

3

Normas e recomendações de projeto

3.1.

Introdução

Com o avanço das pesquisas científicas a tradicional ideia de representar o carregamento dinâmico por cargas puramente estáticas, foi-se perdendo, pois, é provado que os efeitos dinâmicos causados por uma carga dinâmica, diferem muito da análise dos efeitos causados por uma carga estática.

Pela frequência das suas ocorrências e da preocupação dos projetistas em conhecê-las e resolvê-las, as vibrações em pisos devido às atividades humanas, serão aqui estudadas. Lembrando que se trata de uma atividade dinâmica que pode acontecer com contato contínuo e permanente do indivíduo com a estrutura, como por exemplo: dança de salão e andar. Como também com a perda de contato do indivíduo com a estrutura, ou seja, o indivíduo por alguns instantes encontra-se no ar. Esta situação se configura quando são realizadas atividades como correr, pular ou mesmo fazer exercícios aeróbicos.

3.2.

Normas e critérios de projeto

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 apresentam-se algumas normas que se referem à análise de estruturas submetidas a ações dinâmicas e critérios relativos à análise de conforto humano.

3.2.1.

NBR 6118 (2003) – Projeto e execução de obras de concreto armado

Segundo a norma brasileira NBR 6118 (2003), a análise das vibrações pode ser feita em regime linear no caso das estruturas usuais. A norma recomenda que a frequência natural da estrutura (f_n) deve-se afastar ao máximo

possível da frequência crítica (f_{crit}), que depende do tipo de atividade que será exercida sobre a estrutura, conforme a equação a seguir.

$$f_n > 1,2f_{critica} \quad (3.1)$$

O comportamento das estruturas sujeita às ações dinâmicas cíclicas que originam vibrações pode ser modificado por meio de alterações de alguns fatores, tais 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 3.1 para a $f_{critica}$.

Tabela 3.1 – Frequência natural mínima requerida NBR 6118 (2003).

Caso	$f_{critica}$ (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

A norma mostra que em casos especiais é comum aumentar a massa ou o amortecimento da estrutura para absorver parte da energia envolvida. E 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, que tratem do assunto.

3.2.2.

Guia Prático - Floor vibration due to human activity - AISC (2003)

Este guia de projeto AISC (2003), desenvolvido pelos pesquisadores Murray, Allen e Ungar, permite avaliar a resposta dinâmica estrutural, em termos de aceleração de pico, segundo as características dos elementos estruturais e carregamentos envolvidos no projeto, e também dar orientação no desenvolvimento de medidas corretivas para pisos problemáticos, devido a atividades humanas.

Para a avaliação da estrutura quanto a atividades rítmicas, calcula-se a relação a_p/g (g é a aceleração da gravidade), dada pela equação (3.2), na

ressonância, ou seja, fazendo a frequência do passo se igualar à frequência natural da estrutura ($f_p = f_n$).

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1,3\alpha_i w_p}{2\xi w_t} \quad (3.2)$$

Em que:

- a_p/g : razão entre a aceleração de pico e a aceleração da gravidade;
- α_i : coeficiente de Fourier associado ao i -ésimo harmônico da atividade;
- w_p : carga efetiva por unidade de área das pessoas distribuídas sobre o piso;
- w_t : carga total por unidade de área do piso, incluindo os ocupantes;
- ξ : taxa de amortecimento modal.

Os valores das acelerações de pico são então comparados com os valores limites definidos na curva base da ISO 2631/2 (1989), fornecidos pela norma International Standard Organization, que representa o limite no qual as acelerações verticais passam a ser perceptíveis. A ISO Standard sugere limites em termos da raiz quadrada do erro quadrático médio, rms (root mean square) das acelerações, como um múltiplo da linha base da curva apresentada na Figura 3.1. Sendo neste critério ajustadas de acordo com a intenção da ocupação. Para fins de projeto, esses limites podem ser considerados em uma faixa que varia entre 0,8 e 1,5 vezes os valores recomendados por norma, dependendo da duração da vibração e da frequência dos eventos referentes à vibração.

Considerando-se em uma solicitação dinâmica, uma componente harmônica dependente do tempo que coincide com a frequência fundamental do piso, como mostra a equação (3.3).

$$P(t) = P \alpha_i \cos(2\pi i f_p t) \quad (3.3)$$

Onde:

- $P(t)$: Força representativa da atividade humana ao longo do tempo (N);
- P : peso da pessoa (N);
- α_i : coeficiente de Fourier associado ao i -ésimo harmônico da atividade;
- i : múltiplo harmônico da frequência do passo;
- f_p : frequência do passo da atividade em (Hz);

t : tempo em (s).

