 Dispositivos mecânicos de controle passivo**

Também chamados de absorvedores dinâmicos de vibração ou atenuadores dinâmicos sintonizados (ADS), constituem um sistema simples, composto por massas, molas e amortecedores. Através de seu movimento com frequência próxima, mas em oposição de fase com o da estrutura, gera forças de

inércia que se contrapõem às forças de inércia produzidas na estrutura pelas ações externas.

Eles são posicionados no ponto de máxima amplitude de vibração do painel de piso, contrapondo-se ao movimento do piso. Os atenuadores são considerados uma solução barata, pois não precisam de energia elétrica para atuar, visto que entram em funcionamento acionados pelo próprio movimento da estrutura, além de possuírem um baixo custo de fabricação e instalação. Eles não interferem na arquitetura do ambiente, pois podem ser facilmente ocultados no forro.

### 3.4 Procedimentos adotados pelas principais normas

#### 3.4.1 Norma Brasileira – Projeto e Execução de Obras em Concreto Armado NBR 6118/2003

Conforme a norma NBR 6118/03 [68], a análise das vibrações pode ser feita em regime linear elástico no caso das estruturas usuais. Para assegurar um comportamento satisfatório das estruturas sujeitas à vibração, deve-se afastar o máximo possível a frequência natural da estrutura ( $f$ ) da frequência crítica ( $f_{\text{critica}}$ ), que depende da destinação da respectiva edificação.

$$f > 1,2 f_{\text{critica}}$$

O comportamento das estruturas sujeita às ações dinâmicas cíclicas que originam vibrações pode ser modificado por meio de alterações de alguns fatores, como ações dinâmicas, frequência natural (pela mudança da rigidez da estrutura ou da massa em vibração) e o aumento das taxas de amortecimento estrutural. Na falta de valores determinados experimentalmente, adota-se os valores indicados na Tabela 3.2 para a  $f_{\text{critica}}$ .

Tabela 3.2 – Frequência natural mínima requerida [69]

Caso	$f_{\text{critica}}$ (Hz)
Ginásio de esportes	8,0
Sala de dança ou de concertos sem cadeiras fixas	7,0
Escritórios	3,0 a 4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,4
Passarelas de pedestres ou ciclistas	1,6 a 4,5

Entretanto, esta norma revela que, em casos especiais onde as suas prescrições não puderem ser atendidas, uma análise dinâmica mais acurada deve ser realizada, conforme estabelecida em recomendações internacionais, enquanto não existir Norma Brasileira específica para isso.

### 3.4.2

#### **Norma Brasileira – Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios: NBR 8800/2008**

Segundo a Norma NBR 8800/08 [56], o problema de vibrações em pisos pode ser avaliado segundo uma avaliação precisa ou simplificada.

No caso da avaliação precisa, deve ser considerado os seguintes aspectos como na análise dinâmica:

- As características e a natureza das excitações dinâmicas, como, por exemplo, as decorrentes do caminhar das pessoas e de atividades rítmicas;
- Os critérios de aceitação para conforto humano em função do uso e ocupação das áreas do piso;
- A frequência natural da estrutura do piso;
- A razão de amortecimento modal;
- Os pesos efetivos do piso.

Em se tratando de uma avaliação simplificada para atividades humanas normais, essa norma descreve o seguinte:

Nos pisos em que as pessoas caminham regularmente, como os de residências e escritórios, a menor frequência natural não pode ser inferior a 4 Hz. Essa condição fica satisfeita se o deslocamento vertical total do piso causado pelas ações permanentes, excluindo a parcela dependente do tempo, e pelas ações variáveis, calculado considerando-se as vigas como biapoiadas e usando-se as combinações freqüentes de serviço, não for superior a 20mm.

Nos pisos em que as pessoas saltam ou dançam de forma rítmica, como os de academia de ginástica, salões de dança, ginásios e estádios de esporte, a menor frequência natural não pode ser inferior a 6 Hz, devendo ser aumentada para 8 Hz caso a atividade seja muito repetitiva, como ginástica aeróbica. Essas condições ficam satisfeitas, respectivamente, se o deslocamento vertical total do piso causado pelas ações permanentes, excluindo a parcela dependente do tempo, e pelas ações variáveis, calculado considerando-se as vigas como biapoiadas e usando-se as combinações freqüentes de serviço, não superar 9 e 5mm.

