

Uma revisão sobre vibrações em sistemas de piso em aço induzidas por carregamentos oriundos de atividades humanas

Priscilla Izabel dos Santos Ribeiro¹, André Vasconcelos Soares Gomes², Walnório Graça Ferreira³, Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani⁴

RESUMO

As novas tendências arquitetônicas e as exigências de mercado levam a engenharia a conceber estruturas capazes de vencer grandes vãos com um número mínimo de pilares, permitindo assim uma maior flexibilidade arquitetônica. Essa filosofia de projeto tem conduzido a elementos estruturais cada vez mais esbeltos e com frequências naturais cada vez mais baixas, portanto, mais próximas das faixas de frequência das excitações dinâmicas associadas a atividades rítmicas humanas. Face ao exposto, a verificação do estado limite de serviço de vibrações excessivas e o atendimento aos critérios normativos de conforto humano se tornaram relevantes já na fase de concepção arquitetônica, antes mesmo da elaboração do projeto. Dentro desse contexto, este artigo faz um levantamento do desenvolvimento histórico das pesquisas referentes ao comportamento dinâmico de diferentes sistemas de pisos utilizados em estruturas de aço e dos principais critérios normativos relacionados ao tema em questão.

Palavras-chave: Vibrações Excessivas; Sistemas de Piso; Atividades Humanas; Estruturas de Aço;

¹Arquiteta e Urbanista, Estudante de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, priscillaisribeiro@gmail.com

²Estudante de Graduação, Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, andrevsg91@hotmail.com

³Engenheiro Civil, Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, walnorio@gmail.com

⁴Engenheira Civil, Professora Doutora, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, afcalenzani@gmail.com (enviar correspondência)

1 Introdução

Edificações, tais como, estádios, academias, centros de compra e escolas, estão sujeitas às significativas cargas dinâmicas oriundas de atividades humanas que podem provocar vibrações excessivas, que no mínimo, poderão comprometer o conforto dos ocupantes. A influência do carregamento dinâmico no momento da concepção estrutural é uma preocupação de longa data. Stevenson (1821) escreveu: “[...] mas o efeito que temos de precaver em pontes suspensas, não é apenas o que é tecnicamente chamado de cargas permanentes, mas um agente mais potente existente nos impulsos súbitos, ou nos movimentos de carga [...]” (tradução nossa). Tredgold (1853) propôs especificações construtivas para prevenir vibrações excessivas em pontes de madeira devido à passagem de carga. Contudo, apesar dos receios com as vibrações, o pesquisador Johnson (1905) apenas recomendou aplicação de uma carga estática a fim de representar ambas ações, estáticas e dinâmicas, de uma multidão no momento do dimensionamento de uma estrutura. Mas, a partir do século XX, as pesquisas se intensificaram visando compreender os carregamentos dinâmicos humanos e suas influências nos cálculos estruturais. Por conseguinte, normas e guias específicos para vibrações de piso surgiram com o intuito de avaliarem a aceitabilidade da utilização de pisos concernente ao conforto humano.

Casos que envolvam vibrações de pisos induzidas por atividades humanas nas estruturas têm sido cada vez mais frequentes nos dias atuais. Tal fato está relacionado principalmente com:

- As novas tendências arquitetônicas e as exigências de mercado que levam a engenharia a utilizar estruturas que possam vencer grandes vãos com um número mínimo de pilares, permitindo assim uma maior flexibilidade arquitetônica.
- O surgimento de materiais cada vez mais resistentes, como o aço de alta resistência e o concreto de alto desempenho, proporcionando elementos estruturais de seções transversais de menor área que a habitual e consequentemente maior esbeltez para o mesmo comprimento do elemento.
- A disponibilidade de softwares de modelagem numérica ou mesmo o surgimento de modelos analíticos mais refinados que contribuem para projetos economicamente otimizados, sendo necessária também uma avaliação mais precisa dos carregamentos estático e dinâmico.

Tal filosofia de projeto tem conduzido a elementos estruturais com frequências naturais cada vez mais baixas, portanto, mais próximas das faixas de frequência das excitações dinâmicas associadas a atividades humanas.

Objetivando uma base para futuras pesquisas relacionadas ao tema, este artigo apresenta um levantamento do desenvolvimento do comportamento dinâmico de sistemas de pisos utilizados em estruturas de aço e de critérios normativos relacionados ao tema em questão.

2 Comportamento dinâmico de sistemas de pisos utilizados em estruturas de aço

Os sistemas de piso abordados nesse estado da arte são compostos por vigas de aço ou mistas de aço e concreto e lajes de concreto ou lajes mistas de aço e concreto. As estruturas mistas de aço e concreto, vigas e lajes, começaram a ser empregadas a partir da metade do século XX, com o surgimento dos conectores de cisalhamento do tipo pino com cabeça em 1940 (*stud bolts*) (Queiroz, Pimenta e Da Mata 2001). Também, são abordados sistemas de piso compostos por vigas em perfis leves do tipo *light steel framing* e lajes em painel OSB (*Oriented Strand Board*), placas cimentícias ou mistas de aço e concreto.

Uns dos pioneiros na análise dinâmica em estruturas em aço foram Pernica e Allen (1982). Eles realizaram medições em cinco pisos de um shopping center, três delas em locais com lajes mistas de aço e concreto (*steel deck*) e duas em locais com lajes pré-moldadas protendidas. Considerando a finalidade do piso como área de passeio, os critérios de conforto humano foram atendidos segundo norma canadense.