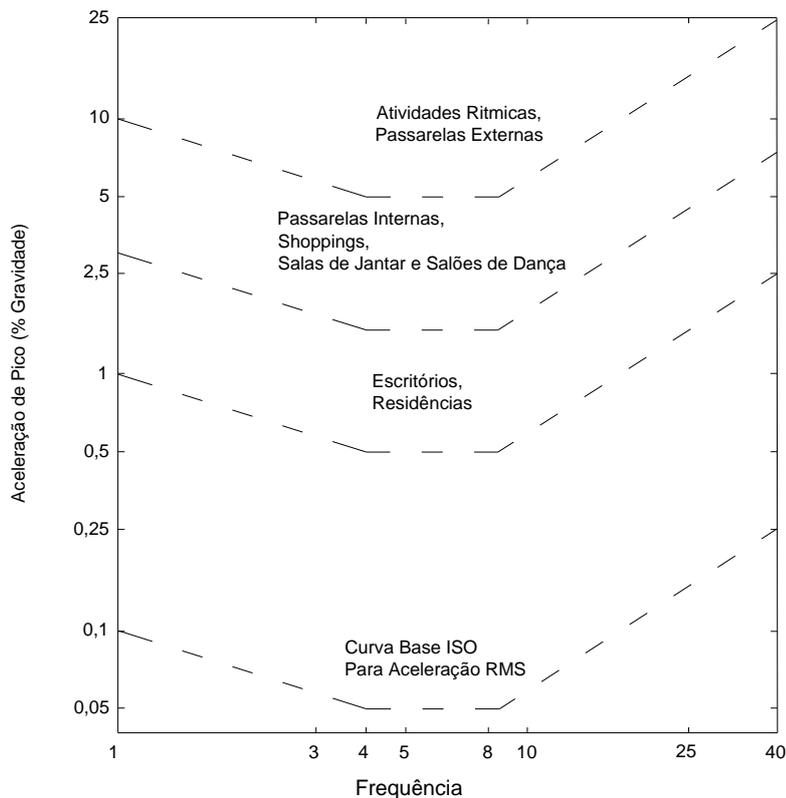


Figura 3.1 – Pico de aceleração máximo recomendado para o conforto humano ISO 2631/2 (1989).

Em alguns casos, apenas uma componente harmônica é empregada no caso associado à atividade humana de caminhar, já que a participação dos demais harmônicos é pequena em comparação com aquele associado à condição de ressonância. Na sequência, são apresentados na Tabela 3.2 os valores da frequência do passo da atividade (f_p) e coeficientes dinâmicos (α_i), considerando diversos tipos de atividades.

Tabela 3.2 – Frequências da excitação, f_p , e coeficientes dinâmicos, α_i , associados às atividades humanas AISC (2003).

Harmônico	Caminhada		Aulas de aeróbica		Grupo de dança	
	f_p (Hz)	α_i	f_p (Hz)	α_i	f_p (Hz)	α_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 α_i = pico da força senoidal / peso da pessoa(s)

A equação (3.2), pode, ainda, ser simplificada considerando-se que o coeficiente dinâmico para a componente força harmônica i , α_i , seja expresso em função da frequência da excitação, f , de acordo com a equação (3.4):

$$\alpha_i = 0,83 \exp(-0,35f) \quad (3.4)$$

Substituindo-se o coeficiente dinâmico, α_i , equação. (3.4), na equação (3.2):

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(-0,35f_n)}{\beta W} \leq \frac{a_0}{g} \quad (3.5)$$

Sendo:

a_p/g : aceleração de pico estimada em unidades de g ;

a_0/g : aceleração limite proposta por norma, ISO 2631/2 (1989);

f_n : frequência natural do piso;

P_0 : força constante.

O numerador $P_0 \exp(-0,35f_n)$, mostrado na equação (3.5), representa uma força harmônica efetiva devida ao caminhar, resultando na resposta dinâmica da estrutura, em termos da aceleração de pico, associada à condição de ressonância referente à frequência natural da estrutura.

A partir do critério de projeto para excitações provocadas por caminhadas, temos que estes possuem abrangências muito maiores do que os critérios comumente usados, sendo baseado na resposta dinâmica de um sistema de piso em aço para forças produzidas durante a caminhada.

O critério determina que o sistema de piso seja satisfatório se o pico de aceleração, a_p , devido à excitação da caminhada, em função da aceleração da gravidade, g , determinada através da equação (3.6), não exceda a aceleração limite, a_0/g , para a ocupação apropriada.

