

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM
ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO E AÇO

ESTUDO DAS VIBRAÇÕES EM PAVIMENTOS COMPOSTOS POR
ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO

ANDERSON DE BRITTO MARQUES

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E AÇO

**"ESTUDO DAS VIBRAÇÕES EM PAVIMENTOS COMPOSTOS POR
ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO"**

ANDERSON DE BRITTO MARQUES

Trabalho Final apresentado ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço".

Comissão Examinadora:

Prof. Rodrigo Barreto Caldas, D.Sc.
DEES – UFMG (Orientador)

Prof. Fernando Amorim de Paula, D.Sc.
DEES – UFMG

Belo Horizonte, 01 de março de 2017.

RESUMO

Este estudo trata das vibrações ocorridas em pavimentos compostos por vigas de aço através de revisão bibliográfica. Com a evolução dos processos de cálculo estrutural e o aprimoramento das técnicas construtivas, tornou-se mais comum a execução de estruturas de pavimentos mais esbeltas, vencendo grandes vãos livres. Mas toda essa melhoria técnica ocasionou numa diminuição da rigidez dos elementos, tornando-os susceptíveis a vibrações provenientes de variados movimentos, tais como o caminhar, exercícios aeróbicos, danças e eventos esportivos. O principal objetivo deste trabalho é fornecer aos engenheiros e projetistas estruturais ferramentas de análise simples para a devida avaliação de excitações em pavimentos, um dos estados limites de utilização.

Palavras-chave: pavimentos; vibração; rigidez; frequência.

ABSTRACT

This study deals with vibrations occurring in floors composed of steel beams through a bibliographic review. With the evolution of the structural calculation processes and the upgrading of the constructive techniques, it became more common the execution of structures of pavements more slender, overpassing great spans. But all this technical improvement has resulted in a decrease in the rigidity of the elements, making them susceptible to vibrations from various movements, such as walking, aerobic exercises, dances and sporting events. The main objective of this work is to provide structural engineers and designers simple analysis tools for the proper assessment of pavement excitations, one of the limiting states of use.

Keywords: pavements; vibration; rigidity; frequency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Piso misto	13
Figura 2 - Laje maciça de concreto armado	14
Figura 3 - Viga mista	15
Figura 4 - Modelo de um sistema SDOF	17
Figura 5 - Tipos de carregamentos dinâmicos.....	18
Figura 6 - Carregamento de uma viga.....	22
Figura 7 - Carregamento periódico harmônico – vibração de máquina rotativa.....	22
Figura 8 - Carregamento periódico não harmônico – propulsor de navio	22
Figura 9 - Carregamento impulsivo – onda de choque de uma explosão	23
Figura 10 - Solicitação de longa duração – ação sísmica.....	23
Figura 11 - Carregamento aleatório – vibração ambiente.....	23
Figura 12 - Vibração livre não amortecida.....	24
Figura 13 - Vibração livre amortecida	24
Figura 14 - Série de Fourier para aeróbica de baixo impacto	28
Figura 15 - Forças elásticas e de amortecimento atuando sobre o corpo.....	30
Figura 16 - Picos de aceleração recomendados para conforto das vibrações devido às atividades humanas	36
Figura 17 - Instruções para Vibração definidas na ISO 2631, BS 6472e BS 6841	37
Figura 18 - Curvas de ponderação de frequência W_g e W_d (BS 6841).....	39
Figura 19 - Curva de ponderação de frequência W_b (BS 6841).....	39
Figura 20 - Critérios de análise de vibrações: (a) CSA Standard, (b) Escalas Reiher- Meister e Reiher-Meister modificada, (c) Escala ISO (1980), (d) Escala ISO (1989).....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes para vigas uniformes	26
Tabela 2 - Aceleração da média quadrática para várias formas de onda	32
Tabela 3 - Parâmetros dinâmicos recomendados.....	33
Tabela 4 - Fatores de ponderação apropriados para projetos de piso	38
Tabela 5 - Limites de aceleração recomendados para ocupações	41
Tabela 6 - Valores recomendados de parâmetros P_0 e β e limites para a_0 / g	45
Tabela 7 - Limites de aceleração recomendados para vibrações devido a atividades rítmicas (NBC 1990)	47
Tabela 8 - Carregamento estimado durante eventos rítmicos	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	08
1.1	GENERALIDADES	08
1.2	OBJETIVO GERAL	08
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	08
1.4	METODOLOGIA.....	09
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	ESTRUTURAS MISTAS	11
2.1.1	Introdução.....	11
2.1.2	Vigas mistas	12
2.1.3	Pisos mistos	15
2.2	VIBRAÇÕES	15
2.2.1	Vibrações mecânicas.....	15
2.2.2	Frequência	25
2.2.3	Excitação	27
2.2.4	Amortecimento	29
2.2.5	Aceleração.....	31
2.2.6	Frequência natural de pavimentos mistos	34
2.3	ACEITABILIDADE DAS VIBRAÇÕES	34
2.3.1	Considerações	34
2.3.2	Percepção humana.....	35
2.3.3	Critérios de aceitação	43
2.4	PROJETOS.....	44
2.4.1	Projeto para excitação de caminhada	44
2.4.2	Projeto para excitação rítmica	46
2.4.3	Projeto para equipamentos sensíveis	48
2.5	AVALIAÇÕES	49
2.5.1	Avaliação geral	49
2.5.2	Avaliação simplificada.....	50
2.5.3	Problemas de vibração e medidas corretivas.....	50

2.5.4	NBR 8800.....	51
3	CONCLUSÃO	52
4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

A vibração se caracteriza como “todo fenômeno mecânico no qual certas características de movimento se repetem permanentemente” (SOMMER, 2002, p. 3). Trata-se de um movimento periódico que, em geral, está relacionado a eventos considerados impressionantes e catastróficos, inclusive gerados pela própria natureza como, por exemplo, o terremoto. Ou seja, trata-se de um movimento desagradável, gerador de tensões dinâmicas e perdas.

A vibração dos pisos pode ocorrer devido a fontes externas como, por exemplo, o tráfego de veículos urbanos. Já como fonte interna mais comum, pode-se citar o tráfego de pedestres, o qual se destaca como sendo uma importante fonte de excitação dinâmica. Uma pessoa que anda a um ritmo regular aplica uma força periodicamente repetida. Com isso, entende-se que a estrutura deve ser, além de suficientemente rígida, atender aos critérios de conforto e aceitação (SMITH; HICKS; DEVINE, 2009).

Murray, Allen e Ungar (2003) afirmam que, para a aceitação do piso, a rigidez e a ressonância são fatores determinantes, pois a existência de um critério de rigidez para pisos mistos limita a deflexão das vigas.

1.2 OBJETIVO GERAL

Apresentar estudo sobre as vibrações em pavimentos compostos por estruturas mistas de aço e concreto.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar características referentes às estruturas mistas conceituando vigas e pisos mistos;
- Analisar sobre as vibrações, descrevendo sobre as vibrações mecânicas, frequência, excitação, amortecimento, aceleração e frequência natural de pavimentos mistos, bem como identificar como ocorre a aceitabilidade das vibrações;

- Descrever como se caracterizam os projetos para excitação de caminhada, para excitação rítmica e para equipamentos sensíveis;
- Identificar de que forma são efetuadas as avaliações, tanto de forma geral quanto simplificada.

1.4 METODOLOGIA

Para a elaboração deste estudo foi feita uma pesquisa de caráter teórico e que passou por todas as etapas: levantamento bibliográfico (leitura de livros) e pesquisas em artigos, revistas e material publicado no meio eletrônico.

Tratou-se de uma revisão de literatura com base na pesquisa bibliográfica com abordagem qualitativa.

A pesquisa bibliográfica é conceituada por Gil (2008) como sendo o tipo de pesquisa que se desenvolve por meio de material já elaborado, constituído de livros e artigos. Para este autor, os livros se caracterizam como fontes por excelência e são classificados como de leitura corrente ou de referência.

De acordo com Gil (2008), as fontes bibliográficas se constituem de livros, os quais são classificados como: de leitura corrente, que são obras literárias e obras de divulgação; e livros de referência, que são os informativos e remissivos. Os livros de referência informativa são classificados como: dicionários, enciclopédias, anuários e almanaques. Já os livros de referência remissiva dizem respeito a catálogos.

A pesquisa teve abordagem qualitativa pelo fato dos dados coletados não poderem ser generalizados e devido à técnica de análise ter ocorrido por meio de análise de conteúdo e por ter proporcionado uma visão melhor e maior compreensão do contexto do problema.

As leituras feitas durante o levantamento bibliográfico seguiram a seguinte ordem:

- Leitura exploratória: foram pesquisados artigos, monografias, revistas especializadas.
- Leitura seletiva: procedeu-se a escolha do material que serviu de apoio para a elaboração do estudo.

- Leitura analítica: momento em que foi feita uma análise mais detalhada do material selecionado e dos tópicos mais relevantes.
- Leitura interpretativa: pode-se entender o que as informações coletadas significavam para o alcance dos objetivos do estudo.

Conforme Gil (2008), a análise tem como objetivo organizar e resumir os dados de tal forma que possibilite o fornecimento das respostas ao problema proposto para investigação e, a interpretação tem como objetivo a procura do sentido mais amplo das respostas mediante a sua ligação a outros conhecimentos anteriormente obtidos.

Obteve-se o resultado final da definição do tema, do objetivo geral e específicos, a sistematização das principais ideias dos autores a respeito das vibrações em pavimentos compostos por estruturas mistas de aço e concreto.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O estudo foi dividido em capítulos sendo o primeiro esta introdução, a qual apresenta o conteúdo do trabalho, a definição sobre vibrações em pavimentos compostos por estruturas mistas de aço e concreto. Apresenta o objetivo geral e específicos, bem como a metodologia e a estrutura do estudo.

O capítulo 2 apresenta o referencial teórico, o qual é subdividido em seções apresentando as estruturas mistas, as vibrações, a aceitabilidade das vibrações, os projetos e as avaliações.

O capítulo 3 é a conclusão do estudo e, por fim, o capítulo 4, o qual apresenta as referências bibliográficas utilizadas para consulta e elaboração do estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ESTRUTURAS MISTAS

2.1.1 Introdução

Sommer (2002) conceitua as estruturas mistas como uma combinação de perfis metálicos com o concreto. Trata-se de materiais que possuem propriedades distintas, porém compatíveis e que podem se complementar, uma vez que possuem, em tese, o mesmo coeficiente de dilatação térmica.

Conforme Sommer (2002), o concreto proporciona proteção térmica e impede a corrosão do aço, assim como melhora o desempenho à flambagem local (mesa e alma) e à flambagem lateral por torção das peças metálicas.

Bastos (2006) conceitua o concreto como um material composto por água, cimento, aditivos, agregados miúdos e graúdos, com a finalidade de apresentar duas características: resistência e durabilidade. É um material que possui característica marcante ao apresentar uma boa resistência à compressão e baixa resistência à tração. O concreto possui uma grande resistência a compressão e possui ainda seus insumos com preço acessível. Entretanto, apresenta uma baixa resistência à tração, sendo necessário que se obtenha contramedidas para evitar fissuras na estrutura. O correto dimensionamento do aço utilizado no concreto é de fundamental importância para a durabilidade das peças.

De acordo com Sommer (2002), existe uma combinação ideal de resistências sendo o aço eficiente na tração e o concreto na compressão e, agregando-se os benefícios destes dois materiais ocorrem, com isso, as soluções mistas, muito interessantes no ponto de vista técnico e econômico.

Conforme Pinheiro, Muzardo e Santos (2003), o aço é uma liga metálica constituída especialmente de ferro e de pequenas quantidades de carbono (em torno de 0,002% até 2%).

Almeida (2002) afirma que a composição do aço resulta propriedades distintas, sendo que o teor de carbono exerce papel fundamental. A resistência do aço aumenta com o teor de carbono na sua composição ou mesmo a adição de outros elementos desenvolvendo as ligas. O mesmo efeito pode também ser alcançado por meio de tratamento posterior, térmico ou mecânico.

De acordo com Barbato (2007), no que diz respeito às propriedades mecânicas, o aço é um produto siderúrgico, constituído de minério de ferro, de manganês, de silício e de carbono.

Sommer (2002) afirma que, antes, as peças estruturais mistas eram empregadas exclusivamente com a finalidade de atribuir proteção ao fogo e à corrosão da seção de aço. O concreto usado era de baixa resistência, tendo pouca influência na capacidade de carga da estrutura.

Mais recentemente, na década de 60, percebeu-se que a utilização de um concreto de maior resistência trabalhando em conjunto com o perfil metálico, através da aderência, atrito e pelo uso de conectores de cisalhamento, seria uma solução construtiva muito econômica. É comum a utilização de armaduras complementares para diminuir eventuais fissuras, aumentar a resistência ao fogo e confinar o concreto (SOMMER, 2002, p. 46).

2.1.2 Vigas mistas

As vigas, pela definição da NBR 6118/03 - ABNT, “são elementos lineares em que a flexão é preponderante”. As vigas são consideradas como barras e são geralmente retas e horizontais, designadas a receber ações das lajes, de outras vigas, de paredes de alvenaria, e ocasionalmente de pilares etc.

“A função das vigas é basicamente vencer vãos e transmitir as ações nelas atuantes para os apoios, geralmente os pilares” (BASTOS, 2006, p. 26).

Ribeiro (1997 *apud* SOMMER, 2002) afirma que as vigas mistas geralmente são constituídas por um perfil “I” de aço tolerando em sua mesa superior uma laje de concreto armado fundido *in loco* no todo ou em parte, possuindo ligação entre o perfil e a laje de maneira que estes elementos trabalhem conjuntamente.

O conceito de concreto armado se baseia como “a união do concreto simples e de um material resistente à tração (envolvido pelo concreto) de tal modo que ambos resistam solidariamente aos esforços solicitantes” (BASTOS, 2006, p. 13). A definição de concreto armado abrange ainda o elemento da aderência, o qual é considerado eficaz e existe entre o concreto e a armadura e ocorre uma real dependência recíproca entre ambos, ou seja, entre o concreto e o aço, cujo trabalho deve ser efetivado de maneira conjunta.

Barbato (2007) conceitua o concreto armado como o resultado do concreto simples em que são colocadas barras de aço, geralmente de seção transversal circular, com a finalidade de resistir, principalmente, aos esforços de tração que se manifestam no seu interior.