Loose (2008) analisou um modelo estrutural composto por dois painéis de laje apoiados em vigas e pilares de aço. O trabalho buscou avaliar o comportamento de pisos mistos em aço e concreto, quando submetidos a carregamentos dinâmicos provenientes das atividades humanas rítmicas, como a ginástica aeróbica e os saltos à vontade. Para isso, foram apresentadas duas propostas de carregamentos, a fim de representar de forma realista as cargas em estudo. O primeiro modelo de carregamento utiliza uma função matemática que incorpora parâmetros obtidos experimentalmente por Faísca (2003), que levam em consideração os efeitos de multidão. O outro modelo de carregamento utiliza a série de Fourier que incorpora parâmetros reconhecidos pela literatura internacional, Murray, Allen e Ungar (2003). As análises numéricas foram realizadas por meio do programa computacional ANSYS®, através do método dos elementos finitos. Condições de apoio diferentes foram consideradas nos modelos e essas influenciaram nos resultados das frequências naturais do piso. Com relação aos carregamentos, em grande parte dos resultados encontrados utilizando o segundo carregamento, as acelerações máximas foram superiores aos resultados obtidos utilizando o primeiro carregamento.

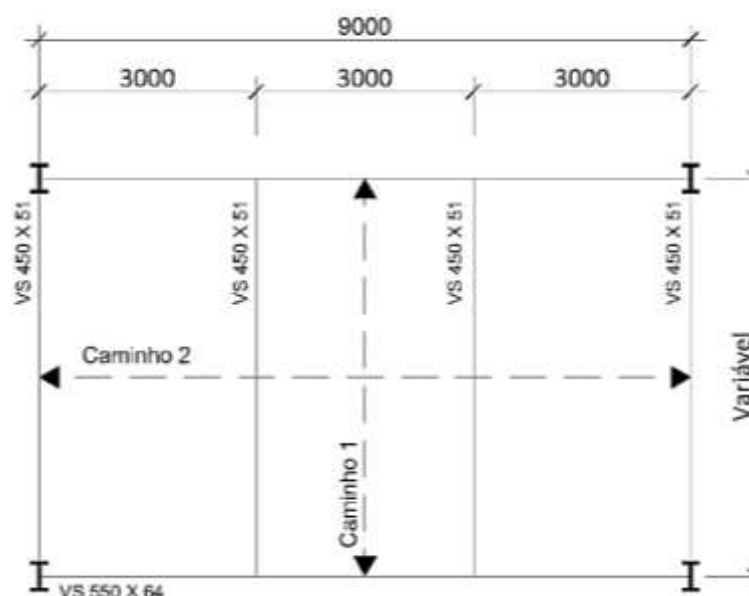
Mello *et al.* (2008) contribuíram também na investigação dos efeitos dinâmicos causados por carregamento humano devido à caminhada. Por meio de análise numérica no *software* ANSYS®, a estrutura de um piso com vigas mistas de aço e concreto, laje maciça de concreto e pilares de aço (Figura 1) foi analisada e teve os seus primeiros modos de vibração determinados. Para avaliar os efeitos dinâmicos da aceleração foram propostos quatro tipos de carregamentos: os dois primeiros compostos apenas por variação temporal e os dois últimos contemplando, além da variação temporal, a variação espacial da carga (caminhos 1 e 2 da Figura 1), tornando-os mais próximos da realidade do carregamento humano da caminhada. Ao comparar os resultados da aceleração de pico de cada modelo de carga com os valores propostos por Murray, Allen e Ungar (2003) e os valores limites da ISO 2631-2:1989, uma das conclusões de Mello *et al.* (2008) foi que os modelos de carga com variação espacial produziram acelerações maiores que os carregamentos sem variação espacial e que os valores limites, enfatizando, dessa maneira, que a variação da carga no espaço tem um papel importante na avaliação dos efeitos dinâmicos.

De Silva e Thambiratnam (2009) determinaram as características dinâmicas de um sistema de piso com múltiplos painéis sobre atividades humanas aeróbica do tipo dança, usando técnicas de elementos finitos. Modelos de carregamento com parâmetros variáveis como intensidade, razão de contato do pé, frequência e amortecimento foram desenvolvidos e aplicados como padrões de carregamento. As respostas do painel, em termos de deslocamentos e acelerações, foram utilizadas para verificar a adequação do tipo de ocupação. Os resultados indicaram a ocorrência de vibração multimodal nessas estruturas e a importância da aplicação dos padrões de carregamento para capturar esses modos. A vibração oriunda de maiores harmônicos da carga causou desconforto e deslocamento excessivo nos painéis de piso.

Parnell, Davis e Xu (2010) estudaram o comportamento dinâmico de sistemas de piso compostos por perfis formados a frio. Foram construídos e analisados 23 sistemas de piso no laboratório na Universidade de Waterloo, 8 sistemas de piso na Dietrich Design Group e 12 sistemas de piso em edifícios residenciais. A pesquisa analisou características e respostas dinâmicas (frequência fundamental, taxas de amortecimento, deslocamentos e acelerações) dos pisos e avaliou a influência de algumas alterações construtivas. Os elementos construtivos que variavam foram: as aberturas na alma com reforço, o tipo de piso, e a condição de concepção. Em relação às aberturas na alma com reforço, concluíram que o tipo de viga exerce pouca influência nas respostas dinâmicas. Em relação ao tipo de piso, foram analisadas placas de OSB, placas cimentícias reforçadas chamadas de FORTACRETE® (FC) com e sem contrapiso e a laje mista com fôrma de aço e contrapiso. Entre o OSB e o FC sem contrapiso, o FC apresentou maior frequência fundamental e menores deslocamentos, pois, apresenta mais rigidez que o OSB. Entre o FC com contrapiso e a laje mista com fôrma de aço e contrapiso, a laje mista possui maior frequência fundamental e menores deslocamentos. Em relação à condição de concepção, no sistema tipo

ballon frame houve o aumento da frequência fundamental e redução dos deslocamentos, na plataforma aporticada também houve aumento da frequência fundamental e redução dos deslocamentos se comparado com a condição de simplesmente apoiada. Entretanto, na condição simplesmente apoiada, as taxas de amortecimento foram maiores. As respostas de aceleração em relação à caminhada também foram analisadas em todos os sistemas de piso e estavam em níveis aceitáveis quando comparadas com a ISO 2631-2: 1989.