### 3.4.3

#### **Norma Canadense – *Limit States Design of Steel Structures* (Canadian Standards Association): CAN3-S16.1-M89 appendices G**

Segundo a Norma Canadense CAN3-S16-M84 [57], dois tipos de vibrações são bastante problemáticas em pisos de edificações. Inicialmente são apresentadas as vibrações contínuas geradas por forças periódicas de máquinas, veículos e certas atividades humanas como, por exemplo, dançar. Esse tipo de vibração pode ser consideravelmente amplificado quando a frequência de excitação estiver sincronizada com a frequência fundamental da estrutura, numa condição chamada de ressonância. Em seguida, são apresentadas as chamadas vibrações transientes que podem ser acarretadas por passos de pessoas ou algum outro tipo de impacto.

Vários fatores podem afetar a vibração transiente, tais como: massa, rigidez, frequência natural da estrutura e taxa de amortecimento.

Ainda segundo esta norma [57], o caminhar das pessoas é representado pelo teste de impacto dos calcanhares também denominado de *heel drop test*, onde uma pessoa, após erguer seus calcanhares, deixa-os cair sobre o piso no local onde se deseja obter tais medições.

Os equipamentos utilizados na medição para a norma Canadense [57] deveriam ter uma capacidade de filtrar frequências superiores a 1,5 vezes a frequência fundamental da estrutura localizada no meio do vão, sendo que a pessoa usada na aferição do teste deverá estar sentada perto do ponto de medição. O indivíduo que realizar o teste deve ter um peso médio e estar usando calçados de solado macio. Os valores medidos são então comparados com os limites estabelecidos nesta norma, onde se observa se os níveis atingidos pelos pisos são aceitáveis ou não ao conforto humano.

Os valores são expressos em termos de pico de aceleração e porcentagem de amortecimento, podendo ser aplicados em residências, escolas e escritórios. Os níveis considerados devem ser os mais baixos para ocupações sensíveis como sala de operações e laboratórios especiais e mais altos para ocupações industriais.

Se os testes descritos não puderem ser realizados, parâmetros como a frequência fundamental da estrutura, amortecimento e aceleração de pico podem ser estimados pelas equações descritas a seguir.

O primeiro parâmetro a ser estimado é a frequência natural da estrutura e pode ser conferido pela equação (3.1):

$$f_1 = 156 \sqrt{\frac{EI_t}{wL^4}} \quad (3.1)$$

Onde:

E : módulo de elasticidade longitudinal do aço em (MPa);

$I_t$  : momento de inércia da seção transformada - (seção de concreto transformada para o aço) em (mm<sup>4</sup>);

L : comprimento do vão em (mm);

w : carga permanente da seção em (N/mm) do vão;

A aceleração de pico  $a_0$ , em porcentagem de aceleração da gravidade g (%g), pode ser determinada pelas equações (3.2) e (3.3):

- Para concreto normal

$$a_0 = \frac{68800 f}{L t_c (t_c + 25,4)} \quad (3.2)$$

- Para concreto leve

$$a_0 = \frac{88500 f}{L t_c (t_c + 25,4)} \quad (3.3)$$

onde:

f : frequência em (Hz);

L : vão em (m);

$t_c$  : espessura efetiva da laje de concreto em (mm).

#### 3.4.4

#### **Guia Prático do AISC – *Floor Vibrations Due To Human Activity (Steel Design Guide Series of American Institute of Steel Construction): AISC [53]***

O nome completo deste guia é *Floor Vibrations Due To Human Activity* (Vibrações em pisos devido à atividades humanas). Essa obra integra uma série de livros denominada *Steel Design Guide Series*, desenvolvida no *American Institute of Steel Construction (AISC)* pelos pesquisadores Murray, Allen e Ungar [53].