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(-0,35f_n)}{\beta W} \quad (3.6)$$

Sendo:

P_0 : força constante representativa da excitação;

f_n : frequência natural do piso;

β : coeficiente de amortecimento modal;

W: peso efetivo do piso.

Os valores recomendados para P_0 , β e a_0/g para várias ocupações, são dados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Valores recomendados para os parâmetros P_0 , β e limites para a_0/g AISC (2003).

Local	Força constante (P_0)	Taxa de amortecimento (β)	Aceleração limite $\frac{a_0}{g} \times 100\%$
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			

3.2.3.

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

A Norma Canadense CAN3-S16-M84, no apêndices G, apresenta dois tipos de vibrações que são bastante problemáticas em pisos de edificações. As vibrações contínuas, geradas por forças periódicas de máquinas, veículos e certas atividades humanas como, por exemplo, dançar. Que pode ser 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. É condicionado por alguns fatores tais como: massa, rigidez, frequência natural da estrutura e taxa de amortecimento.

Nessa Norma, CAN3-S16 (1994), 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 valores das acelerações são medidos e comparados com os limites estabelecidos nesta norma, onde se observa se os níveis atingidos pelos pisos são aceitáveis ou não ao conforto humano. Esses são expressos em termos de acelerações de pico e porcentagem de amortecimento, podendo ser aplicados em residências, escolas e escritórios.

Devem ser adotados os níveis mais baixos para ocupações sensíveis como sala de operações e laboratórios especiais e mais altos para ocupações industriais.

Na impossibilidade de realizar os testes para obter as acelerações, o amortecimento e as frequências naturais, os mesmos podem ser estimados através das equações descritas a seguir.

O primeiro parâmetro a ser estimado é a frequência natural da estrutura e é dado pela equação (3.7):

$$f_1 = 156 \sqrt{\frac{E I_t}{w L^4}} \quad (3.7)$$

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^4);

L : comprimento do vão em (mm);

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

Para o cálculo da aceleração de pico a_0 , em porcentagem de aceleração da gravidade g (%g), adota-se as equações (3.8)(3.8) e (3.9):

Para concreto normal

$$a_0 = \frac{68800 f}{L t_c (t_c + 25,4)} \quad (3.8)$$

Para concreto leve

$$a_0 = \frac{88500 f}{L t_c (t_c + 25,4)} \quad (3.9)$$

Onde:

f : frequência em (Hz);

L : vão em (m);

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

3.2.4

ISO 2631/1 - International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibrations)

A ISO 2631/1 (1985), considera que 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, é definida 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.

3.2.5

ISO 2631/2 - International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibrations)

Esta Norma Internacional mostra que as vibrações causam desconforto as pessoas afetando o seu bem estar. Assim sendo a mesma define valores

numéricos e dá limites de exposição a vibrações transmitidas ao corpo humano, na amplitude de frequência de 1 a 80 Hz.

Apresenta procedimentos de medição e critérios de aceitabilidade em edificações sujeitas a vibrações que podem levar ao desconforto humano. Ela estabelece limites para avaliação de vibrações, em função do tipo de vibração e do tipo de ocupação da edificação.

A ISO 2631/2 (1989), sugere limites em termos da aceleração rms, como um múltiplo da linha base da curva apresentada na Figura 3.2. Ela apresenta um guia para aplicação da ISO 2631-1 (1985) sobre resposta humana à vibração dos prédios, em função da frequência.

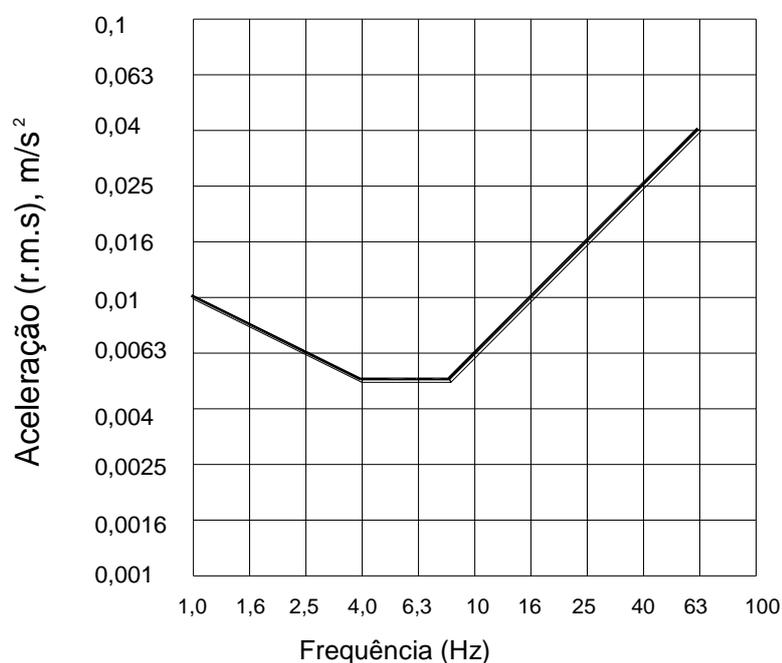


Figura 3.2 – Curva básica de vibrações de edificações para acelerações verticais ISO 2631/2 (1989).