É muito importante salientar que não basta reunir concreto e aço para que se tenha concreto armado. É necessário, em primeiro lugar, que a armadura esteja corretamente posicionada no interior da massa de concreto. Além disso, é de fundamental importância que entre concreto e aço haja uma perfeita ligação (aderência) de modo que as tensões de tração sejam absorvidas pelas armaduras de aço (BARBATO, 2007, p. 2).

Segundo Sommer (2002), as lajes empregadas nas vigas mistas podem, além disso, ser mistas, adquiridas por meio do uso de fôrmas metálicas com nervuras, conforme apresentado na Figura 1. Estas fôrmas têm saliências e mossas que garantem sua aderência ao concreto, funcionando, com isso, como armadura positiva da laje de concreto.

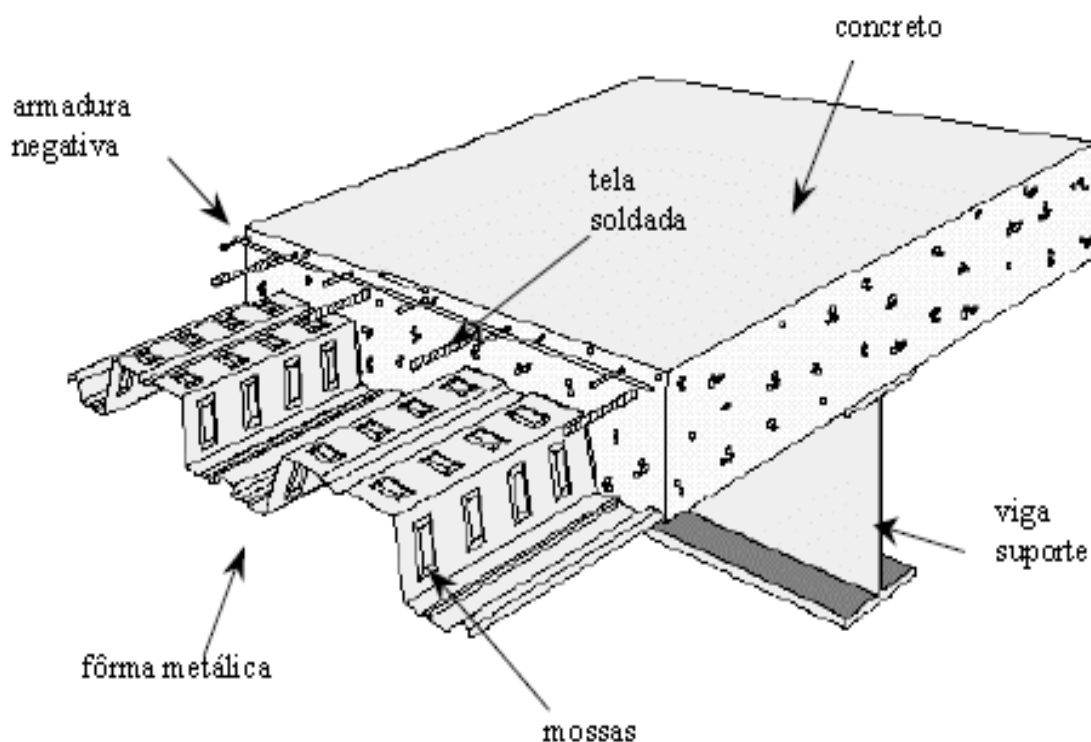


Figura 1 – Piso misto. Fonte: SOMMER, 2002, p. 47.

As lajes, conforme Bastos (2006) são elementos planos que se designam a receber a maior parte das ações aplicadas numa construção, como de pessoas, móveis, pisos, paredes, e os mais diversos tipos de carga, que podem existir em função do desígnio arquitetônico do espaço físico que a laje faz parte. Ver figura 2.

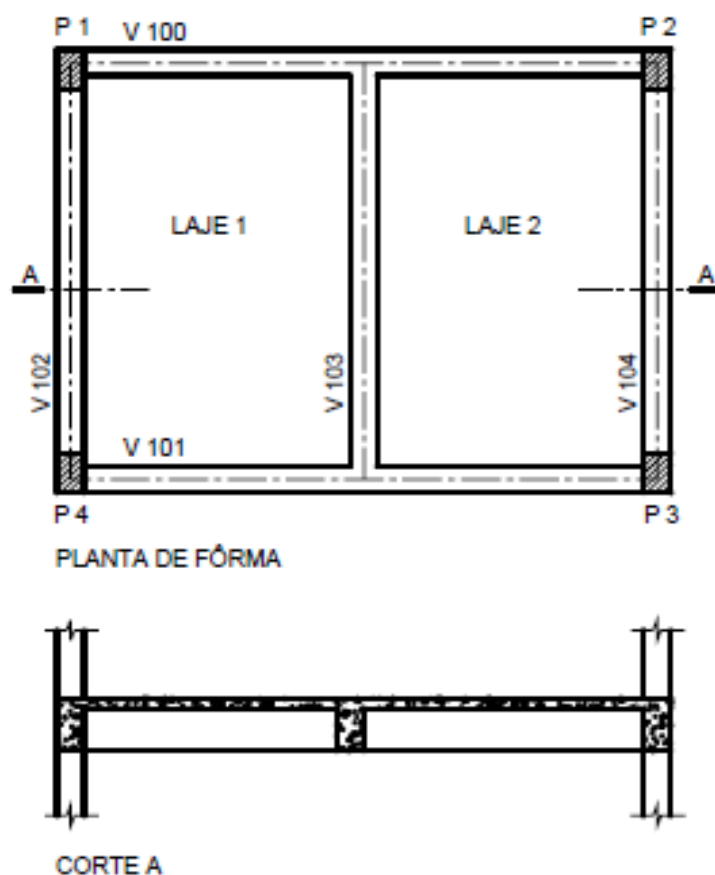


Figura 2 - Laje maciça de concreto armado.
Fonte: BASTOS, 2006, p. 22.

De acordo com Sommer (2002), a ligação entre a laje e o perfil “I” de aço é feita com conectores de cisalhamento, que reduzem ou impedem o escorregamento relativo na superfície de contato e a separação vertical entre os dois elementos, quando a viga se deforma sob a ação de cargas externas. As forças horizontais de cisalhamento no plano de contato são absorvidas pelos conectores e transmitidas ao perfil e à laje.

Neste sistema, a interação aço/concreto será completa se os conectores forem suficientes para que se atinja a resistência nominal da viga de aço ao escoamento ou da laje de concreto ao esmagamento. A interação será parcial caso a resistência nominal dos conectores seja inferior à da viga de aço e à da laje de concreto (JOHNSON, 1975 *apud* SOMMER, 2002, p. 48).

2.1.3 Pisos mistos

Sommer (2002) conceitua pisos mistos como sendo vigas de aço justapostas por uma laje de concreto, em que cada viga de aço trabalha em conjunto com uma faixa da laje de concreto, de acordo com o demonstrado na Figura 3.

“Para a verificação dos estados limites últimos e de utilização de uma viga mista em um piso misto, são necessárias duas grandezas básicas: a largura efetiva da laje de concreto que trabalha com a viga de aço e a carga assumida pela viga mista” (SOMMER, 2002, p. 56).

Sommer (2002) ressalta que tais grandezas modificam de acordo com as particularidades do piso e, geralmente, apresentam valores distintos para os dois tipos de estados limites.

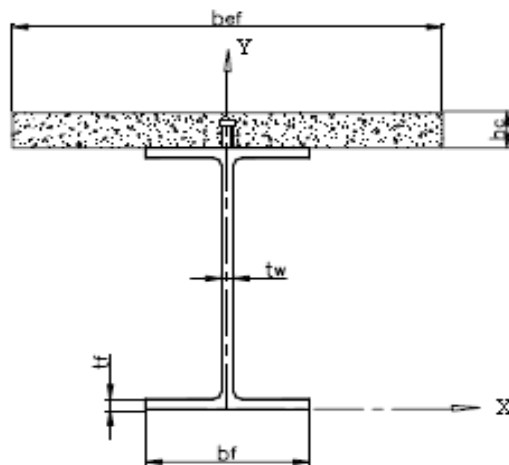


Figura 3 - Viga mista
Fonte: SOMMER, 2002, p. 57.

2.2 VIBRAÇÕES

2.2.1 Vibrações mecânicas

Smith, Hicks e Devine (2009) afirmam que, em geral, a vibração consiste em um movimento de massa e cada problema relacionado à mesma se classifica em duas categorias que são os sistemas contínuos e sistemas discretos.

No que diz respeito aos sistemas contínuos, conforme Smith, Hicks e Devine (2009), estes são definidos como aqueles que estão ligados diretamente entre si e são resolvidos por meio da

integração. O comportamento de sistemas contínuos é governado por equações que apresentam respostas por meio de relatos, envolvendo deslocamento, velocidade e aceleração, devido a uma determinada posição e tempo para a massa e rigidez do sistema, além de uma força inicial. A equação governante para uma viga em flexão, por exemplo, é:

$$m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = F(x, t)$$

Onde:

m = massa distribuída

w = deslocamento da viga, em função de x e t

t = tempo

EI = rigidez à flexão

x = posição ao longo da viga

F = força

Os sistemas discretos, segundo Smith, Hicks e Devine (2009), dizem respeito aqueles em que as massas do sistema são independentes e possuem como solução o uso de matrizes. Trata-se de sistemas que são modelados comumente por três elementos: massas, molas e amortecedores. Problemas relacionados aos sistemas discretos são resolvidos considerando as forças aplicadas em cada massa pelos outros elementos e, dessa forma, localizar e resolver equações de matriz que vinculam a aceleração, velocidade e deslocamento às forças externas.

Smith, Hicks e Devine (2009) afirmam que os problemas discretos incidem em duas categorias claras, sendo estas, um grau de liberdade (SDOF) e sistemas com vários graus de liberdade (MDOF). Os sistemas SDOF possuem apenas uma massa e, portanto, resultam em problemas simples. Os sistemas MDOF apresentam várias massas, acopladas de variadas maneiras sendo de difíceis soluções.

Um sistema SDOF típico é uma massa simples em uma mola, conforme apresentado na Figura 4. Neste caso com um amortecedor viscoso. O modelo apresentado é muito útil, uma vez que pode ser utilizado para cada tipo de sistema contínuo (sistema com diferentes parâmetros para cada modalidade) para avaliar a resposta em cada frequência.

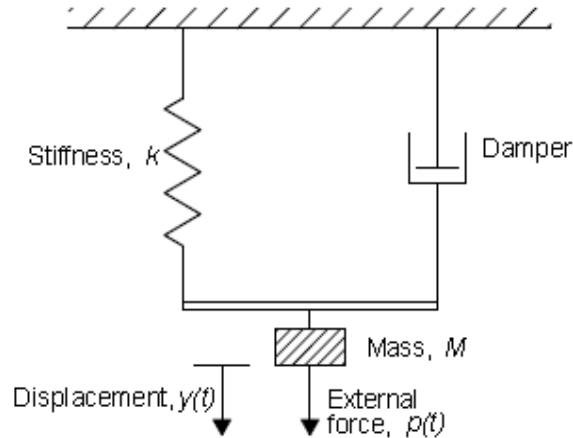


Figura 4 – Modelo de um sistema SDOF.
Fonte: Smith, Hicks e Devine, 2009, p. 5.

Smith, Hicks e Devine (2009) ressaltam que a dinâmica é um tema que pondera o comportamento e o efeito do movimento em um corpo e, dessa forma, é distinto das preocupações comuns em relação ao projeto estrutural que, normalmente se relacionam com comportamento estático, mesmo no que diz respeito às cargas que variam no tempo, assim como o vento. A vibração é um elemento peculiar da dinâmica considerada como sendo cíclica e repetitiva.

Historicamente, de acordo com relatos de Sommer (2002), os problemas originários de vibrações não eram analisados com a atenção devida em projetos de pisos. Porém, em decorrência da popularização de atividades relacionadas aos movimentos de pessoas, assim como o caminhar, exercícios aeróbicos, danças e eventos esportivos, problemas sérios de vibração passaram a ser motivados devido a estas excitações rítmicas.

Juntamente com a popularização de atividades rítmicas, as estruturas modernas têm sido executadas cada vez mais esbeltas. A utilização de grandes vãos livres ocasiona uma diminuição na rigidez dos pisos, tornando-os susceptíveis a vibrações provenientes de excitações dinâmicas. A diminuição na rigidez de uma estrutura acarreta em redução da sua primeira frequência natural, o que pode gerar problemas de ressonância pelo fato desta frequência natural aproximar-se das frequências representativas das excitações mencionadas, ocasionando vibrações excessivas nos sistemas estruturais (SOMMER, 2002, p. 63).

De acordo com Sommer (2002), tais vibrações resultam em grande desconforto aos usuários ou mesmo em comprometimento de partes resistentes da estrutura. Diante disso, percebe-se claramente a seriedade de uma análise dinâmica bem feita, com o objetivo de assegurar a segurança e o conforto dos usuários. Contudo, a maior parte dos projetistas também restringe-se somente a realizar uma análise estática das estruturas.

Numa análise de vibrações decorrentes de atividades humanas os aspectos fundamentais que devem ser ressaltados são os seguintes:

- Utilização de um modelo numérico que represente satisfatoriamente o comportamento real da estrutura;
- Determinação do nível de amortecimento da estrutura;
- Estabelecimento do carregamento dinâmico representativo do comportamento do público em uma atividade rítmica (SOMMER, 2002, p. 63).

Conforme Sommer (2002), são diversos os fatores que podem gerar as excitações dinâmicas como, por exemplo, os terremotos, ventos, trânsito de veículos, atividades exercidas pelo homem etc. Entre os problemas dinâmicos que se apresentam na engenharia estrutural, se posicionam em lugar de evidência os que são produzidos por atividades desempenhadas pelo homem, em particular, o estudo do comportamento de estruturas submetidas a cargas causadas por pessoas em movimento.

Atividades comuns as quais passam despercebidas pelos projetistas, em geral são procedentes desses problemas. A simples ação de andar, correr, pular ou ainda mesmo dançar são exemplos das atividades humanas que causam cargas dinâmicas, conforme apresentado na Figura 5.