Figura 1 – *Layout* do sistema estrutural estudado por Mello (cotas em milímetros). Fonte: Mello (2008).



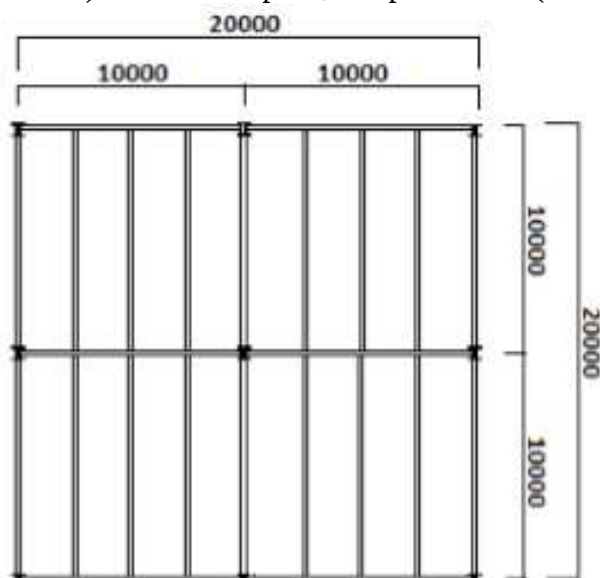
Dietrich *et al.* (2014) estudaram o comportamento dinâmico de dois tipos de sistemas de piso (lajes em concreto armado suportadas por vigas de aço e chapas de piso metálicas suportadas por vigas de aço) submetidos à atividade de caminhada. Os resultados numéricos obtidos através do software de elementos finitos ANSYS® foram comparados com os resultados obtidos pelo método simplificado (Murray, Allen e Ungar 2003). Desse modo, observou-se que as frequências fundamentais calculadas pelo método analítico são, na maioria das vezes, um pouco menores do que as frequências fundamentais numéricas, constituindo-se, portanto, numa simplificação analítica confiável para a determinação da frequência fundamental do piso. Concluiu-se também que, quanto às acelerações, os valores calculados pelo método analítico se apresentaram consideravelmente maiores do que os do modelo computacional, mostrando que a formulação do Murray, Allen e Ungar (2003) apresenta uma razoável margem de segurança.

Costa-Neves *et al.* (2014) analisaram o estado limite de vibração excessiva de lajes mistas de edifícios de múltiplos andares e vãos devido às atividades humanas rítmicas. O edifício possuía três pavimentos com pilares de aço, vigas e lajes mistas de aço e concreto. Dois modelos de carga dinâmica foram implementados. O primeiro levava em consideração ações dinâmicas tais como saltos, aeróbica, futebol, espectadores em um show e dança e utilizava uma função com três harmônicos cujos coeficientes de impacto e de defasagem foram determinados por Faísca (2003). O segundo modelo considerou uma variação espacial e temporal da ação dinâmica e a força dependente do tempo foi expressa pela série de Fourier com três harmônicos correspondentes a aulas de aeróbica. As acelerações foram medidas no meio de cada painel, de forma que as respostas dinâmicas puderam ser analisadas tanto no painel com carga quanto nos painéis adjacentes descarregados. Os resultados obtidos para as acelerações de pico foram comparados com os valores limites para o conforto humano prescritos pela ISO 2631- 2:1989 e por Murray, Allen e

Ungar (2003), sendo que em algumas situações os valores numéricos ultrapassaram os valores limites. Dessa forma, Costa-Neve *et al.* (2014) mostraram que as vibrações devido às atividades rítmicas é um estado limite importante e deve ser analisado concomitantemente com as demais verificações de projeto.

Campista, Gaspar e Silva (2015) avaliaram o comportamento dinâmico de um edifício misto (aço-concreto), submetido às atividades humanas rítmicas (ginástica aeróbica), sob o ponto de vista do conforto humano. O modelo estrutural é composto por três andares com dimensões de 20m x 20m (Figura 2) e um pé-direito de 4m. A modelagem numérica da estrutura foi realizada pelo programa computacional ANSYS®. A função matemática que representa as atividades humanas rítmicas é descrita por duas diferentes abordagens, A primeira proposta por Faísca (2003) e a segunda proposta por Ellis e Littler (2004) baseada em Smith, Hicks e Devine (2009). A resposta dinâmica do sistema foi obtida, em termos acelerações de pico, *r.m.s.* e VDV. De acordo com os resultados encontrados em estudo apresentou níveis de vibração excessiva que comprometem o conforto humano dos usuários.

Figura 2 - *Layout* do sistema estrutural estudado por Campista, Gaspar e Silva (cotas em milímetros). Fonte: Campista, Gaspar e Silva (2015).



3 Critérios de conforto humano referente às vibrações contínuas

Ter um modelo simples e preciso para o carregamento dinâmico devido às atividades humanas rítmicas, conhecer as propriedades dinâmicas das estruturas e ter definido o nível de tolerância humano às vibrações são todos requisitos necessários à verificação da aceitabilidade de sistemas de pisos em condições de serviço. Muitos pesquisadores têm trabalhado na formulação de procedimentos para o projeto de pisos sujeitos às vibrações. A partir disso, algumas normas e guias têm sido adotados. A seguir, serão apresentados trechos referentes às vibrações de sistemas de piso extraídos de duas normas nacionais, ABNT NBR 6118: 2014 e ABNT NBR 8800:2008, do guia de projeto americano de Murray, Allen e Ungar (2003), do guia britânico de projeto de Smith, Hicks e Devine (2009) e de três normas internacionais direcionadas para o tema em questão, ISO 2631-1: 1997, ISO 2631-2: 2003 e ISO 10137: 2007.