Esse guia de projeto [53] permite avaliar a resposta dinâmica estrutural, em termos de aceleração de pico, segundo as características dos elementos estruturais e carregamentos envolvidos no projeto. Os valores das acelerações de pico são então comparados com os valores limites definidos na curva base da

ISO [70], [71], que representa o limite no qual as acelerações verticais passam a ser perceptíveis, sendo nesse critério ajustadas de acordo com a intenção da ocupação. Os valores limites podem ser vistos na Figura 3.3, podendo apresentar variações numa faixa de 0,8 a 1,5 vezes dos valores recomendados de acordo com a duração da vibração e da frequência desta.

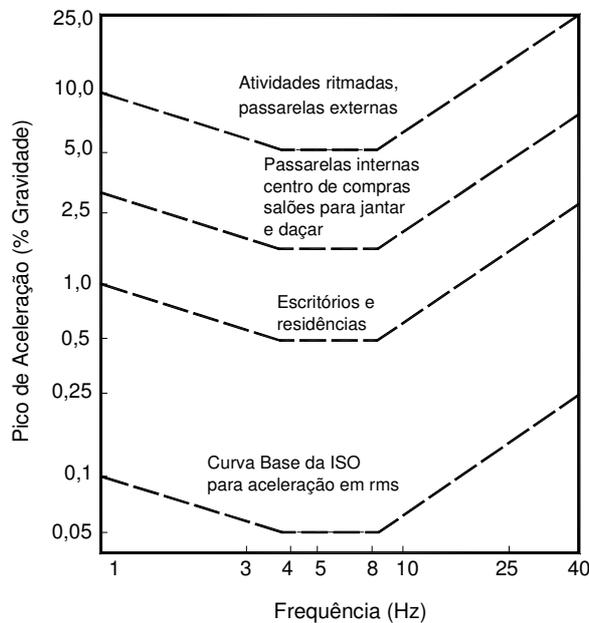


Figura 3.3 – Pico de aceleração máximo recomendado para o conforto humano [71]

Esse guia de projeto considera como solicitação dinâmica, uma componente harmônica dependente do tempo que se iguala à frequência natural da estrutural na tentativa de causar o fenômeno físico da ressonância, como mostra a equação (3.4):

$$P(t) = P \alpha_i \cos(2\pi i f_p t) \quad (3.4)$$

Onde:

$P(t)$ : ação dinâmica representativa da atividade realizada pelo ser humano em (N);

$P$ : peso da pessoa tomado da ordem de 700 N (3.4), para projeto;

$\alpha_i$ : coeficiente dinâmico referente ao harmônico causador da ressonância;

$i$ : múltiplo harmônico da frequência do passo;

$f_p$ : frequência do passo da atividade em (Hz).

t : tempo em (s).

Os valores da frequência do passo da atividade ( $f_p$ ) e coeficientes dinâmicos ( $\alpha_i$ ) podem ser vistos na Tabela 3.3 considerando diversos tipos de atividades.

Tabela 3.3 – Faixas de frequência das atividades [71]

Frequência de excitação ( $f_p$ ) e coeficientes dinâmicos ( $\alpha_i$ )						
Harmônico i	Pessoa caminhando		Aulas de aeróbica		Grupo de dança	
	$f_p$ (Hz)	$\alpha_i$	$f_p$ (Hz)	$\alpha_i$	$f_p$ (Hz)	$\alpha_i$
1	1,6-2,2	0,5	2,2-2,8	1,5	1,8-2,8	0,5
2	3,2-4,4	0,2	4,4-5,6	0,6	3,6-5,6	0,1
3	4,8-6,6	0,1	6,6-8,4	0,1	-	-
4	6,4-8,8	0,05	-	-	-	-

Coeficiente dinâmico  $\alpha_i$  = pico da força senoidal / peso da pessoa(s)

De acordo com este guia de projeto [71], o sistema de piso é considerado satisfatório se o pico de aceleração,  $a_p$ , devido a excitação da caminhada, em função da aceleração da gravidade,  $g$ , determinada através da equação (3.5), não exceder a aceleração limite,  $a_o/g$ , para a ocupação apropriada.