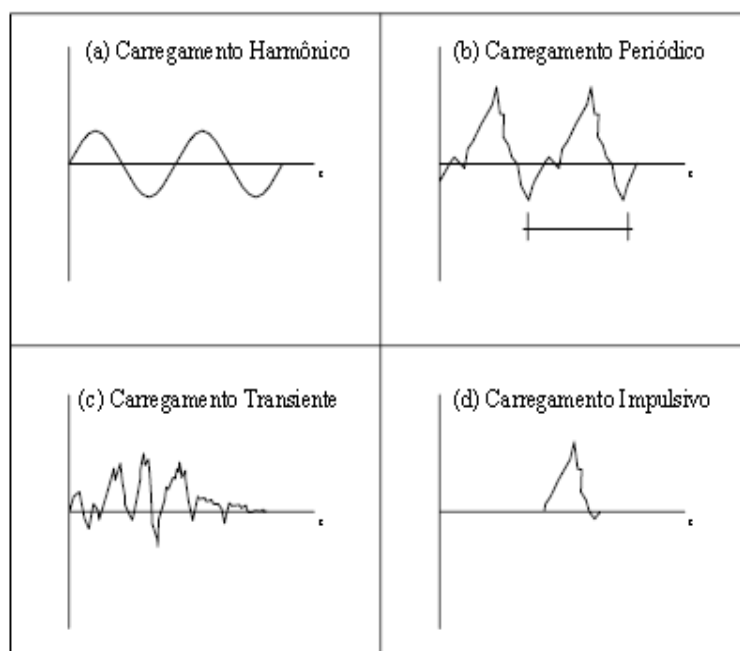


Figura 5 - Tipos de carregamentos dinâmicos
Fonte: SOMMER, 2002, p. 65.

Sommer (2002) relata que, na maior parte dos ocorrências, este tipo de carga causa um desempenho inadequado da estrutura no que diz respeito à perturbações e desconforto aos usuários. Geralmente ocorrem também problemas de segurança decorrentes de ações dinâmicas, como os provenientes de fadiga do material.

Grande parte dos problemas de vibração em pisos abrange carregamentos periódicos, que por meio de uma decomposição em série de Fourier, podem ser representados por uma combinação de várias forças harmônicas (SOMMER, 2002).

$$F = P \left[1 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \text{sen}(2\pi i f t + \phi_i) \right]$$

Onde:

P : peso da pessoa

α_i : coeficiente dinâmico

i : múltiplo harmônico

f : frequência de uma excitação dinâmica

t : tempo

n : número de harmônicos sendo considerados

ϕ_i : ângulo de fase para um harmônico

“Os carregamentos dinâmicos periódicos possuem um número variável de componentes harmônicas, com frequências múltiplas da frequência de excitação” (SOMMER, 2002, p. 66).

De acordo com Sommer (2002), para vibrações decorrentes de atividades humanas como dança ou aeróbica, os três iniciais elementos harmônicos são frequentemente considerados, devido à possibilidade de incidir problemas de ressonância até com o segundo e terceiro elementos aproximando-se da frequência natural do sistema de piso.

Sommer (2002) afirma que é presumível controlar a aceleração por causa da ressonância com a elevação dos níveis de amortecimento ou da massa da estrutura. Este controle é mais eficaz quando a amplitude da aceleração é pequena e como a mesma é para o caminhar.

Onde as forças dinâmicas são grandes, como as devidas a aeróbica, a vibração ressonante é geralmente muito grande para ser controlada pelo crescimento do amortecimento ou da massa. Neste caso, a frequência natural de qualquer modo de vibração de um piso, submetido a um carregamento dinâmico, precisa ser mantida fora da faixa de frequências dos múltiplos significativos da excitação. Isto, geralmente, significa que a frequência natural fundamental do piso tem que ser maior do que a da maior componente harmônica da excitação que possa causar ampla vibração ressonante (SOMMER, 2002, p. 66).

Conforme Sommer (2002), para tais atividades alguns cuidados devem ser levados em consideração evitando-se, com isso, a transmissão de vibrações para ocupantes em outras partes do piso ou do prédio, devido ao fato de que os limites de percepção e sentimento de desconforto de níveis de aceleração podem alterar de pessoa para pessoa e com a atividade que a mesma esteja desempenhando. Devido a isso, é necessário que se leve em consideração que a vibração possa ser do mesmo modo transmitida aos apoios, como colunas, particularmente nos locais em que existam probabilidades da ocorrência de ressonância.

Com isso, segundo Sommer (2002), é imprescindível que sejam efetuados estudos sobre o comportamento dinâmico da estrutura assegurando valores de acelerações apropriados ao adequado emprego da mesma.

Conforme Correia (2007, p. 1), “uma vibração mecânica é o movimento oscilatório de uma partícula ou de um corpo em torno de uma posição de equilíbrio”. Este movimento oscilatório é, normalmente, promovido quando o sistema é deslocado da sua posição de estabilização uma vez que, por exemplo, o desempenho de forças exteriores, de deslocamentos da sua base ou de choques com outros corpos. As forças influentes no corpo quando essa promoção interrompe apresentam a intenção de reparar a forma inicial, sendo designadas como forças de restituição. Quando o corpo alcança de novo a sua posição inicial a sua velocidade não será inexistente devido ao movimento se delongará no tempo como uma oscilação harmônica.

O espaço de tempo indispensável para o movimento concluir um ciclo é o período de vibração (T).

A frequência de vibração (f) é o seu oposto e obedece ao número de ciclos por unidade de tempo:

$$f = 1/T$$

Sendo que um ciclo em um movimento circular corresponde a um ângulo de 2π radianos, determina-se a frequência angular (ω) como sendo:

$$\omega = 2\pi f$$

“O deslocamento máximo do sistema medido a partir da sua posição de equilíbrio é a amplitude do movimento” (CORREIA, 2007, p. 1).

Conforme Correia (2007), uma vibração pode ser considerada como livre, quando o movimento se sustenta somente devido às forças de restituição, ou forçada, quando se coloca uma força variável no tempo. Pode também ser atenuada, quando as consequências do atrito não são desprezíveis (amortecida), ou não amortecida, quando o atrito pode ser desprezado.

No que diz respeito aos fenômenos dinâmicos e solicitações, Correia (2007) afirma que um fenômeno de origem dinâmica é caracterizado por uma solicitação variável no tempo, e por acaso ainda no espaço, no qual as forças de inércia, produto da massa pela aceleração, apresentam uma influência expressiva na resposta do sistema. Por excesso de linguagem, o termo “carregamento dinâmico” é comumente conferido de maneira errada a fenômenos cuja exclusiva particularidade é serem variáveis no tempo. De fato, se a velocidade de carregamento for satisfatoriamente lenta, a aceleração é desprezível e as forças de inércia não possuem uma influência expressiva na resposta. Esses fenômenos são qualificados como cíclicos, se o sentido do carregamento é alternado, ou quase estáticos. Tem-se como exemplos:

- Fenômeno quase estático monotônico: aplicação de uma carga crescente a uma estrutura (Figura 6a), na qual a carga $P(t)$ varia lentamente; as únicas forças aplicadas à viga além da carga $P(t)$ são as reações de apoio $R(t)$, também elas variáveis no tempo;
- Fenômeno dinâmico: impacto na estrutura produzindo uma força $P(t)$; as forças aplicadas são nesse caso a força $P(t)$, as reações de apoio $R(t)$ e as forças de inércia $f_i(t)$ dependentes da distribuição de massa e das acelerações na estrutura (Figura 6b);
- Carregamento cíclico: solicitação da estrutura da Figura 6a por uma força lentamente crescente e em seguida decrescente, como é o caso da ação das ondas sobre as plataformas *off-shore*;
- Carregamento dinâmico alternado: a força $P(t)$ varia rapidamente de forma crescente e em seguida decrescente, como é o caso das vibrações de uma máquina colocada sobre a estrutura da Figura 6a. Este tipo de carregamento é igualmente o induzido por uma solicitação sísmica imposta à estrutura (CORREIA, 2007, 2).

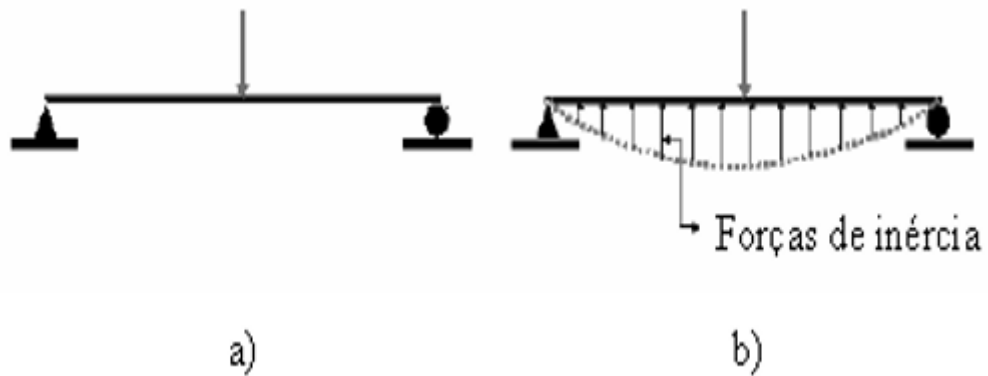


Figura 6 - Carregamento de uma viga.
Fonte: CORREIA, 2007, p. 2.

Segundo Correia (2007), os tipos de solicitações podem se classificar como determinísticos ou aleatórios de acordo com a sua variação temporal e espacial sendo corretamente determinada ou não. Dentre as solicitações determinísticas podem assinalar-se as periódicas, ou seja, harmônicas ou não, e não periódicas, ou seja, impulsivas ou de longa duração. As Figuras 7 a 11 demonstram os diversos tipos de solicitações e a relativa variação temporal.

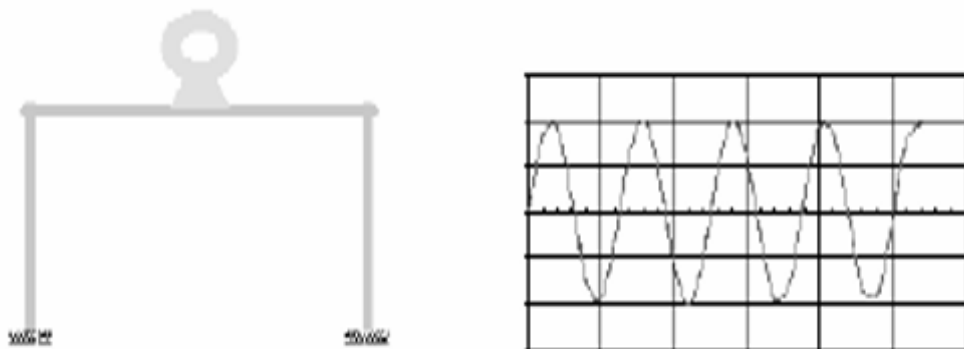


Figura 7 - Carregamento periódico harmônico – vibração de máquina rotativa.
Fonte: CORREIA, 2007, p. 2.

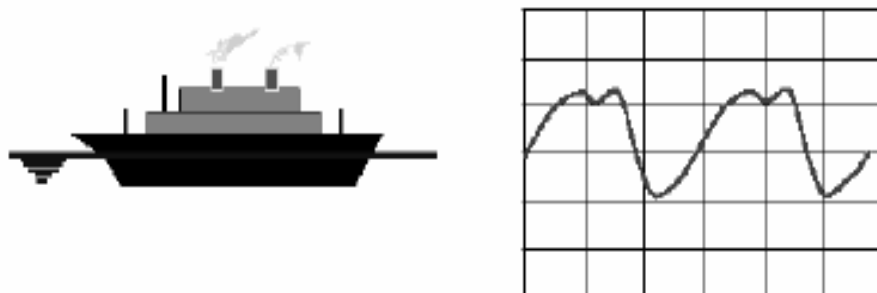


Figura 8 - Carregamento periódico não harmônico – propulsor de navio.
Fonte: CORREIA, 2007, p. 2.

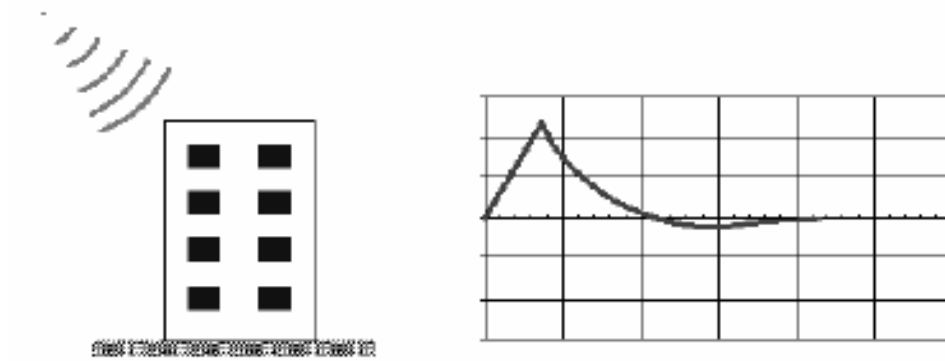


Figura 9 - Carregamento impulsivo – onda de choque de uma explosão.

Fonte: CORREIA, 2007, p. 3.

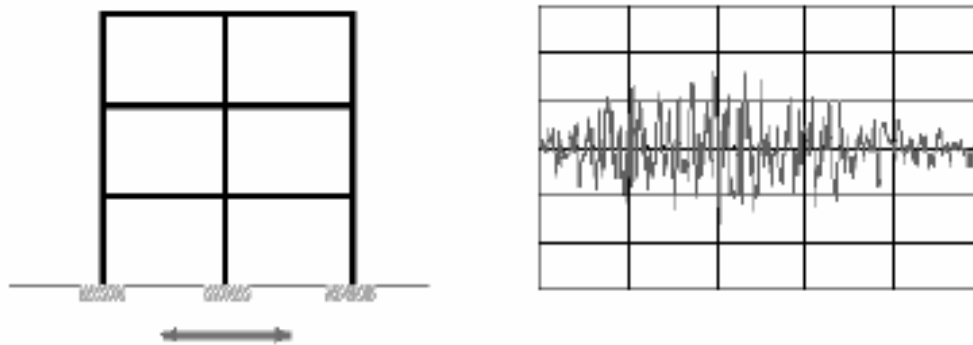


Figura 10 - Solicitação de longa duração – ação sísmica.

Fonte: CORREIA, 2007, p. 3.