3.1 ABNT NBR 6118:2014 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento)

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, a análise das vibrações pode ser feita em regime linear no caso das estruturas usuais. A norma recomenda que para estruturas sujeitas à vibração, deve-se afastar a frequência natural da estrutura (f) ao máximo possível da frequência crítica (f_{crit}), que depende do tipo de ocupação da edificação em estudo. Na falta de valores determinados experimentalmente, a norma estipula valores para f_{crit} conforme o uso da edificação (ver Tabela 1). Quanto à relação entre f e f_{crit} , a norma recomenda que seja:

$$f > 1,2f_{crit} \quad (1)$$

Tabela 1 - Frequência crítica para vibrações verticais para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas. Fonte: NBR 6118:2014.

Caso	f_{crit} (Hz)
Ginásio de esportes e academia de ginástica	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concerto com cadeira fixas	3,5

3.2 ABNT NBR 8800:2008 (Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios)

Conforme a ABNT NBR 8800:2008, em nenhum caso é permitida uma frequência natural da estrutura do piso inferior a 3,0 Hz. Além disso, a norma fornece parâmetros para uma avaliação mais simplificada para vibrações de piso induzidas por atividades humanas (Tabela 2), entretanto deixa claro que a avaliação simplificada pode não ser uma avaliação adequada para o problema. Para obtenção de procedimentos de avaliação considerada precisa, a ABNT NBR 8800:2008 direciona o leitor à literatura internacional: Wyatt (1989), CEB (1991), Murray, Allen e Ungar (2003), dentre outros.

Tabela 2 - Parâmetros para uma avaliação simplificada segundo a NBR 8800:2008 Fonte: NBR 8800:2008.

Atividade	Frequência Natural	Deslocamento*
Caminhada regular	Não pode ser inferior a 4 Hz	Não superar 20 mm
Salto ou dança de forma rítmica	Não pode ser inferior a 6 Hz, devendo ser aumentada para 8 Hz caso a atividade seja muito	Não superar 9 mm e 5 mm

*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.

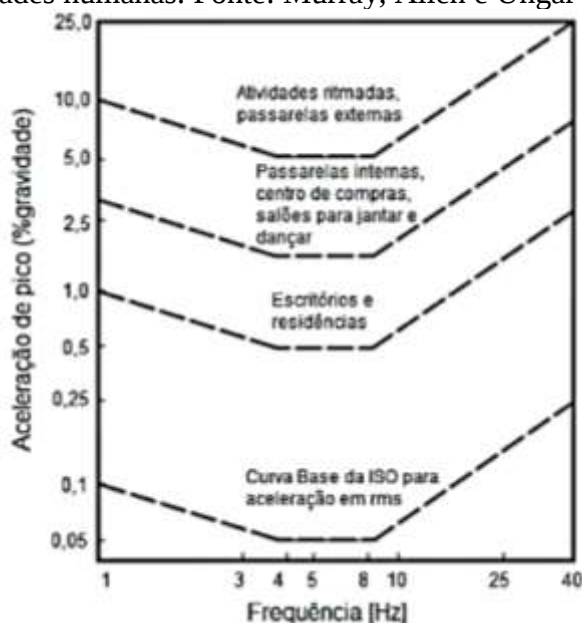
3.3 Guia de Projeto de Murray, Allen e Ungar (2003): Floor Vibrations Due to Human Activity

O principal objetivo deste guia é fornecer ferramentas analíticas simples para avaliar sistemas de piso e passarelas em aço sujeitas a vibrações induzidas por atividades humanas: caminhada e atividade ritmadas, como dança e aeróbica. Calcula-se, primeiramente, a frequência natural,

seguida da aceleração de pico. Uma escala de conforto humano (Figura 3) é utilizada para determinar se o piso atende aos requisitos de serviço.

O critério tem como base a resposta dinâmica de sistemas de piso com vigas de aço e pode ser usado para avaliar sistemas de piso de escritórios, shoppings centers, passarelas e ocupações similares. Tem como princípio o limite de aceleração como recomendado pela ISO 2631-2:1989 ajustado para a intenção da ocupação. Além disso, utiliza o carregamento da caminhada como uma única componente harmônica dependente do tempo cuja frequência se iguala à frequência fundamental do piso. Justifica-se o uso de somente uma componente pelo fato de que todas as outras vibrações harmônicas são pequenas comparadas ao harmônico associado à ressonância. O guia também apresenta critérios de projeto para carregamentos dinâmicos provenientes de equipamentos mecânicos.

Figura 3 - Aceleração de pico recomendada para conforto humano para vibrações devido a atividades humanas. Fonte: Murray, Allen e Ungar (2003)



3.4 Guia de Projeto de Smith, Hicks e Devine (2009): Design of Floors for Vibration: A New Approach

Este guia de projeto tem como objetivo fornecer aos projetistas um método simples para a determinação da aceleração *r.m.s.* de pisos compostos por elementos estruturais de aço em perfis laminados ou formados a frio, sendo particularmente útil para arranjos estruturais que são regulares em planta. A aceleração *r.m.s.* é comparada com os níveis de aceitabilidade descritos na BS 6472:1992 e na ISO 10137:2007 para projeto de edifícios e com o padrão de desempenho *Health Technical Memorandum* 08-01 para hospitais. Faz referência à pesquisa e medições em uma variedade de edifícios que demonstraram um bom desempenho à vibração, alcançado com o uso de pisos mistos de aço e concreto.