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_o \exp(0,35f_n)}{\beta W} ; \ddot{U} \frac{a_o}{g} \quad (3.5)$$

onde:

$\frac{a_p}{g}$  : razão entre a aceleração do piso e a aceleração da gravidade em (m/s<sup>2</sup>);

$\frac{a_o}{g}$  : aceleração limite recomendada de acordo com a curva limite [53] em (%g);

$f_n$  : frequência natural do sistema estrutural em (Hz);

$P_o$  : carga constante de valor igual a 0,29 kN para painéis de piso e 0,41 kN para passarelas;

$\beta$  : taxa de amortecimento modal;

$W$  : peso efetivo total do piso em (kN).

Os parâmetros empregados na equação (3.5) são obtidos na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Parâmetros utilizados na avaliação da resposta dinâmica estrutural [56]

Local	Força constante ( $P_o$ )	Taxa de amortecimento ( $\beta$ )	Aceleração limite $\frac{a_o}{g} \times 100\%$
Escritórios, residências e igrejas	0,29 kN	0,02 – 0,05*	0,5%
Centros de compras	0,29kN	0,02	1,5%
Passarelas internas	0,41kN	0,01	1,5%
Passarelas externas	0,41kN	0,01	5,0%

0,02 para pisos com poucos componentes não-estruturais (telhados, dutos, divisórias, etc.) como pode ocorrer em áreas de trabalho abertas e igrejas;  
0,03 para pisos sem componentes não-estruturais e mobílias, mas com poucas divisórias desmontáveis, típicas de muitas áreas moduladas de escritórios;  
0,05 para divisórias em contato com os dois pisos de andares adjacentes

Os valores da frequência fundamental da estrutura  $f_n$  e o peso efetivo do painel do piso  $W$  são estimados, primeiramente, considerando o painel das vigas principais e secundárias separadamente e depois então combinando-os.

#### 3.4.4.1 Frequência Natural do painel da viga principal

O calculo da deflexão máxima da viga principal é dada pela equação (3.6):

$$\Delta_g = \frac{5 w_g L_g^4}{384 E I_g} \quad (3.6)$$

Onde:

$I_g$ : Momento de inércia transformado da viga principal ( $\text{mm}^4$ );

$E_s$ : Módulo de elasticidade do aço (MPa);

$L_g$ : Vão da viga principal (mm);

$w_g$ : Carga por unidade de comprimento (kN/m).

O cálculo da frequência fundamental da viga principal é dado pela equação (3.7):

$$f_g = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_g}} \quad (3.7)$$

Onde:

$g$ : Aceleração da gravidade em ( $\text{m/s}^2$ ).

#### 3.4.4.2

#### Frequência fundamental do painel da viga secundária

O cálculo da deflexão máxima da viga secundária é dada pela equação (3.8):

$$\Delta_J = \frac{5 w_J L_J^4}{384 E I_J} \quad (3.8)$$

Onde:

$I_j$ : Momento de inércia transformado da viga secundária ( $\text{mm}^4$ );

$E_s$ : Módulo de elasticidade do aço (Mpa);

$L_j$ : Vão da viga secundária (mm);

$w_j$ : Carga por unidade de comprimento (kN/m).

Já o cálculo da frequência fundamental da viga secundária é dada pela equação (3.9):

$$f_j = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j}} \quad (3.9)$$

Onde:

$g$ : aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ).

### 3.4.4.3 Peso efetivo do painel das vigas principais

O cálculo do peso efetivo dos painéis das vigas principais é dado pela equação (3.10):

$$W_g = \left( \frac{w_g}{L_g} \right) B_g L_g \quad (3.10)$$

Onde:

$L_g$ : Vão da viga principal (mm);

$w_g$ : Carga por unidade de comprimento (kN/m).

O cálculo da largura efetiva do painel da viga que entrará em vibração é dado pela equação (3.11):

$$B_g = C_g \left( \frac{D_j}{D_g} \right)^{\frac{1}{4}} L_g \quad (3.11)$$

Onde:

$C_g$ : 1,6 para vigas principais suportando vigas conectadas em seu flange e 1,8 para vigas principais suportando vigas conectadas em sua alma;

O valor de  $B_g$  não pode ser maior que 2/3 do comprimento do piso na direção das vigas principais.