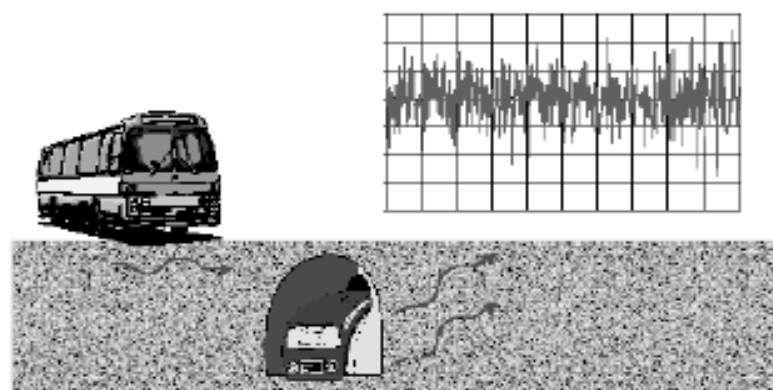


Figura 11 - Carregamento aleatório – vibração ambiente.

Fonte: CORREIA, 2007, p. 3.

Conforme Correia (2007), quando um movimento oscilatório é instigado exclusivamente através de um deslocamento inicial em relação à posição de equilíbrio estático ou por uma velocidade inicial designa-se de vibração livre.

O movimento correspondente a uma vibração livre não amortecida é um movimento harmônico com amplitude constante e período igual a $T_n = 2\pi / \omega_n$, conforme apresentado na Figura 12:

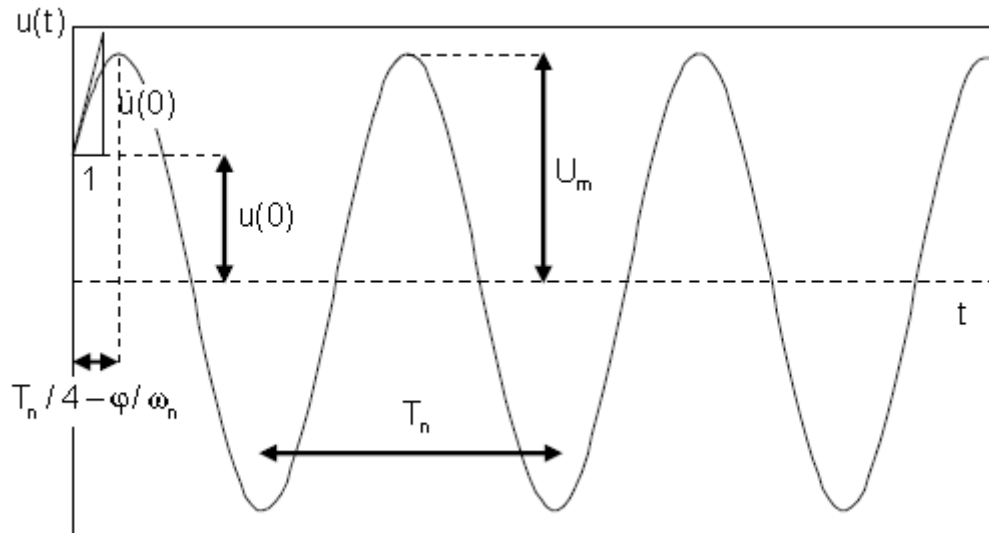


Figura 12 – Vibração livre não amortecida.
Fonte: CORREIA, 2007, p. 16.

Onde ω_n = frequência angular natural do sistema

Já o movimento relacionado a uma vibração livre amortecida com deslocamento inicial $u(0)$ é demonstrado na Figura 13. De acordo com a representação da figura, os valores máximos do deslocamento estão espaçados de um intervalo de tempo igual a $T_d = 2\pi / \omega_d$. “A sua amplitude decresce exponencialmente ao longo do tempo e tende para zero a tempo infinito. O regresso à posição de equilíbrio estático é tanto mais lento, e com mais ciclos de oscilação, quanto menor for o amortecimento” (CORREIA, 2007, p. 18).

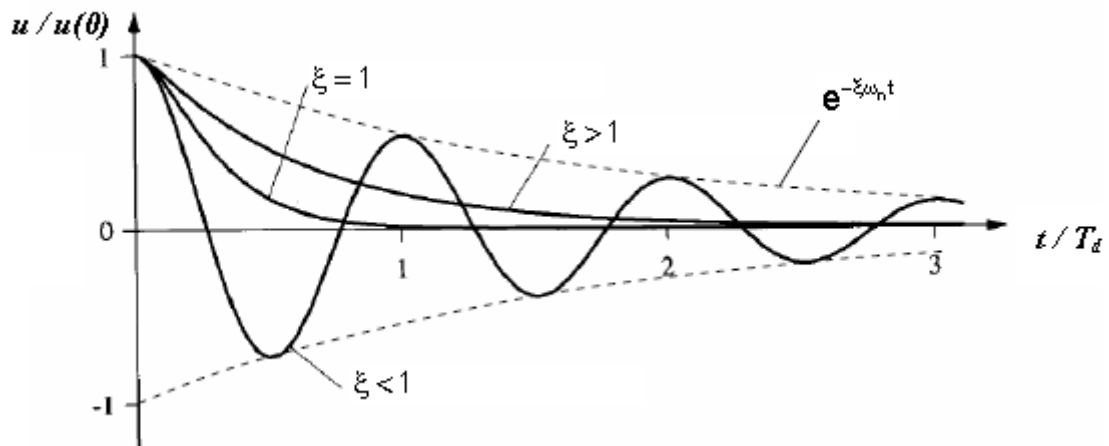


Figura 13 – Vibração livre amortecida. Fonte: CORREIA, 2007, p. 19

Onde:

ωd = frequência angular amortecida

ξ = fator de amortecimento

- sistema com amortecimento sobre-crítico ($\xi > 1$);
- sistema com amortecimento crítico ($\xi = 1$);
- sistema com amortecimento sub-crítico ($\xi < 1$)

Para estruturas de engenharia civil o fator de amortecimento é em geral igual ou inferior a 5%.

No que diz respeito às vibrações forçadas, o estudo se faz devido a uma solicitação aplicada diretamente à massa ou devido a um movimento dos apoios. Neste caso considera-se o caso de um sistema com amortecimento sub-crítico, que é o único caso com importância prática para estruturas de engenharia civil.

Segundo Correia (2007), o estudo de um caso de uma solicitação harmônica prende-se com o fato de qualquer função poder ser decomposta numa série de funções harmônicas. Dessa forma, o caso pode ser utilizado de base para a análise de vibrações forçadas devido a solicitações mais complexas.

2.2.2 Frequência

Smith, Hicks e Devine (2009) afirmam que as frequências naturais de um sistema, dadas em Hz (hertz - ciclos por segundo) ou radianos por segundo, é uma medida de taxa na qual o sistema vibra. Trata-se de uma parte essencial de qualquer problema de vibrações, uma vez que as frequências são determinadas, os efeitos de quaisquer forças externas sobre um sistema não podem ser previstos. Por exemplo, uma carga que se acumula e decai em 1s causará uma grande reação em um sistema com frequência de 1Hz, mas quase nenhuma reação em um sistema com frequência de 0,01Hz ou num sistema com uma frequência de 100 Hz.

Para o cálculo de frequência, segundo Smith, Hicks e Devine (2009), para livre vibração elástica de uma viga de seção uniforme, a frequência do n-ésimo modo de vibração é dada resolvendo a equação para dar o seguinte resultado (frequência radial $\omega_n = 2\pi f_n$):

$$f_n = \frac{\kappa_n}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}$$

Onde:

EI = rigidez à flexão dinâmica do elemento (Nm^3)

m = peso próprio (kg/m)

L = vão do elemento (m)

K_n = constante que representa as condições de sustentação da viga para o n-ésimo modo de vibração.

Conforme Smith, Hicks e Devine (2009), alguns valores padrão de k_n para elementos com condições de contorno diferentes são dados na Tabela 1:

Tabela 1 – Coeficientes para vigas uniformes

Support Conditions	κ_n for mode n		
	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$
pinned/pinned ('simply-supported')	π^2	$4\pi^2$	$9\pi^2$
fixed both ends	22.4	61.7	121
fixed/free (cantilever)	3.52	22	61.7

Fonte: SMITH; HICKS; DEVINE, 2009, p. 6.

Smith, Hicks e Devine (2009) afirmam que um método adequado para estabelecer o valor natural fundamental de frequência de uma viga f_1 (às vezes referida como f_0), é utilizando a deflexão δ ocasionada pelo peso de uma massa uniforme por unidade de comprimento m . Para um elemento unicamente suportado submetido a uma carga uniformemente distribuída (para $k_1 = \pi^2$), esta é a expressão familiar:

$$\delta = \frac{5mgL^4}{384EI}$$

Onde g é a aceleração devida à gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Reorganizando a equação e substituindo o valor de m e k_1 , dá a seguinte equação, na qual δ é expresso em mm:

$$f_1 = \frac{17.8}{\sqrt{\delta}} \approx \frac{18}{\sqrt{\delta}}$$

Onde δ é a deflexão máxima devido ao peso próprio e quaisquer outras cargas que podem ser consideradas permanentes. Também pode ser facilmente mostrado que um numerador de aproximadamente 18 poderia novamente ser alcançado se as etapas acima forem repetidas para uma viga com suporte diferente com a equação apropriada para deflexão e k_n inserida dentro da equação. Portanto, para o projeto, a equação pode ser usada como expressão generalizada para determinar a frequência natural de elementos individuais, mesmo quando não sejam simplesmente apoiados, desde que apropriado de δ . Além disso, a aproximação de Dunkerly demonstra que a equação dará a frequência natural fundamental de um sistema de δ é tomada como a soma das deflexões de cada um dos componentes estruturais (como exemplo, pode-se citar as vigas principais, vigas secundárias e a laje).

$$\frac{1}{f_1^2} = \frac{1}{f_s^2} + \frac{1}{f_b^2} + \frac{1}{f_p^2}$$

Onde f_s , f_b e f_p são as frequências componentes da laje, viga secundária e viga principal respectivamente.

2.2.3 Excitação

Conforme Smith, Hicks e Devine (2009), a excitação pode ser apresentada em função da força contínua ou força impulsiva.

No caso da força contínua, segundo Smith, Hicks e Devine (2009), a resposta de um sistema vibratório pode ser encontrada por meio da determinação de valores de amplitude e comprimento de ondas. Para estabelecer a resposta global de uma função de força contínua mais complicada, esta função pode ser dividida numa série de ondas senoidais, cada uma das quais tendo uma frequência num múltiplo inteiro (ou harmônico) da frequência de força. Cada

frequência harmônica terá uma amplitude associada e um comprimento de onda, e o conjunto de harmônicos é conhecido como série de Fourier.

Smith, Hicks e Devine (2009) afirmam que a rotina para encontrar uma série de Fourier pode ser encontrada em textos como Matemática de Engenharia Avançada. Como exemplo, as quatro primeiras séries de Fourier para a força de excitação devido a atividades aeróbicas leves (modelado Série de ondas semi-senoidais) são apresentadas na Figura 14.

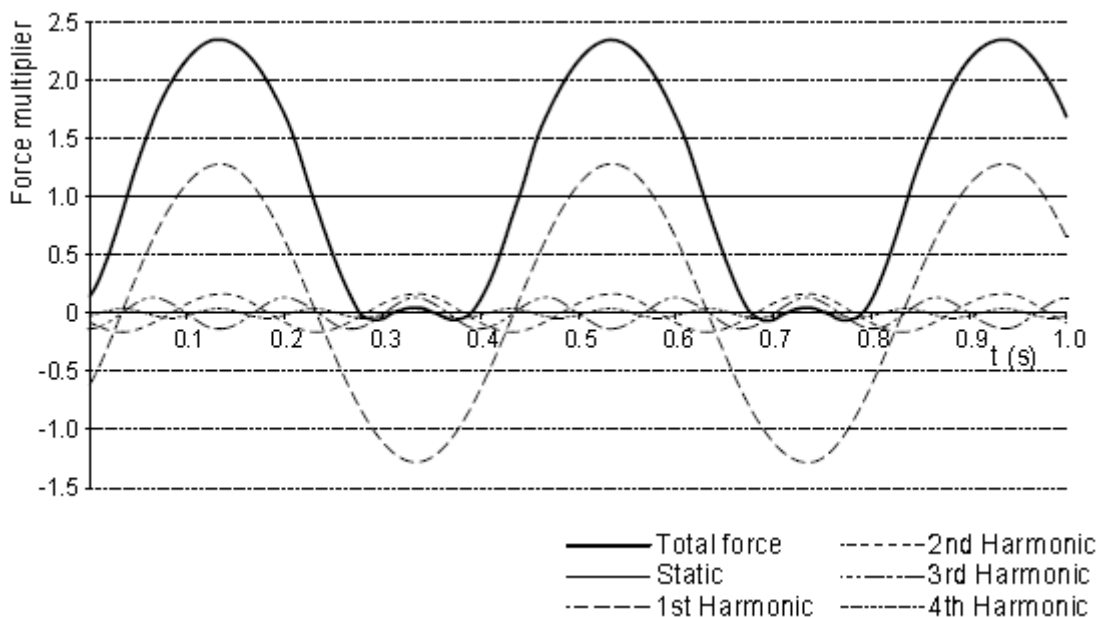


Figura 14 – Série de Fourier para aeróbica de baixo impacto

Fonte: SMITH; HICKS; DEVINE, 2009, p. 9.

Conforme demonstrado na Figura 14, de acordo com Smith, Hicks e Devine (2009), a amplitude de cada harmônico subsequente é menor, mostrando que a maior parte da energia vai para os primeiros harmônicos. Entretanto, a função resultante não segue exatamente a forma de onda semi-senoidal, uma vez que a parcela deve cair, e ficar em, zero entre picos, mostrando que, embora pequena, a energia também existe nas componentes harmônicas mais elevadas.

Com relação à força impulsiva, de acordo com Smith, Hicks e Devine (2009), em um piso de alta frequência (geralmente definido como tendo uma frequência fundamental maior do que o quarto harmônico de andar) a resposta de um passo irá desaparecer antes do próximo, e assim a função das forças parecerá ser uma série de eventos separados em vez de uma função contínua. Essas forças podem ser modeladas usando impulsos. O modelo matemático de um

impulso unitário é força sobre um tempo infinitesimal, com o múltiplo da força e do tempo igual a 1. Isso não é fisicamente possível, mas os impulsos são uma ferramenta útil em análise de vibração.