Segundo o guia de projeto, no Reino Unido, uma aproximação tradicional usada para projetar pisos convencionais a critérios de serviço era verificar as vigas primária e secundária independentemente para uma frequência natural mínima de 4 Hz, assumindo condições de apoio simplesmente apoiadas. Esse limite de frequência mínima reduz a possibilidade de desconforto dos usuários e minimiza a probabilidade da ocorrência de ressonância quando a frequência do primeiro harmônico das atividades humanas coincidir com a frequência fundamental do piso. Entretanto não fornece nenhuma indicação do nível da resposta do piso.

O guia menciona que em estruturas, o amortecimento é fornecido a partir do atrito e deslizamento nas ligações e a partir da mobília e fixações dos compartimentos (o conteúdo de um compartimento removerá energia da vibração, pela vibração ou movimento dele mesmo). Como esses fatores variam entre edifícios e entre partes do edifício, é necessário ter como base em projeto, valores que historicamente se mostraram apropriados. O guia apresenta os valores da taxa de amortecimento a serem utilizados em projeto, a menos que informações mais precisas sejam disponíveis.

O guia apresenta dois procedimentos para a análise da resposta de pisos mistos a vibrações. Um procedimento geral é estabelecido quando se utiliza uma modelagem numérica em elementos finitos para determinar as frequências naturais, massas modais e modos de vibração do piso em consideração. Esse procedimento é particularmente útil para estruturas que são complexas ou têm requisitos muito rigorosos no que diz respeito à vibração.

O outro procedimento é manual, sendo aplicável somente às estruturas regulares, que em geral, têm de ser criadas a partir de uma grelha retilínea. Esse procedimento de avaliação simplificada compreende o cálculo manual da frequência natural das vigas primária e secundária e consequentemente do piso, a definição da massa modal do piso, a avaliação da resposta e verificação da resposta em relação ao critério de aceitabilidade. Vale ressaltar que primeiro obtém-se a frequência fundamental do piso, para então encontrar a resposta em *r.m.s.* e comparar aos limites recomendados.

Quanto ao critério de aceitabilidade desse guia é o mesmo apresentado na ISO 10137:2007 para vibrações contínuas. Contudo, o guia recomenda determinar o fator de resposta, R_p , que para vibrações no eixo z, é dado pela equação:

$$R_p = \frac{a_{w,rms}}{0,005} \quad (2)$$

onde, $a_{w,rms}$ é a aceleração em *r.m.s.*

O denominador da Equação 2 é semelhante ao que pode ser obtido por meio da curva base da ISO 10137:2007, entretanto, nesse caso, 0,005 só se aplica as frequências contidas no intervalo de 4Hz à 8 Hz.

Em seguida, recomenda-se comparar o fator de resposta a multiplicadores idênticos aos da ISO 10137:2007 e da BS 6472:1992. Além disso, o guia também apresenta outros fatores multiplicadores (Tabela 3). Apesar desses fatores serem menos conservadores, o guia explica que não foram recebidas reclamações dos ocupantes dos pisos quanto ao conforto.

Tabela 3 – Fatores multiplicadores da aceleração baseados na excitação de uma pessoa Fonte: Smith, Hicks e Devine (2009).

Local	Fator Multiplicador
Escritório	8
Shopping	4
Locais de negociação	4
Escada (utilização leve)	32
Escada (utilização pesada)	24

3.5 Norma ISO – *International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole- Body Vibrations): ISO 2631-1:1997*

Essa norma define métodos para quantificar vibrações periódicas, aleatórias e transientes em regime de corpo inteiro, isto é, em posições padronizadas como corpo em pé, sentado e deitado. Além disso, apresenta procedimentos para a avaliação do efeito dessas vibrações nos seres

humanos. São caracterizados quatro efeitos para avaliação, sendo eles relacionados à saúde, ao conforto, à percepção e ao enjoo devido ao movimento. Primeiramente, a norma estabelece como será feita a medição das vibrações na estrutura. Para isso, define a aceleração como a magnitude de vibração primária e traz orientações para determinar a direção e a localização das medições. Ainda sobre as medições, a norma afirma que a duração deve ser suficiente para garantir a sua precisão. Na segunda parte, a norma apresenta procedimentos específicos para avaliação das estruturas em relação a cada efeito supracitado. Usa-se a *weighted root-mean-square (r.m.s) acceleration* (raiz média quadrática da aceleração), dada pela Equação 18, como método de avaliação básico. Apesar de apresentar outros métodos para situações diferentes, na avaliação sempre deve constar os valores obtidos pelo método básico. Por meio de tabelas, curvas de frequência ponderada são usadas para avaliação dos possíveis efeitos no corpo humano, sendo esses detalhados nos anexos “B”, “C” e “D” dessa norma. Exata definição matemática das curvas de frequência ponderadas, amplamente usadas para a avaliação, é dada em seu anexo “A”. Concluindo, a ISO 2631-1:1997 formula um procedimento para quantificar e avaliar as vibrações no corpo inteiro de um indivíduo relacionando com possíveis efeitos.

3.6 Norma ISO – *International Standard (Evaluation of Human Exposure to Whole- Body Vibrations): ISO 2631-2:2003*

Essa norma concentra-se na avaliação dos níveis aceitáveis de exposição de humanos às vibrações em relação ao conforto. Para isso, especifica-se um método para a medição e avaliação desses níveis, consistindo da determinação da localização e das direções dessa medição. Para a medição da vibração em construções, a norma indica critérios para determinar a localização das medições e indica a norma ISO 2631-1:1997 para determinar as direções dessa medição. Deve-se expressar a magnitude dessas vibrações pela *frequency-weighted acceleration* (aceleração da frequência ponderada), definida matematicamente em seu anexo “A”. Para a avaliação das vibrações, recomenda-se usar os mesmos métodos apresentados na ISO 2631-1:1997. Além disso, a ISO 2631-2:2003 apresenta em seu anexo “B” um guia para coleta de dados da resposta humana às vibrações de construções. Portanto, a ISO 2631-2:2003 fornece um guia para medir e avaliar vibrações relacionadas com o conforto usando recomendações adotadas na parte I dessa mesma norma, isto é, a ISO 2631-1:1997.