O cálculo do momento de inércia transformado da viga principal, por unidade de largura, é dado pela equação (3.12):

$$D_g = \frac{I_g}{L_j} \text{ ou } \frac{I_g}{2L_j} \quad (3.12)$$

Onde:

$\frac{I_g}{L_j}$ : Considerado para tudo menos para bordas com vigas principais;

$\frac{I_g}{2L_j}$ : Considerado para bordas com as vigas principais.

#### 3.4.4.4 Peso efetivo do painel das vigas secundárias

O cálculo do peso efetivo dos painéis das vigas secundárias é dado pela equação (3.13):

$$W_j = \left( \frac{w_j}{S} \right) B_j L_j \quad (3.13)$$

Esse valor é multiplicado por 1,5 caso ocorra a continuidade do painel

Onde:

$L_j$ : Vão da viga secundária (mm);

$w_j$ : Carga por unidade de comprimento (kN/m).

O cálculo da largura efetiva do painel de viga que entrará em vibração é dado pela equação (3.14):

$$B_j = C_j \left( \frac{D_s}{D_j} \right)^{\frac{1}{4}} L_j \quad (3.14)$$

Onde:

$C_j$ : 2,0 para vigas secundárias na maior parte das áreas e 1,0 para vigas principais e secundárias paralelas a uma borda interior;

O valor de  $B_j$ , não pode ser maior que 2/3 da largura do piso na direção das vigas secundárias;

O cálculo do momento de inércia por unidade de largura da seção transformada da laje é dado pela equação (3.15):

$$D_s = \frac{d_e^3}{12 n} \quad (3.15)$$

Onde:

$d_e$ : Espessura da laje de concreto em (mm).

Estima-se a razão do módulo de elasticidade dinâmico “n” que expressa a transformação da seção em aço para concreto pela equação (3.16):

$$n = \frac{E_s}{1,35 E_c} \quad (3.16)$$

Onde:

$E_s$  : Módulo de elasticidade do aço (Mpa);

$E_c$  : Módulo de elasticidade do concreto (Mpa).

O cálculo do momento de inércia por unidade de largura da seção transformada das vigas secundárias é dado pela equação (3.17):

$$D_j = \frac{I_j}{S} \quad (3.17)$$

Onde:

$I_j$  : Momento de inércia efetivo da viga ( $\text{mm}^4$ );

$S$  : Espaçamento entre as vigas secundárias (mm).

#### 3.4.4.5

##### Modo combinado

Para o modo combinado, o peso efetivo total será dado pela equação (3.18):

$$W = \frac{\Delta_j}{\Delta_j + \Delta_g} W_j + \frac{\Delta_g}{\Delta_j + \Delta_g} W_g \quad (3.18)$$

A deflexão da viga principal pode ser reduzida desde que o vão da viga principal seja menor que a largura efetiva do painel de viga secundária conforme a equação (3.19):

$$\Delta'_g = \frac{L_g}{B_j} \Delta_g \quad (3.19)$$

A frequência fundamental de todo o piso será dada pela equação (3.20):

$$f_n = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j + \Delta'_g}} \quad (3.20)$$

Para o modo combinado, o peso equivalente é dado pela equação (3.21):

$$W = \frac{\Delta_j}{\Delta_j + \Delta'_g} W_j + \frac{\Delta_g}{\Delta_j + \Delta'_g} W_g \quad (3.21)$$

### 3.4.5

#### **Norma ISO – International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibrations): ISO 2631/1**

Segundo essa norma [71], as vibrações afetam as pessoas de muitas formas, causando desconforto, problemas de saúde, diminuição da capacidade de concentração e eficiência no trabalho ou enjôo, no caso de vibrações de baixíssima frequência. A vibração das edificações pode alterar o conforto dos ocupantes a partir da frequência, da direção que atinge o corpo humano e de seu comportamento ao longo do tempo, se contínua, intermitente ou transitória. Além disso, a percepção e tolerância à vibração dependem do local, do tipo de atividade, do horário e da expectativa de conforto.