2.2.4 Amortecimento

De acordo com Smith, Hicks e Devine (2009), o amortecimento é um termo comum para a remoção de energia a partir de um sistema, seja por meio da dispersão ou dissipação (histerese). O amortecimento gera a diminuição da vibração de uma estrutura levando-a ao repouso. Em estruturas, é considerado o amortecimento de atrito nas ligações e no mobiliário de um cômodo, ou seja, o conteúdo desse cômodo removerá a energia de vibração do piso.

Smith, Hicks e Devine (2009) afirmam que o fato de tais fatores variarem entre edifícios e entre partes de edifícios, torna-se indispensável o projeto com base em valores. Tais valores de amortecimento são dados para vários andares e são definidos como a percentagem do amortecimento crítico. O amortecimento crítico diz respeito à quantidade de amortecimento indispensável para voltar o sistema para a sua posição de equilíbrio sem nenhuma oscilação num tempo mínimo.

Sommer (2002) afirma que as estruturas modernas derivam objetivando maior economia no custo da construção. Os novos projetos fundamentam-se em metodologias construtivas, que proporcionem curto prazo de desempenho, baixo consumo de materiais e maior aproveitamento da área construída. Tal percepção estrutural, entretanto, ocasionou em na redução da frequência natural das estruturas que tem se aproximado da frequência de cargas dinâmicas habituais, bem como atividades aeróbicas, motores rotativos, movimento de público etc.

Diante disso, conforme Sommer (2002), com a estrutura trabalhando próximo à ressonância, podem incidir problemas como a redução da sua vida útil, fadiga do material, corrosão e outros.

Quanto ao conforto dos usuários, próximo da ressonância os deslocamentos e acelerações se intensificam, podendo ultrapassar os limites determinados por norma.

O amortecimento representa um fator de grande importância no controle de vibrações estruturais indesejáveis. O amortecimento que ocorre em uma estrutura pode ser considerado como sendo um amortecimento inerente à própria estrutura, ou como sendo um amortecimento adicionado à estrutura através de amortecedores, por exemplo (BEARDS, 1996 *apud* SOMMER, 2002, p. 42).

Sommer (2002) cita sobre o amortecimento viscoso equivalente e o amortecimento de Rayleigh. Quanto ao amortecimento viscoso equivalente, este está presente em todo tipo de sistema oscilatório. Pode se caracterizar como o prejuízo de energia do sistema, procedendo em um declínio na amplitude de vibração na ocorrência de uma vibração livre. O amortecimento viscoso linear decorre de um simples modelo matemático, em que a força é inteiramente adequada à velocidade da partícula no fluido. Entretanto, se o amortecimento do sistema é mais complexo que o amortecimento viscoso linear, é presumível incidir na simplicidade do modelo viscoso inserindo-se a ideia de um amortecimento viscoso equivalente.

Conforme representado na Figura 15, de acordo com Sommer (2002), age sobre o corpo duas forças, sendo que uma força é devido a uma mola elástica, f_S , a qual está relacionada com a energia potencial do sistema, e uma força devido a um amortecedor, f_D , relacionada com a energia de dissipação. O trabalho efetivado por estas forças é WS e WD , concomitantemente, como segue (CRAIG *et al.*, 1981 *apud* SOMMER, 2002).

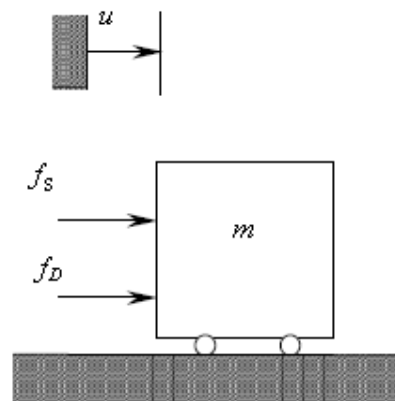


Figura 15 - Forças elástica e de amortecimento atuando sobre o corpo.
Fonte: SOMMER, 2002, p. 43.

Quanto ao amortecimento de Rayleigh, de acordo com Sommer (2002), este é empregado para se ponderar sobre o amortecimento de uma estrutura com n graus de liberdade, onde se obtém a matriz de amortecimento, C , por meio da seguinte formulação:

$$C = \alpha M + \beta K$$

“Esta matriz assim definida é chamada de matriz proporcional, uma vez que a mesma se reduz a uma matriz diagonal em uma transformação modal” (CLOUGH; PENZIEN, 1975 *apud* SOMMER, 2002, p. 45). Por meio de um manejo algébrico na equação supra se alcança a seguinte expressão:

$$\zeta_i = \frac{\alpha}{2\Omega_i} + \frac{\beta\Omega_i}{2}$$

Em que ζ_i é o fator de amortecimento relacionado a cada modo de vibração Ω_i .

Sommer (2002) ressalta que em muitos problemas práticos, o fator de amortecimento de massa α pode ser ignorado. Com isso, pode-se calcular β conhecendo-se os valores de ζ e Ω . “Para especificar os dois fatores α e β para um dado ζ , é comum assumir que para determinada faixa de frequência, a soma dos termos α e β seja constante” (ANSYS, 1996 *apud* SOMMER, 2002, p. 45). Assim, dado o valor de ζ e a faixa de frequências a ser avaliada, pode-se resolver o sistema de equações e estabelecer os valores de α e β .

2.2.5 Aceleração

Segundo Murray, Allen e Ungar (2003), ao se mencionar sobre a relação de aceleração, afirmam que a mesma se dá com a aceleração de um sistema dividido pela aceleração da gravidade. Geralmente utiliza-se a aceleração de pico do sistema.

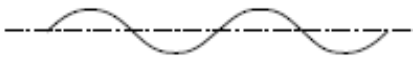
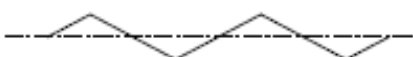
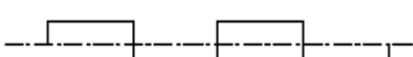
Murray, Allen e Ungar (2003) afirmam que os limites de aceleração recomendados pela Organização Internacional de Normas (*International Standard* - ISO 26312, 1989), é ajustado para a ocupação prevista e que a referida norma sugere limites em relação à aceleração rms como um múltiplo da curva da linha de base mostrada na Figura 12. Os multiplicadores para o critério proposto, que é expressa em termos de aceleração de pico, são 10 para escritórios, 30 para shoppings e passarelas internas e 100 para passarelas ao ar livre. Para além destes objetivos, os limites podem ser 0,8 e 1,5 vezes os valores recomendados, dependendo da duração da vibração e a frequência dos eventos.

Conforme Smith, Hicks e Devine (2009), a aceleração é o segundo diferencial de deslocamento em relação ao tempo. Dessa forma, a equação pode ser diferenciada duas vezes para dar a aceleração de uma viga simplesmente apoiada em função de posição e tempo como segue:

$$a(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} -4\pi^2 f_n^2 u_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

Smith, Hicks e Devine (2009) explicam sobre a aceleração da média quadrática (rms) e afirmam que existem várias maneiras de apresentar a aceleração de um sistema. A aceleração de raiz-média-quadrado, ou rms, é vastamente utilizada. Para explicar isso, a aceleração rms para uma onda senoidal, onda triangular e uma onda quadrada são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Aceleração da média quadrática para várias formas de onda.

Waveform		a_{peak}	a_{rms}
 Sine		1	$1/\sqrt{2}$
 Triangular		1	$1/\sqrt{3}$
 Square		1	1

Fonte: SMITH; HICKS; DEVINE (2009, p. 10).

Segundo Smith, Hicks e Devine (2009), a aceleração rms é calculada da seguinte forma:

$$a_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a(t)^2 dt}$$

Onde:

T = período considerado

$a(t)$ = a função de aceleração

t = tempo.

T deve ser adotado como um período de tempo que irá compreender pelo menos um ciclo completo da aceleração. Para resposta conforme à caminhada (que possui uma frequência média de 2 Hz), a ISO 2631-1: 1997 sugere que seja empregado um período de $T = 1s$, e refere-se a isto como o valor máximo de vibração transitória (MTVV) (SMITH; HICKS; DEVINE, 2009).

De acordo com Sommer (2002), é aceitável controlar a aceleração conforme à ressonância com o aumento dos níveis de amortecimento ou da massa da estrutura. Tal controle é mais eficaz quando a amplitude da aceleração é pequena, como é para o caminhar.

Na Tabela 3, Sommer (2002) apresenta parâmetros dinâmicos sugeridos os quais apresentam vários procedimentos de cálculo para análise dinâmica de pisos com diferentes tipos de ocupação, tais como caminhar e atividades rítmicas.

Tabela 3 - Parâmetros dinâmicos recomendados

Valores de parâmetros dinâmicos recomendados e limites de a_0/g			
	Força Constante P_0	Fator de Amortecimento ζ	Aceleração limite $a_0/g \times 100\%$
Escritórios, residências e igrejas	0,29kN	*0,02 – 0,05	0,5%
Shopping	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 elementos não estruturais, como shopping e igrejas
 0,03 para pisos com elementos não estruturais e divisórias, como em escritórios
 0,05 para pisos com paredes ou divisórias entre pisos

Fonte: SOMMER, 2002, p. 69.

2.2.6 Frequência natural de pavimentos mistos

Segundo Murray, Allen e Ungar (2003), a frequência natural do aço moldado possui com os parâmetros mais importantes para a aceitação da vibração, a concepção e a avaliação de pavimentos com vigas em malha.

Conforme Murray, Allen e Ungar (2003), os pisos de aço moldado normalmente se tratam de sistemas de duas direções que podem apresentar diversas formas de vibrações espaçadas. A frequência natural, de uma maneira crítica, pode ser difícil de avaliar. A análise modal da estrutura de piso pode ser utilizada para estabelecer as propriedades modais críticas, mas há fatores que são difíceis de incorporar no modelo estrutural. O piso inacabado com espaçamento uniforme entre as vigas pode ter uma variedade de configurações padrão modais que se estendem por todo o pavimento. Divisórias e outros componentes não estruturais tendem à restringir movimentos dinâmicos significativos em área que o chão vibra como um único painel em duas direções. Os procedimentos simplificados para a determinação da primeira frequência natural de vibração vertical é recomendado.

O pavimento consiste em uma laje de concreto (ou plataforma) suportada por vigas de aço. A análise da frequência considerada natural é estimada levando-se em consideração inicialmente um sistema de viga isolada e um sistema de viga mista separadamente, em seguida, combinadas. Alternativamente, a frequência natural pode ser estimada por meio da análise de elementos finitos (MURRAY; ALLEN; UNGAR, 2003).

Murray, Allen e Ungar (2003) afirmam que a frequência natural de uma viga conectada em colunas é aumentada devido ao grau de engastamento, o que é de suma importância em relação a altos edifícios com grandes colunas.

2.3 ACEITABILIDADE DAS VIBRAÇÕES

2.3.1 Considerações

Ao mencionar sobre as considerações, Smith, Hicks e Devine (2009) afirmam que existem os problemas com desconforto e os aspectos de força.

De acordo com Smith, Hicks e Devine (2009), a vibração de andares, em geral, é avaliada como sendo um problema de aceitação, especialmente pertinentes ao desconforto, apesar de que a vibração também pode ocasionar danos menores ou rachaduras e pode afetar equipamentos sensíveis. Entretanto, o desconforto não pode ser quantificado diretamente ou dimensionado. Como a percepção e o desconforto são diferentes entre os seres humanos, sem limites exatos, não se pode garantir que o piso não originará comentários adversos de ocupantes em todo tempo de vida da sua utilização. Ao invés de soluções onerosas, os padrões atuais de projeto visam orientar os projetistas em direção às soluções que possam diminuir a probabilidade de desconforto. Os padrões atuais descrevem o desconforto humano em termos da percepção da aceleração do piso. A adequação do piso, no que diz respeito à vibração, é avaliada por meio da comparação da aceleração prognosticada com um conjunto de critérios de aceitação definidos. O desconforto pessoal ocorre em nível diferente para uma pessoa sentada em uma mesa de escritório, para alguém operar uma máquina ou para um espectador assistindo esporte, o que é reconhecido nas normas por meio do emprego de coeficientes multiplicadores em critérios de aceitação para diferentes situações.

No que diz respeito aos aspectos de força, Smith, Hicks e Devine (2009) afirmam que a atividade humana em edifícios, sendo de natureza temporária, gera deformações e tensões em elementos estruturais. Geralmente, o emprego das forças de indução de vibrações também podem ocasionar fadigas, em princípio, nos elementos de suporte de carga. Nestas ocasiões, as cargas dinâmicas podem exceder à carga estática, devendo este fator ser considerado no projeto.

2.3.2 Percepção humana

De acordo com Murray, Allen e Ungar (2003), a resposta humana ao movimento do chão é um fenômeno muito complexo envolvendo a intensidade do movimento, o ambiente que o rodeia e a sensibilidade. O movimento contínuo, ou seja, o estado estacionário, pode ser mais irritante do que o movimento causado por um impacto pouco frequente (transitório). O limite de percepção do movimento do piso em um local de trabalho ocupado pode ser maior do que em um apartamento tranquilo.

Murray, Allen e Ungar (2003) ressaltam que a reação de pessoas que sentem a vibração depende muito sobre o que estas estejam fazendo. Pessoas em escritórios ou residências não

gostam de vibrações claramente perceptíveis (acelerações com picos de cerca de 0,5 % da aceleração da gravidade), enquanto que as pessoas que tomam parte em uma atividade aceitará vibrações aproximadamente 10 vezes maior (5,0 % da gravidade). Pessoas jantando ao lado de um salão de dança, de uma academia, de um ginásio de aeróbica, ou de pé em um shopping, vão aceitar algo cerca de 1,5 % da gravidade. As pessoas, em geral, aceitam acelerações de vibração mais elevadas como mostrado na Figura 16.