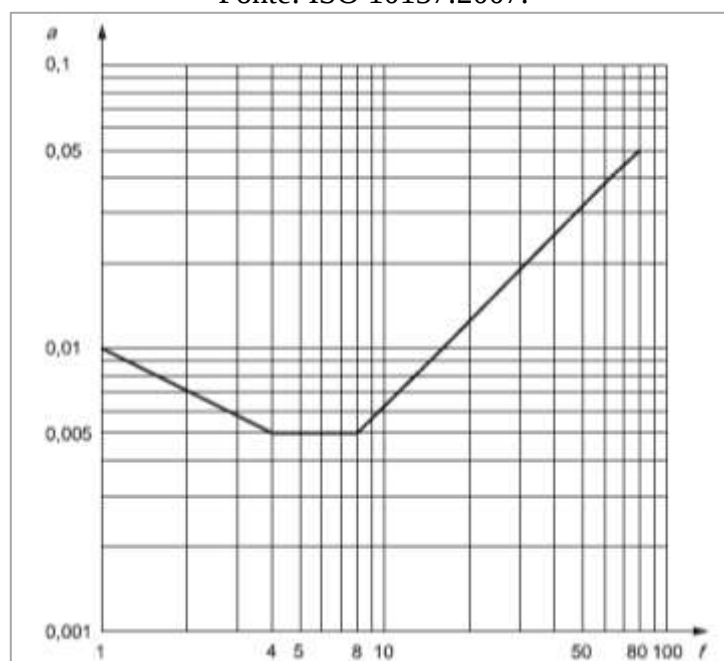
Vale ressaltar que trechos da ISO 2631-2:1989 foram retirados da ISO 2631-2:2003, contudo, alguns desses trechos ainda são relevantes como critérios para vibrações e foram reproduzidos na ISO 10137:2007, como por exemplo a Tabela 4 que apresenta os fatores de multiplicação para aceleração *r.m.s.* aplicadas às curvas de base. As curvas se diferem pela direção da vibração e, ao todo são três gráficos. A curva de base para o eixo z, ou seja, para o eixo vertical, é apresentada na Figura 4.

Tabela 4 - Faixas de valores multiplicativos das acelerações. Fonte: ISO 10137:2007.

Locais	Horários de Utilização	Vibração Contínua ou intermitente	Vibração transiente
Áreas críticas (hospitais e laboratórios de precisão)	Diurno	1	1
	Noturno		
Residência	Diurno	2-4	30 - 90
	Noturno	1,4	1,4 - 20
Escritório	Diurno	4	60 - 128
	Noturno		
	Diurno		

Figura 4 - Curva de base do eixo z da vibração para a aceleração.

Fonte: ISO 10137:2007.



3.7 Norma ISO 10137:2007– International Standard (Bases for design of structures — Serviceability of buildings and walkways against vibrations)

Esta norma internacional apresenta diretrizes sobre a avaliação do estado limite de serviço de vibrações excessivas em edifícios e passarelas. Não inclui pontes com o tráfego de veículos mesmo em conjunto com o tráfego de pedestre, nem o projeto de fundações ou estruturas suportes de máquinas.

Segundo a ISO 10137:2007, a avaliação das vibrações em edifícios e passarelas deve considerar as características da fonte de vibração, do caminho da transmissão e do receptor. A norma também apresenta as principais fontes de vibração e cita a caminhada como sendo uma delas.

Quanto à avaliação das respostas recomenda-se que a análise tenha um modelo de cálculo que incorpore as características da fonte e do caminho de transmissão e que seja então resolvido para a resposta de vibração no receptor. O tipo e a complexidade do modelo de cálculo dependem do comportamento dinâmico que ele deve representar e da precisão necessária na previsão da resposta de vibração. Hipóteses simplificadoras utilizadas para estabelecer e resolver o modelo de cálculo devem ser observadas. A análise pode ser focada em estruturas existentes ou pode ser uma parte do projeto de novas estruturas. As vibrações em estruturas de edifícios existentes devem ser avaliadas, sempre que possível, por medições, a fim de completar e verificar eventuais cálculos. Métodos aproximados para prever vibrações podem ser empregues onde:

- a) as hipóteses simplificadoras correspondem estreitamente à realidade conhecida, ou
- b) o efeito global foi verificado pela experiência de campo e / ou por cálculos mais refinados.

Quanto ao método de análise recomenda-se que a escolha deve ser ditada pelo tipo de fonte de vibração e pelo caminho de transmissão. Além disso, a norma divide o problema de vibrações em

duas grandes classes: “A”: as ações da fonte de vibração mudam no tempo e no espaço, e “B”: as ações da fonte de vibração mudam no tempo, mas podem ser consideradas estacionárias no espaço. Em relação a “Classe A”, a ISO 10137:2007 explicita que, quando a ação varia no tempo e no espaço, os problemas tornam-se muito difíceis de resolver analiticamente. Por esta razão, são frequentemente procuradas simplificações adequadas para eliminar ou desacoplar a variável espaço. A complexidade desses problemas é uma das razões pelas quais muitos deles foram tratados por métodos empíricos, ou pelo uso extensivo de medições em estruturas similares existentes.

Para uma avaliação dos níveis de vibração no receptor, recomendam-se dois passos:

- a) modelagem matemática das características dinâmicas da estrutura;
- b) cálculo da resposta no receptor, levando em conta as características da fonte de vibração.