Segundo esta norma, são definidos métodos de medida da vibração de corpo inteiro e indicados os principais fatores que se combinam para determinar o grau de aceitabilidade à exposição da vibração. O texto apresenta informações e orienta, quanto aos possíveis efeitos da vibração sobre a saúde e o conforto, apresentando três níveis de sensibilidade humana às vibrações:

1) Limite da redução do conforto: quando atividades como comer, ler e escrever são prejudicadas com o nível de vibração a que as pessoas ficam expostas.

2) Queda da eficiência: ocorre deficiência na realização de determinada atividade, podendo ocasionar, no caso de longa exposição, efeitos de fadiga nas pessoas.

3) Limite do tempo de exposição – define o limite máximo que uma pessoa pode ficar exposta a uma perturbação sem que possa causar algum dano à saúde e a sua segurança.

### 3.4.6

#### **Norma ISO – International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibrations – Continuous and Shock-Induced Vibration in Buildings 1 to 80Hz): ISO 2631/2**

Essa norma [70] sugere que, para ambientes específicos, é possível avaliar o efeito das vibrações sobre o conforto das pessoas usando o valor quadrático médio (eficaz) da aceleração medida num período representativo. Ela apresenta um guia para aplicação da ISO 2631-1 [71] sobre resposta humana à vibração dos prédios, incluindo curvas, em função da frequência. Estas curvas

são estabelecidas conforme o eixo em que a vibração atinge o corpo humano (x-frontal, y-lateral ou z-longitudinal) em pé, sentado ou recostado, conforme mostra a Figura 3.4.

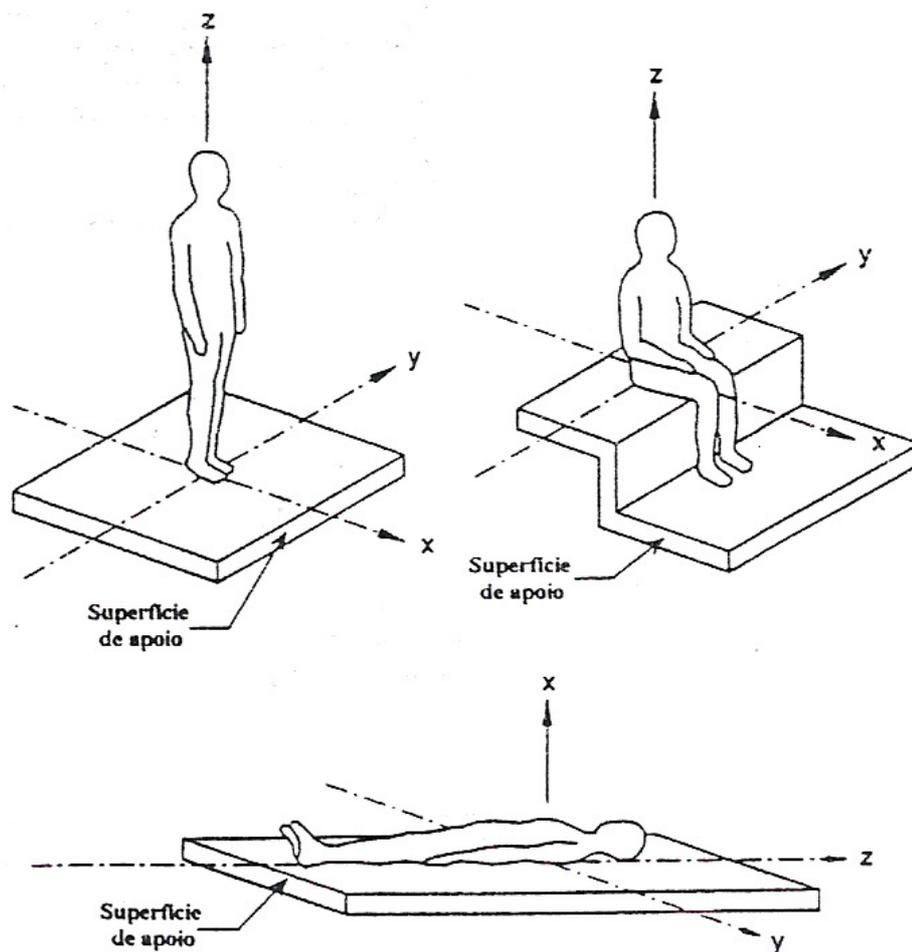


Figura 3.4 – Posição do eixo de acordo com a posição da pessoa [71]