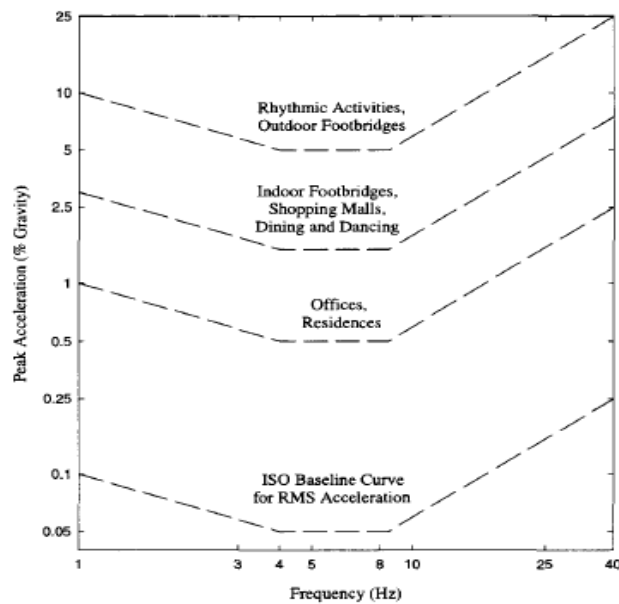


Figura 16 – Picos de aceleração recomendados para conforto das vibrações devido às atividades humanas

Fonte: MURRAY; ALLEN; UNGAR (2003, p. 7).

De acordo com Smith, Hicks e Devine (2009), a percepção humana em relação às vibrações ocorre através de vibrações contínuas e suas respectivas frequências.

Segundo Smith, Hicks e Devine (2009), existem diversas formas em que a intensidade da resposta de vibração pode ser medida. No caso de uma grande amplitude e de baixa frequência, pode ser presumível ressaltar o deslocamento entre o máximo movimento num sentido e o pico de movimento no sentido oposto, ou seja, o deslocamento de pico a pico. Tecnicamente esta distância pode ser difícil de medir e, para o movimento de alta frequência, a vibração pode ser grave, mesmo quando o deslocamento é muito pequeno para ser detectado pelo olho. A velocidade, que está inteiramente relacionada com a energia envolvida no movimento estrutural, ainda pode ser empregada para determinar a amplitude da vibração. Contudo, a instrumentação para medir a aceleração é normalmente mais apropriada, tendo ainda como consequência, muitos padrões modernos os quais descrevem o rigor da exposição

humana à vibração em relação à aceleração em vez de velocidade ou deslocamento. Uma aceleração rms é usada em vez de aceleração máxima, porque dá uma melhor indicação da vibração por mais tempo, e os picos acentuados em uma pequena porção são menos significativos.

Smith, Hicks e Devine (2009) afirmam que o valor base da aceleração que pode ser percebido depende da direção da incidência para o corpo humano, e para isso o sistema de coordenadas básicas, conforme demonstrado na Figura 17 é usado (o eixo z corresponde à direção da coluna vertebral humana). O valor base é maior para a vibração no eixo z do que para o x ou o y. (Isto é, a vibração do eixo x ou y é mais facilmente percebida).

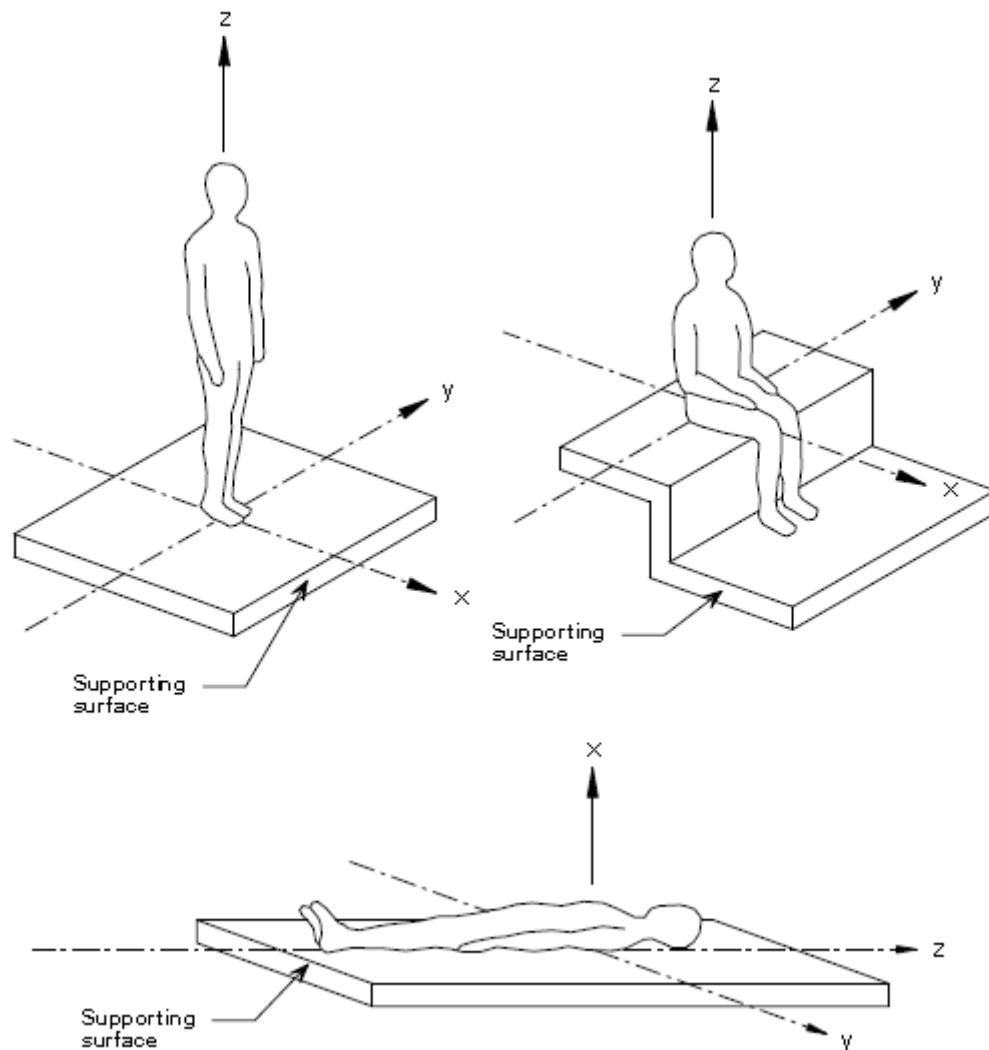


Figura 17 – Instruções para Vibração definidas na ISO 2631, BS 6472 e BS 6841.
Fonte: Smith; Hicks; Devine, 2009, p. 26.

Segundo Smith, Hicks e Devine (2009), a percepção da vibração também depende da frequência. Isso ocorre devido à sensibilidade do corpo humano a uma determinada amplitude de frequência da vibração. Um exemplo é que, embora o volume (amplitude) de um apito normal e de um apito de cachorro ser o mesmo, um ser humano não será capaz de perceber o segundo (neste caso ouvir) porque a alta frequência de saída deste é tal que o ouvido não é sensível a ele. A vibração do corpo inteiro é semelhante, pois possui um intervalo variável de sensibilidade máxima. A variação da sensibilidade pode ser levada em consideração atenuando a resposta calculada (para frequências onde a percepção é menos sensível) ou melhorando o valor base. O grau em que a aceleração é atenuada ou reforçada é referido como "ponderação de frequência".

Conforme Smith, Hicks e Devine (2009), os valores de ponderação de frequência são dados em BS 6841 e ISO 2631. São dadas várias curvas de ponderação, dependendo da direção de vibração e a atividade, sendo as três mais comuns mostradas graficamente nas Figuras 18 e 19, e são versões simplificadas (assintóticas) das curvas na BS 6841. A Tabela 4 fornece orientação sobre quando cada curva se aplica.

Tabela 4 - Fatores de ponderação apropriados para projetos de piso

Room Type	Axis of vibration	Category	BS 6841 weighting curve
Critical working areas (e.g. hospital operating theatres, precision laboratories)	z-axis	Vision/Hand control	W_g
	x-, y-axis	Perception	W_d
Residential, offices, wards, general laboratories, consulting rooms	z-axis	Discomfort	W_b
	x-, y-axis	Discomfort	W_d
Workshop and circulation spaces	z-axis	Discomfort	W_b
	x-, y-axis	Discomfort	W_d

Fonte: SMITH; HICKS; DEVINE, 2009, p. 27

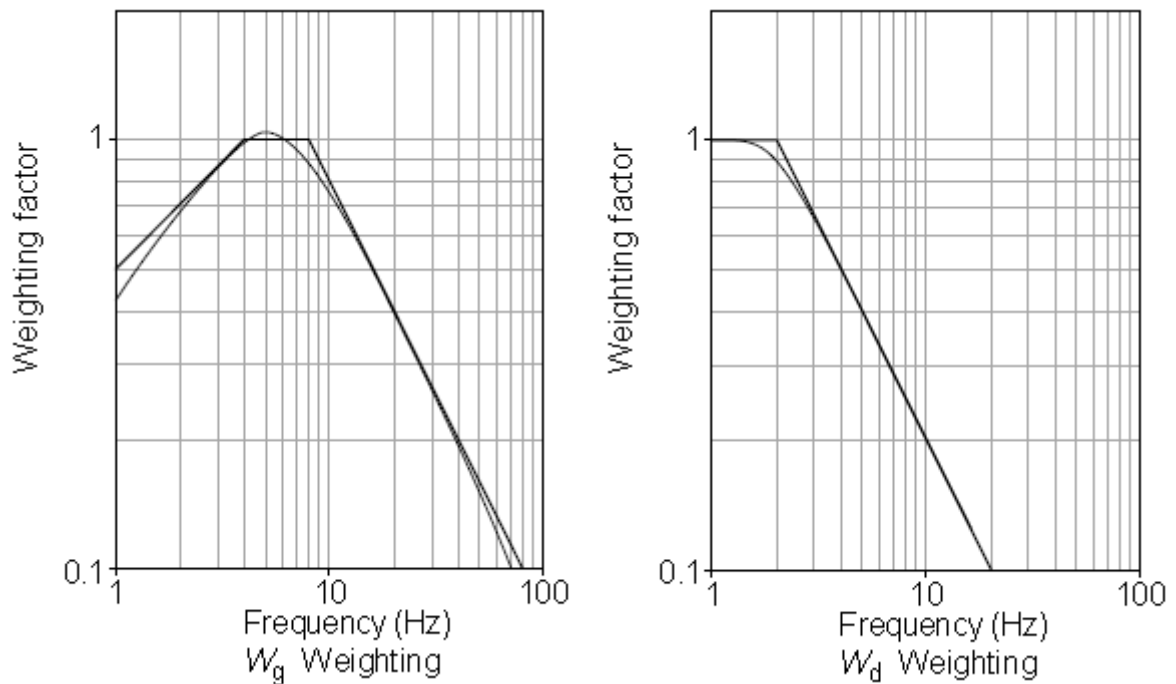


Figura 18 - Curvas de ponderação de frequência W_g e W_d (BS 6841).
 Fonte: SMITH; HICKS; DEVINE, 2009, p. 27.

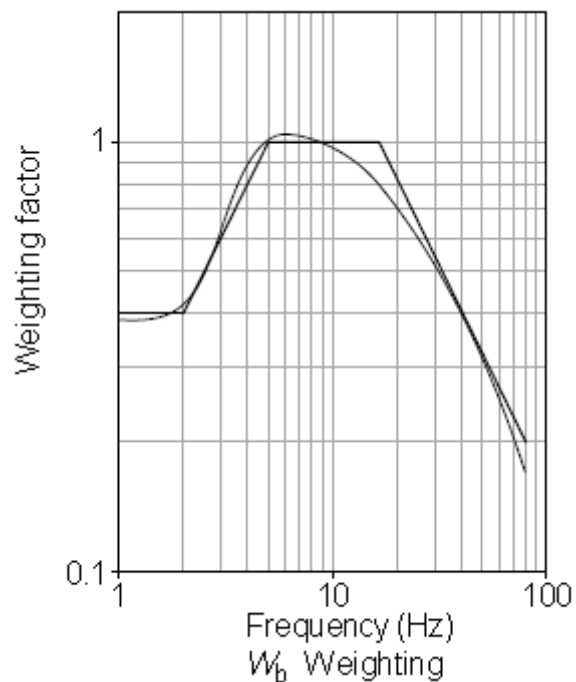


Figura 19 - Curva de ponderação de frequência W_b (BS 6841).
 Fonte: SMITH; HICKS; DEVINE, 2009, p. 28.

Para ilustrar a utilização das curvas, por vibração do eixo z usando curva para W_b desconforto, uma onda senoidal de 8 Hz tem a mesma sensação como uma onda senoidal em 2,5 Hz ou 32 Hz com o dobro da amplitude.

As curvas apresentadas nas Figuras 18 e 19 podem também ser expressas pelas seguintes equações:

z-axis vibrations W_g weighting

$$W = 0.5\sqrt{f} \quad \text{for } 1 \text{ Hz} < f < 4 \text{ Hz}$$

$$W = 1.0 \quad \text{for } 4 \text{ Hz} \leq f \leq 8 \text{ Hz}$$

$$W = \frac{8}{f} \quad \text{for } f > 8 \text{ Hz}$$

z-axis vibrations W_b weighting

$$W = 0.4 \quad \text{for } 1 \text{ Hz} < f < 2 \text{ Hz}$$

$$W = \frac{f}{5} \quad \text{for } 2 \text{ Hz} \leq f < 5 \text{ Hz}$$

$$W = 1.0 \quad \text{for } 5 \text{ Hz} \leq f \leq 16 \text{ Hz}$$

$$W = \frac{16}{f} \quad \text{for } f > 16 \text{ Hz}$$

x- and y-axis vibrations W_d weighting

$$W = 1.0 \quad \text{for } 1 \text{ Hz} < f < 2 \text{ Hz}$$

$$W = \frac{2}{f} \quad \text{for } f \geq 2 \text{ Hz}$$

No que diz respeito à frequência, segundo Smith, Hicks e Devine (2009), na maior parte dos casos, o objetivo da análise de vibrações é a redução ou eliminação do desconforto, mas em situações específicas, tais como salas de operação, o nível de vibração terá de ser tal que não pode ser compreendido e não afetar a firmeza de mão ou visão. Para vibrações intermitentes, uma medida cumulativa da resposta foi encontrada sendo mais confiável na determinação perceptiva dos níveis de tolerância. Há parâmetros normativos que fornecem orientação sobre vibrações intermitentes através de valores de dose de vibração (VDVs), que descrevem os níveis de percepção em vibrações ocasionais de curta duração.

Conforme Sommer (2002), as cargas dinâmicas induzidas pelo homem causam vibrações nas estruturas ou componentes estruturais as quais estão sujeitas, sobretudo, da relação entre a frequência da excitação predominante e as frequências naturais da estrutura. Para frequências

com valores próximos, a amplitude de vibração se eleva, ficando ajustada somente pela quantidade de amortecimento presente no sistema.