Além disso, o modelo matemático pode ter como base uma distribuição de massa contínua ou distribuição de massa discreta (Sistemas de graus de liberdade). No Anexo B estão presentes alguns exemplos de modelagem matemática e cálculos de resposta dinâmica.

Sobre amortecimento, a ISO 10137:2007 diz que em geral, essa propriedade não pode ser calculada ou prevista de forma confiável e a experiência com tipos de construção semelhantes fornece uma fonte provável de dados adequados para o amortecimento. Além disso, a ISO 10137:2007 sugere valores de taxas de amortecimento a serem adotadas em projeto.

Em relação aos critérios de vibração, inicialmente a ISO 10137:2007 agrupa as ocupações conforme o nível de reação do ocupante em:

- a) Sensíveis: salas de operação do hospital;
- b) Regular: escritórios e áreas residenciais;
- c) Ativas: áreas de montagem ou locais de trabalho industrial pesado, pisos em arenas, ginásios e estádios sujeitos a atividades como dança, corrida, altos e movimentos coordenados de espectadores.

Em seguida, abordam-se requisitos para passarelas e critérios de vibração para as estruturas (fundação, vigas e pisos) e para o conteúdo material do edifício. Logo após, aponta caminhos para o controle e atenuação da vibração. Os demais capítulos tratam dos métodos de análise da resposta, dos controles de vibração aplicáveis e dos atenuadores de vibração. Por último, os anexos apresentam mais detalhadamente as ações dinâmicas oriundas de pessoas, como caminhada ou corrida, ação de multidão e movimentos em escada, atividades rítmicas, entre outras, por meio de gráficos da força, tabelas com coeficientes e funções de carregamentos. Além disso, apresenta tipos de análises de vibração e exemplos de critérios de vibração.

Finalmente, como critério de avaliação, a aceleração é a variável usual para realizar a verificação. Conforme a ISO 10137:2007, os níveis de vibração aceitáveis variam com a frequência do movimento, portanto, é necessário filtrar a aceleração. Os filtros apropriados são fornecidos pela ISO 2631-1:1997 para situações em que a direção de vibração crítica é especificada ou ISO 2631-2:2003 se a direção crítica for desconhecida. A ISO 2631-1:1997 também descreve como valores adequados de aceleração *r.m.s* podem ser determinados a partir da aceleração filtrada. Além dessa norma, a ISO 2631-2:2003 também é citada, entretanto é ressaltado que essa deixa de fornecer orientação sobre os critérios de aceitação, uma vez que o leque de potenciais aplicações é muito esparado para essa norma. A ISO 2631-2:1989 também é considerada, pois parte dela ainda é relevante como critérios para vibrações de edifícios e foi reproduzida na ISO 10137:2007.

5 Conclusão

Neste artigo foi feito um estado da arte tratando-se de diferentes aspectos relacionados às vibrações excessivas oriundas de atividades humanas em sistemas de piso. Pôde-se constatar que o tema como um todo é bastante complexo e ainda pouco pesquisado. Entretanto, o problema pode ser

simplificado abordando-se separadamente três aspectos principais: o tipo de atividade humana e o carregamento dinâmico por ela induzido, os diferentes sistemas de pisos utilizados em estruturas de aço e suas repostas dinâmicas e, por último, o efeito das vibrações no ser humano, tratado de forma normativa.

O estado da arte elaborado permitiu concluir que os sistemas de piso de estruturas de aço abordados em estudos com análises dinâmicas utilizando cargas induzidas por humanos incluíram técnicas construtivas surgidas a partir da metade do século XX. Exemplo disso são as vigas e lajes mistas de aço e concreto e perfis leves do sistema *light steel framing*. Todas as referências sobre o comportamento dinâmico desses pisos são recentes, porque utilizaram o método dos elementos finitos, atualmente empregado graças ao avanço tecnológico da informática. Além disso, o uso de tais ferramentas vem possibilitando uma modelagem mais confiável desses sistemas de pisos. Portanto, para maiores avanços nesse tema, o uso de programas computacionais e máquinas de alto desempenho são fundamentais.

Outro aspecto desse artigo está relacionado às prescrições normativas do efeito das vibrações no ser humano, sendo analisadas referências nacionais e internacionais. A limitação no valor da frequência natural pelas normas brasileiras está fortemente ligada ao risco da ocorrência da ressonância. Entretanto, a real influência de cargas dinâmicas não é sentida pelas pessoas em termos de frequência do piso, mas sim de aceleração, sendo assim, a verificação do estado limite de serviço relativo ao conforto humano não é feita. Já as normas internacionais abordadas neste artigo têm como principal objetivo a análise do conforto humano em relação às vibrações. O guia de projeto de Murray, Allen e Ungar (2003) recomenda que essa análise seja feita por meio da aceleração de pico. De caráter prático, ainda prescreve equações simplificadas para o cálculo das acelerações em sistemas de piso compostos por vigas primárias e secundárias. O guia de projeto de Smith, Hicks e Devine (2009) utiliza a aceleração *r.m.s.* como parâmetro de verificação e traz dois métodos para avaliação de pisos em aço, um com o auxílio da análise de elementos finitos e outro simplificado por meio de equações e tabelas. A ISO 2631-1:1997, ISO 2631-2: 2003 e ISO 10137:2007 propõem comparar medições de vibrações em estruturas com curvas de frequência ponderadas de acordo com cada tipo de efeito. Sendo assim, a questão do conforto humano é encontrada nas normas e guias de projeto internacionais, porém alguns deles adotam modelos de carregamento simplificados e poucos trazem métodos para tratar de sistemas de pisos mais complexos.