A vibração transmitida para o corpo é dada através das superfícies de apoio, ou seja, os pés, para uma pessoa de pé; pés, nádegas e costas, para uma pessoa sentada e as superfícies de apoio de uma pessoa recostada ou deitada.

A vibração é definida por três variáveis: a frequência (Hz), a aceleração máxima sofrida pelo corpo ( $m/s^2$ ) e a direção do movimento conforme mostra a Figura 3.5, através de três eixos: x (das costas para frente), y (da direita para esquerda) e z (dos pés à cabeça).

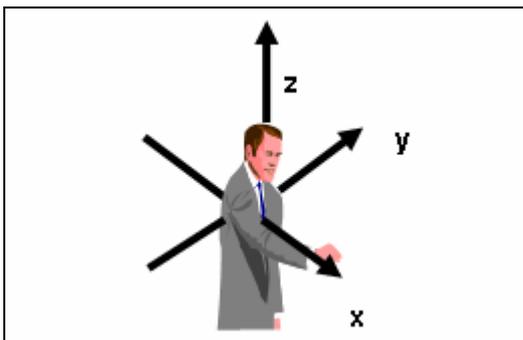


Figura 3.5 – Eixos de propagação das vibrações

Para a avaliação da influência da vibração sobre o conforto humano em edifícios, as acelerações em r.m.s. (*root mean square*), obtidas nas Figuras 3.6, 3.7 e 3.8, são multiplicados pelos valores da Tabela 3.5, que são estabelecidos em função do tipo de ocupação, do período de tempo e do tipo de vibração.

Tabela 3.5 – Faixas dos fatores de multiplicação usados em muitos países para magnitudes satisfatórias específicas de vibrações de edifícios em relação a resposta humana [70]

Local	Tempo	Vibrações contínuas ou intermitentes	Vibrações por excitação transiente com várias ocorrências ao dia
Áreas de trabalho críticas (salas de operação de hospitais, laboratórios de precisão, etc.)	Dia e noite	1	1
Residências	Dia	2 a 4	30 a 90
	Noite	1,4	1,4 a 20
Escritórios	Dia e noite	4	60 a 128
Salões de conferência e oficinas	Dia e noite	8	90 a 128

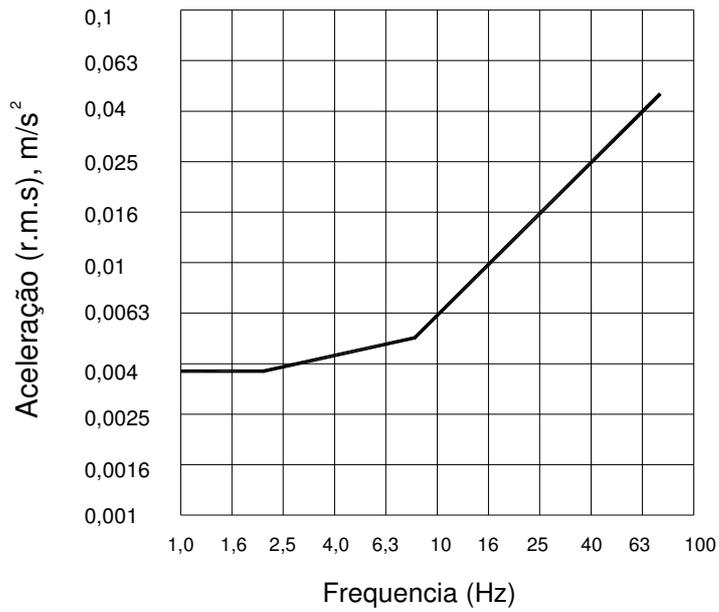


Figura 3.6 – Curva de vibrações para aceleração em direções combinadas (eixos x,y e z) [70]