O aumento da amplitude do movimento poderá causar tanto o desconforto do usuário ao utilizar a estrutura, quanto produzir danos à mesma, já que os esforços de cada um dos elementos estruturais estão ligados com as deformações presentes no sistema. Desse modo, a fim de evitar efeitos indesejáveis ocasionados pelos movimentos com grandes amplitudes, a frequência natural do sistema precisa ser conhecida e cuidadosamente analisada (SOMMER, 2002, p. 71).

“Pessoas em escritórios ou residências percebem vibrações em torno de 0,5% da aceleração da gravidade (g), enquanto pessoas fazendo alguma atividade física irão aceitar vibrações de até 5% g ou mais” (SOMMER, 2002, p. 71).

A NBC (*National Building Code of Canada*) citada por Murray *et al.* (1997 *apud* SOMMER, 2002, p. 71) sugere um conjunto de acelerações limites para cada ocupação, conforme apresentado na Tabela 5:

Tabela 5 - Limites de aceleração recomendados para ocupações

Tipo de ambiente afetado pela vibração	Aceleração limite, % de g
Escritórios e residências	0,4 – 0,7
Restaurantes e salas de musculação	1,5 – 2,5
Atividades rítmicas somente	4,0 – 7,0

Fonte: SOMMER, 2002, p. 71.

De acordo com Sommer (2002), normalmente o acontecimento de vibração em pisos é considerado desagradável.

Durante anos, estudos têm sido feitos para avaliar os limites de conforto humano a vibrações de pisos. Diversas normas específicas sobre análise dinâmica, como a escala da CSA (*Canadian Standard Association*), a norma DIN 4150 Parte 2 (*German Institute for Standardization*), ANSI (*American National Standards Institute*), ISO (*International Organization for Standardization*), NBC (*National Building Code of Canada*) e BSI (*British Standards Institution*) [...], possuem recomendações sobre os limites máximos de aceleração de pisos para o conforto humano e também recomendações sobre coeficientes de participação dos harmônicos de excitação para simulação de carregamentos provenientes de atividades humanas (SOMMER, 2002, p. 72).

Na Figura 20, conforme Sommer (2002), são demonstradas algumas das escalas usadas para a determinação de limites máximos de aceleração em pisos.

Tolaymat (1988 *apud* SOMMER, 2002) estimou algumas técnicas de análise dinâmica, dentre elas uma das escalas mais empregadas para estabelecer os níveis de aceleração em pisos publicada por Reiher e Meister, no ano de 1946, conforme apresentado na Figura 20(b). Foi observada nesta escala que Reiher e Meister não levaram em consideração a influência do amortecimento sobre a percepção humana à vibrações. Lenzen (1966 *apud* SOMMER, 2002), com o objetivo de contrabalançar essa falta, modificou a escala de Reiher e Meister multiplicando as ordenadas por um fator 10. Devido a esta alteração, percebeu-se a ocorrência de bons resultados em pisos com fatores de amortecimento de até 0,05, conforme apresentado na Figura 20(b).

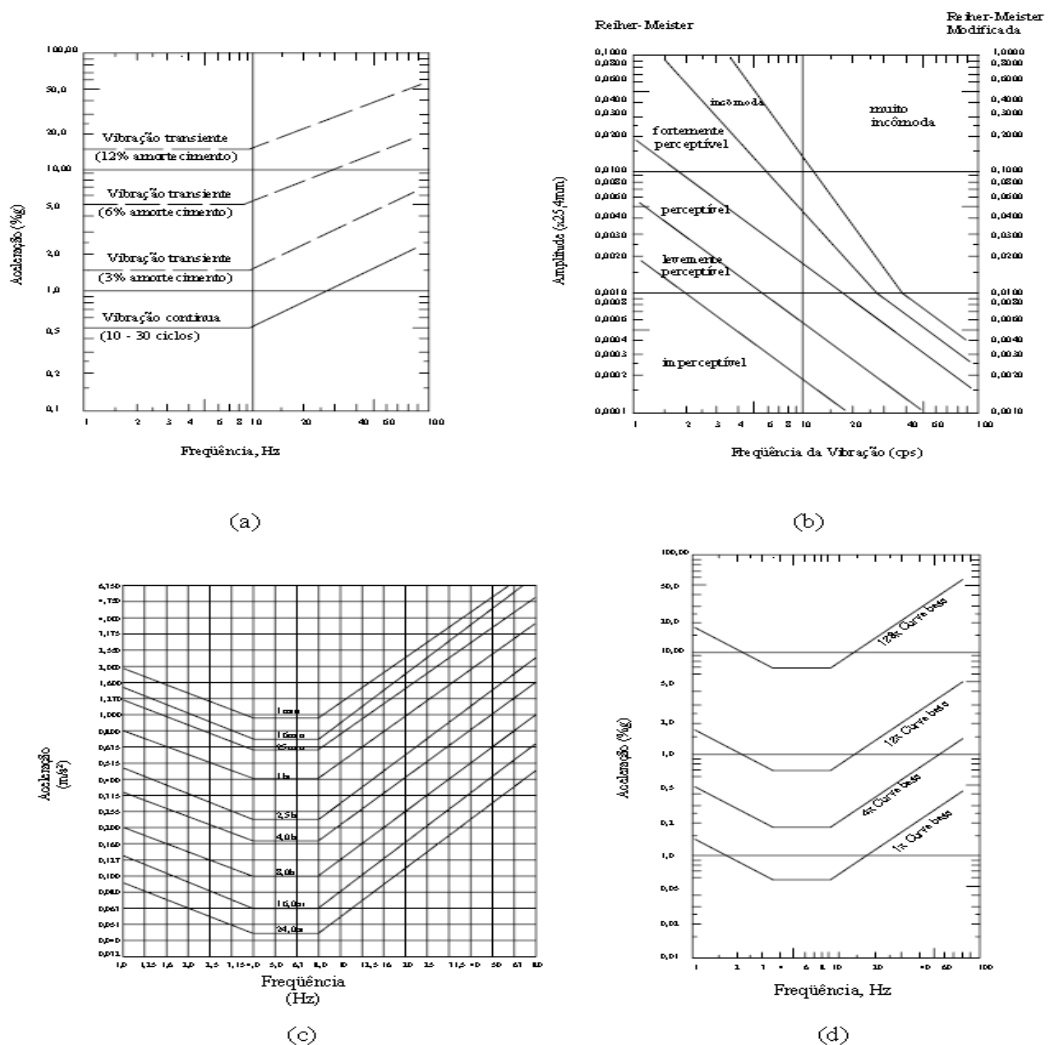


Figura 20 – Critérios de análise de vibrações: (a) CSA Standard, (b) Escalas Reiher-Meister e Reiher-Meister modificada, (c) Escala ISO (1980), (d) Escala ISO (1989)
 Fonte: SOMMER, 2002, p. 73.

2.3.3 Critérios de aceitação

Murray, Allen e Ungar (2003) relatam que no decorrer dos anos, muitos critérios de aceitação foram descritos para o conforto humano. Dentre os critérios atuais, podem-se citar a excitação de caminhada e a excitação rítmica.

A excitação de caminhada, segundo Murray, Allen e Ungar (2003), baseia-se em um critério de dinâmica de sistemas de pisos suportados por vigas ou vigas de aço para forças de marcha, o qual pode ser utilizado para avaliar sistemas estruturais, escritórios de apoio, shoppings, passarelas e similares. Tal critério foi desenvolvido utilizando-se os limites de aceleração recomendados pela Organização Internacional de Normas (*International Standard ISO 26312*, 1989), ajustado para a ocupação prevista.

Com relação à excitação rítmica, de acordo com Murray, Allen e Ungar (2003), trata-se de critérios criados recentemente e que se baseiam na resposta dinâmica das estruturas às forças de exercício rítmico distribuídas sobre todo ou parte do piso. Os critérios podem ser utilizados para sistemas estruturais de apoio à aeróbica, dança, audiência, participação e eventos similares.

Ao citar sobre os critérios de aceitação, Smith, Hicks e Devine (2009) descrevem sobre os limites de aceitação que incluem as vibrações contínuas, vibrações intermitentes e atividades rítmicas além de estádios.

Com relação ao limite de aceitação, de acordo com Smith, Hicks e Devine (2009), boa parte da investigação tem constituído em medir o efeito humano como resposta à vibração, que está estabelecida por meio de normas internacionais sobre a exposição humana às vibrações. Algumas abrangem muitos ambientes de vibração em edifícios e, para alcançar ampla cobertura, os limites de vibração aceitáveis de amplitude são expressos em relação a uma curva de base ponderada em frequência e uma série de fatores de multiplicação.

Conforme Smith, Hicks e Devine (2009), as vibrações contínuas são infrequentes e são representativas nos piores cenários prováveis de carga para uma determinada função de força, significando que é fornecido um cenário de criação conservador, o qual pode ser útil na realização de rápidas estimativas da resposta do pavimento.

Quanto às vibrações intermitentes, segundo Smith, Hicks e Devine (2009), a norma britânica BS 6472 fornece orientações sobre o cálculo dos valores de dose de vibração estimadas (VDVs) cujo objetivo é estabelecer o nível de aceitação de vibrações intermitentes e os limites para resposta aceitável. Porém, esta orientação adquire uma resposta meramente sinusoidal para avaliar VDVs e, assim, é imprópria para atividades de caminhadas, embora os limites ainda se apliquem.

No que diz respeito às atividades rítmicas e estádios, conforme Smith, Hicks e Devine (2009), as cargas dinâmicas de multidão são motivadas pelo movimento de pessoas. As maiores cargas são causadas devido aos movimentos rítmicos sincronizados que surgem especialmente de pessoas que estão dançando ou pulando, comumente em resposta à música. Uma multidão de pessoas pulando ritmicamente pode provocar grandes cargas e isso pode ser preocupante tanto para as avaliações de segurança quanto para a manutenção. Não existe critério de aceitação consensual para estruturas deste tipo.

2.4 PROJETOS

2.4.1 Projeto para excitação de caminhada

Segundo Murray, Allen e Ungar (2003), o critério recomendado para o projeto de excitação de caminhada baseia-se na dinâmica das respostas das vigas de aço e das lajes para as forças de caminhada. O critério pode ser utilizado para avaliar concreto/aço moldado, sistemas estruturais de apoio, passarelas, residências, escritórios e shopping centers.

Murray, Allen e Ungar (2003) afirmam que o critério estabelece que o sistema de piso é satisfatório se a aceleração de pico, devido à excitação da fração da aceleração da gravidade, g , determinada a partir de não exceder o limite de aceleração, para a ocupação.

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_o \exp(-0.35f_n)}{\beta W}$$

Onde:

P_0 = força constante representando a excitação;

f_n = frequência natural de um elemento estrutural, conforme aplicável;

β = índice de amortecimento;

W = peso próprio do elemento estrutural, conforme aplicável;

Valores de P_0 e β , bem como os limites de aceleração a_0/g para ocupações gerais são dados na tabela 6:

Tabela 6 – Valores recomendados de parâmetros P_0 e β e limites para a_0/g

	Constant Force P_0	Damping Ratio β	Acceleration Limit $a_0/g \times 100\%$
Offices, Residences, Churches	0.29 kN (65 lb)	0.02–0.05*	0.5%
Shopping Malls	0.29 kN (65 lb)	0.02	1.5%
Footbridges—Indoor	0.41 kN (92 lb)	0.01	1.5%
Footbridges—Outdoor	0.41 kN (92 lb)	0.01	5.0%
* 0.02 for floors with few non-structural components (ceilings, ducts, partitions, etc.) as can occur in open work areas and churches, 0.03 for floors with non-structural components and furnishings, but with only small demountable partitions, typical of many modular office areas, 0.05 for full height partitions between floors.			

Fonte: MURRAY; ALLEN; UNGAR, 2003, p. 18

De acordo com o critério, conforme Murray, Allen e Ungar (2003), o sistema de piso é satisfatório se a aceleração máxima, devido à excitação de caminhada for como uma fração da aceleração da gravidade e não exceda o limite de aceleração para a ocupação.

Segundo Murray, Allen e Ungar (2003) o amortecimento que está associado aos sistemas de piso, depende principalmente de componentes não estruturais, mobiliário e ocupantes.

Segundo Murray, Allen e Ungar (2003), projetistas de passarelas são aconselhados a prestar especial atenção para o local da laje de concreto em relação ao altura das vigas. A laje de concreto pode ser localizada entre as vigas (devido ao espaço livre). Em seguida, a passarela irá vibrar com uma frequência muito menor e com uma maior amplitude devido ao momento de inércia reduzido. A separação da viga da placa de concreto resulta em ações compostas parciais e o momento de inércia das vigas deverá, portanto, ser excluído.

Arestas ou bordas de piso interior, como nas áreas de mezanino, requerem consideração especial por causa da massa efetiva reduzida devido ao bordo livre. Onde o elemento da borda é uma viga, uma solução prática é enrijecê-la adicionando outra viga.

Ocasionalmente, de acordo com Murray, Allen e Ungar (2003), um sistema de piso será julgado particularmente devido à transmissão de vibração transversal ao apoiar nas vigas. Nestas situações, quando o piso é impactado em um local, há uma percepção de que uma "onda" move-se a partir do ponto de impacto numa direção transversal às vigas de apoio. O critério recomendado é não abordar este fenômeno, mas deve haver uma pequena mudança na estrutura do sistema, o qual vai eliminar o problema. Se o espaçamento entre vigas ou vigotas é alterado em torno de 50%, por exemplo, a cada três vãos, a "onda" é interrompida naquele local e o movimento do piso é muito menos irritante.

2.4.2 Projeto para excitação rítmica

Segundo Murray, Allen e Ungar (2003), com relação ao critério recomendado para o projeto de excitação rítmica, a necessidade desse critério tem surgido a partir do aumento da incidência de problemas de vibração devido às atividades rítmicas. Essas vibrações foram reconhecidas pela primeira vez em um comentário no ano de 1970 pelo National Building Code of Canada (NBC), em que se afirmou que a ressonância devido às atividades humanas pode ser um problema se a frequência natural do piso é inferior a 5 Hz. Para a NBC, no ano de 1975, este valor foi aumentado para 10 Hz devido a atividades repetitivas, como a dança, porque é possível obter alguma ressonância quando a batida é em cada segundo no ciclo da vibração do chão. O critério de projeto para a excitação rítmica com carregamento dinâmico e de resposta foi introduzido pela primeira vez em 1985, segundo informações da NBC e foi melhorada em 1990, quando foi reconhecida a importância sensível das ocupações (Tabela 7). O critério de concepção neste período passou a utilizar limites de aceleração cuja aplicação deste critério não resulta em problemas. Os parâmetros estruturais mais importantes devem ser utilizados na prevenção de problemas de vibração devido às atividades de frequência natural.