3.2.6

Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e concreto de Edifícios: NBR 8800/2008

A NBR 8800/2008, aborda o estudo das vibrações em pisos devido às atividades humanas de forma bem resumida. 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. Condição válida 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 frequentes 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. Condições válidas 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 frequentes de serviço, não superar 9mm e 5mm.

Apesar disso, NBR 8800/2008 deixa a critério do projetista a opção pelo tipo de avaliação a ser realizada, sendo que para uma avaliação mais criteriosa o projetista deverá proceder a uma análise dinâmica que leve em conta os seguintes itens:

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

Para análises mais precisas, a NBR 8800/2008 cita e recomenda algumas publicações internacionais.

3.3. Procedimentos para minimizar efeitos de vibração

Cada vez mais o controle de vibrações em estruturas flexíveis tem se tornado necessário para mantê-las livres e seguras de danos estruturais graves ou de apresentar um potencial de falha estrutural, mesmo após longos ciclos de carregamento durante seu tempo de vida. Nesse sentido, as diversas técnicas de controle tem se mostrado eficazes e, para isso, sistemas de controle estrutural vêm sendo empregados em diversos tipos de estruturas, tais como: edifícios e torres ao redor do mundo.

Entretanto, uma delas será a mais apropriada e menos custosa para remediar tal situação. Nesta seção, serão apresentadas algumas medidas de controle.

3.3.1 Isolamento da vibração

Isolar é impor entre um sistema e sua base elementos com características de forma que as forças transmitidas do sistema para sua base sejam as menores possíveis. O isolamento pode ocorrer isolando a base das forças de vibração transmitida pelas máquinas ou isolar a máquina da vibração proveniente da base, o que seria fácil de resolver. O problema é quando as vibrações são causadas por pessoas praticando atividades sobre o piso. Neste caso elas são simultaneamente as fontes de excitação, receptoras e atenuadoras deste carregamento.

O controle de vibrações pode ser separado em métodos passivos e ativos. Os métodos de controle passivo de vibrações isolam a excitação da base para a máquina, lidam diretamente com as propriedades físicas das máquinas, como a rigidez, massa e amortecimento. Este tipo de controle deve agir com um tipo de mudança estrutural básica. São simplesmente responsáveis por absorver parte de energia de vibração.

Por outro lado o controle ativo consiste em isolar a base das vibrações proveniente das máquinas, para isso é necessário determinar as forças transmitidas pelos amortecedores e molas. Esse tipo de controle depende de uma fonte de energia externa e é baseado no uso de sensores e atuadores eletrônicos. Possuem habilidade de se adaptar a diferentes condições de carregamento e controlar os modos de vibração de uma estrutura.

3.3.2 Relocação

Pela facilidade, rapidez de execução, baixo custo e a não necessidade de um conhecimento aprofundado do assunto torna esta medida bastante eficaz e muito utilizada para se resolver o problema de vibrações em pisos.

A relocação prevê que os ambientes onde são configurados os problemas de vibração excessiva sejam isolados, dentro do possível, sendo relocados para pontos mais distantes da fonte de vibração. Esta relocação no ponto mais afastado também pode ser tomada como uma medida de isolamento da vibração em alguns casos. Só que possui algumas desvantagens, pois, está limitada ao espaço disponível, limita o espaço físico para a prática das atividades e também ao limite tolerável pela vizinhança em suas adjacências.

3.3.3 Enrijecimento

Na maioria das vezes, a decisão de aumentar a rigidez da estrutura, para reduzir os efeitos de vibrações em pisos, é complexa e custosa, pois requer uma mão de obra qualificada com profissionais habilitados. É uma medida que deve utilizar sempre materiais leves e rígidos de forma a evitar um aumento considerável da massa do sistema. Fator este que não contribuiria para o aumento da frequência natural da estrutura.

3.3.4 Aumento 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 serem empregados 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.

No Capítulo 4, são demonstrados os modelos de carregamentos dinâmicos e as respectivas equações utilizadas para simular as excitações dinâmicas humanas rítmicas como a ginástica aeróbica e saltos à vontade.