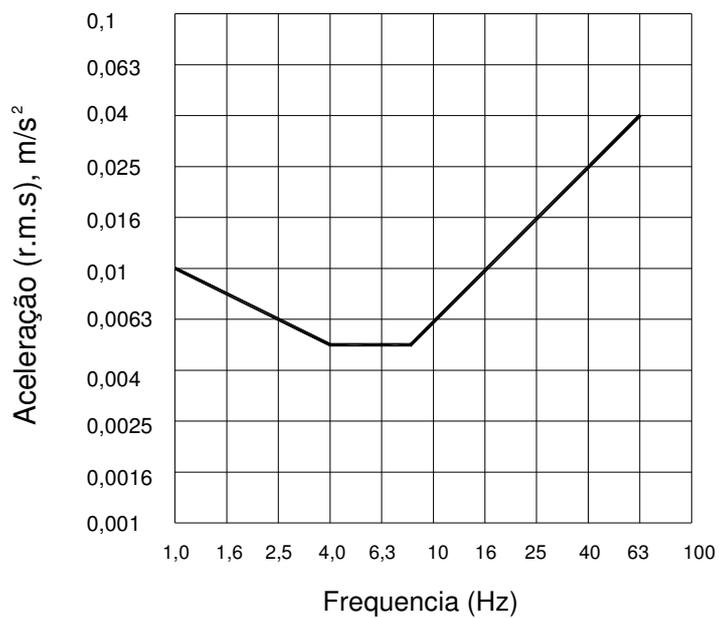


Figura 3.7 – Curva básica de vibrações de edificações para aceleração no eixo z [70]

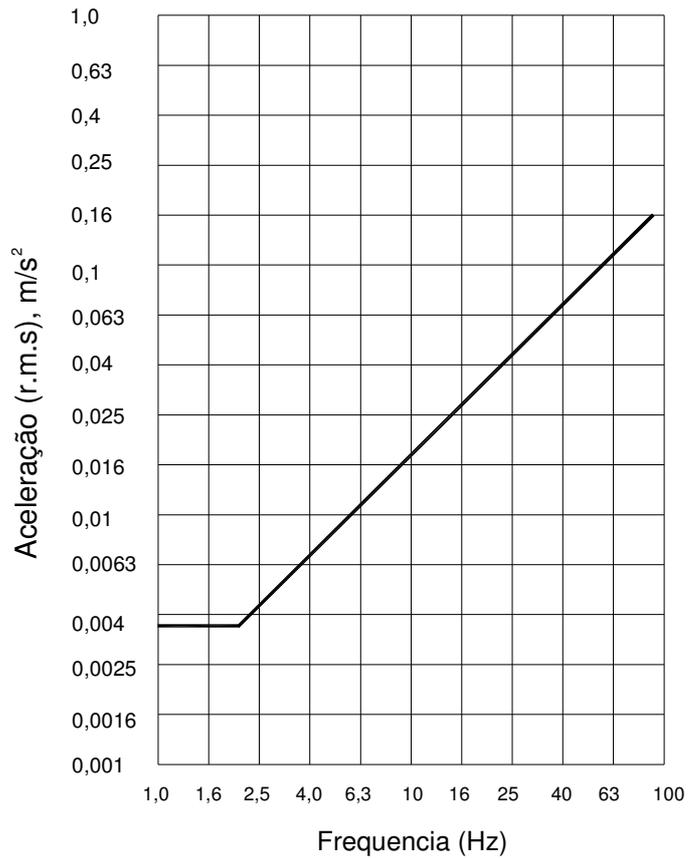


Figura 3.8 – Curva básica de vibrações de edificações para aceleração nos eixos x e y [70]

No Capítulo 4, são demonstradas as equações utilizadas para representar os modelos de carregamentos idealizados nesta tese, que procuram simular o carregamento humano gerado durante a caminhada e a realização de atividades rítmicas.