Murray, Allen e Ungar (2003) afirmam que o seguinte critério de design para a excitação rítmica baseia-se na função de carregamento dinâmico, atividades rítmicas e a resposta dinâmica do piso estrutura:

$$f_n \geq (f_n)_{req'd} = f \sqrt{1 + \frac{k}{a_o/g} \frac{\alpha_i w_p}{w_f}}$$

Onde:

f_n = Frequência natural fundamental do sistema

$(f_n)_{req'd}$ = Frequência natural mínima necessária para vibrações inaceitáveis em cada frequência forçada f

f = frequência forçada = $i f_{step}$ (ver Tabela 8)

i = Número de harmônicos = 1, 2 ou 3 (ver Tabela 8)

f_{step} = Frequência de passo

k = constante (1,3 para dançar, 1,7 para concerto animado ou evento esportivo, 2,0 para aeróbica)

a_i = Coeficiente dinâmico

a_o/g = limite de aceleração devido à gravidade

w_p = Peso efetivo por unidade de área de participantes distribuídos sobre o painel de chão

w_f = Peso total efetivo por unidade de área distribuída sobre o painel do chão (peso dos participantes mais peso do sistema de piso)

Tabela 7 - Limites de aceleração recomendados para vibrações devido a atividades rítmicas
(NBC 1990)

Occupancies Affected by the Vibration	Acceleration Limit, % gravity
Office or residential	0.4-0.7
Dining or weightlifting	1.5-2.5
Rhythmic activity only	4-7

Fonte: MURRAY; ALLEN; UNGAR, 2003, p. 38.

Tabela 8 - Carregamento estimado durante eventos rítmicos

Activity	Forcing Frequency f , Hz	Weight of Participants* w_p		Dynamic Coefficient α_i	Dynamic Load $\alpha_i w_p$	
		kPa	psf		kPa	psf
Dancing: First Harmonic	1.5–3	0.6	12.5	0.5	0.3	6.2
Lively concert or sports event: First Harmonic	1.5–3	1.5	31.0	0.25	0.4	7.8
Second Harmonic	3–5	1.5	31.0	0.05	0.075	1.6
Jumping exercises: First Harmonic	2–2.75	0.2	4.2	1.5	0.3	6.3
Second Harmonic	4–5.5	0.2	4.2	0.6	0.12	2.5
Third Harmonic	6–8.25	0.2	4.2	0.1	0.020	0.42

* Based on maximum density of participants on the occupied area of the floor for commonly encountered conditions. For special events the density of participants can be greater.

Fonte: MURRAY; ALLEN; UNGAR, 2003, p. 38.

A frequência natural fundamental do piso é muito mais importante em relação à excitação rítmica do que para a excitação de caminhada e, portanto, é necessário maior cuidado para a sua estimativa. Para determinar a frequência natural é fundamental ter em mente que a estrutura se estende até as fundações (MURRAY; ALLEN; UNGAR, 2003).

2.4.3 Projeto para equipamentos sensíveis

Segundo Murray, Allen e Ungar (2003), o critério recomendado para o projeto de pisos que suportam equipamentos sensíveis é fornecer ambientes aceitáveis para o equipamento em questão. Dessa forma, o projetista tem de determinar o máximo permitido de vibrações a que tal equipamento possa estar sujeito, de forma que um caminhar possa ser permitido sem grandes problemas.

De acordo com Murray, Allen e Ungar (2003), em situações em que as especificações do equipamento são totalmente definidas, e os critérios normalmente especificam limites para as vibrações do piso sob o equipamento. Se vários itens do equipamento com diferentes sensibilidades de vibração devem ser apoiados no mesmo andar, a área do piso que se espera para detectar a maioria das vibrações graves, geralmente, deve ser projetada para acomodar o item mais sensível, a menos que os itens mais sensíveis possam ser localizados em áreas de menor vibração e/ou fornecido com sistemas de isolamento de vibração adicionais.

Murray, Allen e Ungar (2003) afirmam que, nos casos em que o equipamento esteja apoiado num dado andar é conhecido apenas em termos gerais no momento em que a estrutura do piso está sendo projetado, o projetista precisa confiar em critérios genéricos. Um conjunto de tais critérios tem sido aplicado amplamente. Estes critérios são expressos em termos de maior velocidade vibracional para que várias classes do equipamento possam ser expostas. Se estes critérios, em termos de velocidade, forem mais convenientes, em geral, é porque o critério para uma dada classe de equipamentos corresponde a um valor constante de velocidade sobre a maior parte da gama de frequências de interesse.

De acordo com Murray, Allen e Ungar (2003), a abordagem recomendada para a obtenção de um piso adequado para apoio de um equipamento sensível é: projetar o piso para uma carga estática um pouco maior do que a carga de concepção; calcular o máximo esperado da velocidade devido às vibrações induzidas por caminhadas; comparar a velocidade máxima para os critérios adequados; e, ajustar, enquadrando conforme necessário no piso para satisfazer o critério sem superdimensionar a estrutura.

2.5 AVALIAÇÕES

2.5.1 Avaliação geral

Smith, Hicks e Devine (2009) afirmam que a orientação ministra uma técnica de análise de resposta que é apropriada para todo o piso, mas adota a utilização de análise de elementos finitos para determinação das frequências naturais, massas modais e modos de vibração do piso em consideração. Tais técnicas são particularmente benéficas para estruturas que são complexas ou possuem requisitos rígidos em relação à vibração.

Smith, Hicks e Devine (2009) ressaltam que o uso de métodos de elementos finitos (FE) é descrito como a mais apropriada técnica que pode ser utilizada para avaliar a resposta do pavimento. A modelagem de elementos finitos é benéfica para constituir uma previsão razoavelmente precisa da natureza do piso ou a estrutura de todo o edifício, e dará uma previsão melhor do que a oferecida por métodos de cálculo manual.

2.5.2 Avaliação simplificada

De acordo com Smith, Hicks e Devine (2009), os métodos simplificados, em geral, somente são aplicáveis às estruturas regulares que têm que ser criadas a partir de grades retilíneas. Para as estruturas irregulares deve ser efetuada uma análise mais complexa com o objetivo de compreender as propriedades dinâmicas e para estabelecer a resposta da vibração do piso.

2.5.3 Problemas de vibração e medidas corretivas

Segundo Murray, Allen e Ungar (2003), muitos problemas de vibração foram avaliados após sua ocorrência, mas o engenheiro estrutural deve estar ciente e deve aconselhar os clientes que uma mudança de uso pode resultar em problemas o que pode ser difícil de resolver depois do fato. Com isso, a determinação da fonte de vibração é importante, no caso de excitação de caminhadas, atividades rítmicas, equipamentos ou fontes externas ao edifício, que transmitem a vibração através do piso.

Murray, Allen e Ungar (2003) afirmam que as medições podem ser utilizadas para avaliar a dinâmica de uma estrutura, assim como para quantificar as vibrações associadas com as atividades humanas. As propriedades dinâmicas da estrutura podem ser determinadas por testes de impacto utilizando a vibração máxima esperada em outras posições, incluindo os apoios, tais como vigas e pilares, assim como outras partes sensíveis do edifício. As abordagens de avaliação possíveis são: testes de desempenho, cálculos e medições de vibração.

Com relação às medidas corretivas para uma fonte de vibração, de acordo com Murray, Allen e Ungar (2003), uma ocupação específica ou equipamentos sensíveis podem ser realocados. Entretanto, é preferível que isso seja feito antes da ocupação do pavimento.

Murray, Allen e Ungar (2003) afirmam que técnicas de correção de controle ativo de uma estrutura é a utilização controlada de energia a partir de uma fonte externa para atenuar o movimento.

A proteção dos equipamentos sensíveis de vibrações induzidas incluem o deslocamento de equipamentos para áreas em que as vibrações são menos severas, fornecendo dispositivos de

isolamento de vibração ou a implementação de modificações estruturais que visam reduzir as vibrações dos pisos que suportam o equipamento sensível. O equipamento que está sujeito à vibração excessiva geralmente deverá ser transferido para locais perto de colunas. Isto é, locais onde não há corredores ou que não sejam adjacentes à corredores.

2.5.4 NBR 8800

De acordo com a Norma Brasileira 8800 da ABNT (2008), no que diz respeito às vibrações, é informado que nos sistemas de pisos suscetíveis a vibrações, bem como os de grandes áreas que não têm divisórias ou outros elementos de amortecimento, necessitam ser dimensionados com o intuito de se evitar o surgimento de vibrações transientes inaceitáveis, decorrentes do caminhar de pessoas ou a outras fontes.

A referida norma estabelece que os equipamentos mecânicos que possam causar vibrações contínuas indesejáveis devem ser isolados visando a redução ou eliminação da transmissão de tais vibrações para a estrutura. As vibrações desse tipo devem ser consideradas mesmo na averiguação de estados-limites últimos, abrangendo ainda a fadiga. Outras fontes de vibrações contínuas são veículos e atividades humanas rítmicas como a dança (ABNT, 2008).

O anexo L da NBR 8800 em suas considerações gerais sobre as vibrações em pisos, descreve que a utilização de estruturas de pisos com vãos grandes e amortecimento reduzido pode derivar em vibrações que acarretem em desconforto no decorrer das atividades humanas normais ou ocasionar prejuízo ao funcionamento de equipamentos. Para esse estado-limite de serviço, devem-se empregar as combinações frequentes de serviços. É ressaltado ainda que em nenhum caso a frequência natural da estrutura do piso pode ser inferior a 3 Hz.

Ainda sobre a Anexo L da NBR 8800, de acordo com a ABNT (2008), o qual descreve sobre a avaliação precisa, é afirmado que o problema da vibração em pisos deve ser levado em conta no projeto da estrutura através de análise dinâmica, considerando-se pelo menos:

- 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;

O Anexo L da NBR 8800 da ABNT (2008) também estabelece regras, as quais são consideradas no que diz respeito à avaliação simplificada para as atividades humanas normais, sendo que a opção por tal avaliação fica a critério do projetista e pode não estabelecer uma solução apropriada para o problema.

L.3.2 - 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 frequentes de serviço, dadas em [...], não superar 20 mm.

L.3.3 - Nos pisos em que as pessoas saltam ou dançam de forma rítmica, como os de academias de ginástica, salões de dança, ginásios e estádios de esportes, 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 frequentes de serviço, dadas em [...], não superar 9 mm e 5 mm.

3 CONCLUSÃO

Este estudo sobre vibrações em pavimentos por meio da verificação de artigos internacionais especializados teve a finalidade de gerar um só documento contendo as principais informações a respeito, para uso de consulta geral, tanto a acadêmicos quanto aos profissionais de projetos. Para essa finalidade, foram descritos e detalhados os seguintes itens: estruturas de pavimentos mistos (lajes de concreto armado e vigas em perfis metálicos), comportamento mecânico dos pisos às vibrações, aceitabilidade destas vibrações, avaliações e critérios de projetos quanto a esse fenômeno.

Durante a experiência profissional do autor como projetista e calculista em empresas de engenharia consultiva, foi percebido que quanto maior o vão dos pavimentos e menor a rigidez dos elementos envolvidos no projeto, a probabilidade de vibrações perceptíveis ao longo da vida útil da estrutura será maior. Também se deve considerar o aspecto funcional das lajes quanto às sobrecargas planejadas para as mesmas.

A pesquisa bibliográfica teve como maior objetivo compilar informações sobre vibrações em pavimentos oferecendo alternativas e soluções à comunidade técnica.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Luiz Carlos de. **Aços para concreto armado**. Notas de aula da disciplina. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. Departamento de Estruturas. Agosto, 2002. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Acos.pdf>>. Acesso em 14 fev. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS – ABNT. Norma Brasileira. **NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto. Procedimento**, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Norma Brasileira. **NBR 8800 - Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios**, 2008.

BARBATO, Roberto L. A. **Introdução ao estudo do concreto armado**. Centro Universitário Central Paulista. Arquitetura e Urbanismo Tecnologia das Construções. Notas de Aula. Fascículo I. São Carlos, 2007.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do concreto armado**. Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Bauru/SP. Faculdade de Engenharia. Departamento de Engenharia Civil. Notas de Aula. Bauru/SP, 2006.

CORREIA, Antônio Araújo. **Dinâmica: vibrações de sistemas com um grau de liberdade**. Instituto Superior Técnico: Apostila, 2007. Disponível em: <<http://www.joinville.ifsc.edu.br/~pauloboni/MECANISMOS/DIN%C3%82MICA%20DE%20M%C3%81QUINAS/Din%C3%A2mica%20de%20M%C3%A1quinas%20-%20Apostila%20-%20Vibrações%20de%20Sistemas%20com%201%20Grau%20de%20Liberdade.pdf>>. Acesso em 20 jan. 2017.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

MURRAY, Thomas M.; ALLEN, David E.; UNGAR, Eric E. *Floor vibrations due to human activity*. Steel Design Guide Series 11. **American Institute of Steel Construction**, 2003. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id...>>. Acesso em 23 jan. 2017.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P. **Estruturas de Concreto**. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/ec702/EESC/Acos.pdf>>. Acesso em 14 fev. 2017.

SMITH, A.; HICKS, S.; DEVINE, P. *Design of floors for vibration: a new approach*. **Steel Construction Institute Publication P354**. United Kingdom, 2009. Disponível em: <http://staging-mediawiki-bcsa.psycle.com/images/5/5a/SCI_P354.pdf>. Acesso em 23 jan. 2017.

SOMMER, Rosana Maria Rennó. **Análise de vibrações em pisos mistos de aço e concreto**. 150 fls. (Dissertação). Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia de Estruturas. Belo Horizonte, 2002. Disponível em:

<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/FACO-5JVN2A/an_lise_de_vibra__es_em_pisos..._rosana_m._r._sommer_gamboji.pdf?sequence=1>. Acesso em 23 jan. 2017.