Enfim, o tema vem apresentando relevância para os pesquisadores da área da construção civil desde o início do século passado. Porém, avanços ainda precisam ser feitos para tornar as normas brasileiras mais precisas e reduzir a dependência de bibliografia estrangeira complementar para análise do efeito das vibrações no corpo humano. Além disso, com o recente avanço tecnológico dos sistemas computacionais também seria possível melhorar as análises do comportamento dinâmico de sistemas de pisos feitas até o momento. Consequentemente, com modelos mais complexos de sistemas de pisos, as normas poderiam ser aprimoradas. Com isso, os projetistas estruturais teriam informações mais amplas e precisas no que diz respeito ao conforto humano dos usuários em edificações sujeitas às vibrações bem como ao adequado desempenho da estrutura frente às ações dinâmicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, e FAPES pelo apoio recebido para a realização deste estudo.

Referências

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2008). Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. NBR 8800. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). Projetos de estruturas de concreto – procedimento. NBR 6118. Rio de Janeiro.

British Standards.(1992). Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz). BS 6472.

Campista, F. F., Gaspar, M. R., Silva, J.G.S. (2015). Modelagem das ações humanas rítmicas e estudo de conforto humano sobre edifícios mistos (aço-concreto). XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. CILAMCE. Rio de Janeiro.

Comité Euro -International du Béton.(1991). Vibrations Problems in Structure – Practical Guidelines. Bolletin d’informetion n. 209, Lousanne, Switzerland.

Costa-Neves, L.F., Silva, J.S., Lima, L.R.O, Jordão, S. (2014). Multi-storey, multi-bay buildings with composite steel-deck floors under human-induced loads: The human comfort issue. Computers and Structures. v. 136, p. 34-36.

De Silva, S.S., Thambiratnam, D.P. (2009). Dynamic characteristics of steel–deck composite floors under human-induced loads. Comput. Struct. v. 87, p. 1067-1076.

Dietrich, M.Z., Teixeira, F.B., Calenzani, A.F.G., Ferreira, W.G. (2014).Vibrations in steel-frame floors due to human activities. Global Journal of Research in Engineering. v. 14 p. 1-12.

Ellis, B.R., Littler, J.D. (2004). Response of cantilever grandstands to crowd loads. Part I: Serviceability evaluation. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings, v.154, p. 235-241.

Faisca, R.G.(2003). Caracterização de cargas dinâmicas geradas por atividades humanas. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

International Organization for Standardzation. (1989). Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Continuous and shock-induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz), ISO 2631-2.

International Organization for Standardzation. (1997). Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements. ISO 2631-1.

International Organization for Standardzation. (2003). Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz), ISO 2631-2.

International Organization for Standardzation. (2007). Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations. ISO 10137.

Johnson, L. J. (1905). New data on the weight of a crowd of people. Association of Engineering Societies, v. 34.

Loose, J.K. (2008). Influência das atividades humanas rítmicas sobre a resposta dinâmica de pisos mistos (aço-concreto). Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, v. 5, n. 2/3, p. 7-25.

Mello, A.V.A, Silva, J.G.S., Vellasco, P.C.G.S., Andrade, S.A.L., Lima, L.R.O. (2008) Dynamic analysis of composite systems made of concrete slabs and steel beams. J. Constr. Steel res. v. 64, p. 1142–1151.

Murray, T.M., Allen, D.E, Ungar, E.E.(2003). Floor vibration due to human activity: steel design guide Series 11. American Institute of Steel Construction, Chicago.

Parnell, R., Davis, B.W., Xu, L.(2010). Vibration Performance of Lightweight Cold Formed Steel Floors. J. Struct. Eng. v. 136, p. 645-653.

Pernica, G., Allen D. E. (1982). Floor vibration measurements in a shopping centre. Structures section, Institute for Research in Construction National Research Council of Canada, Ottawa. Ont. Canada KIA ORG. v. 9, p.149-155.

Queiroz, G., Pimenta, R.J., Da Mata, L. A. C. (2001). Elementos das estruturas mista aço-concreto. O Lutador. Belo Horizonte.

Smith, A. L., Hicks, S. J., Devine, P. J. (2009). Design of Floors for Vibration: A New Approach, Steel Construction Institute.

Stevenson, R. (1821). Description of bridges of suspension. Edinburgh Philos. J., v. 10, p. 237-256.

Tredgold T. (1853) Elementary principles of carpentry. London. C. F. Hodgson. New York.

Wyatt T.A.(1989). Design guide on the vibration of floors. The Steel Construction Institute London.

A REVIEW ON VIBRATIONS OF STEEL FLOOR SYSTEMS UNDER HUMAN-INDUCED LOADS

Abstract

The new architectural trends and market requirements have enabled the engineering to use structures that achieve large spans with a minimum number of columns, thereby allowing greater architectural flexibility. This design philosophy has led the structural elements to become more slender and with natural frequencies increasingly lower, thus closer to the frequency bands of dynamic excitations related to human rhythmic activities. Thus, assessing the limit state of excessive vibration and the acceptance criteria for human comfort become more relevant at the architectural design stage, even before the project elaboration. In this context, this article attempts to develop a survey on the historical research development of the dynamic behaviour of different steel floor systems and the main acceptance criteria standards to assess floor vibration.

Keywords: Excessive Vibrations; Floor Systems; Human Activities; Steel Structures;

1 Introduction

Most buildings are subject to significant dynamic loads due to human activities that can cause excessive vibrations, which may compromise occupants comfort. For this reason, the influence of dynamic loading during the structural design is a concern for some researchers since the 19th century, such as Stevenson (1821), Tredgold (1853) and Johnson (1905). From the twentieth century onwards, researches had intensified in order to understand the human dynamical loading and its influence on structural calculations. Specific design guidelines for floor vibrations have arisen with the purpose of evaluating the acceptability of floors regarding human comfort. Cases that involve floor vibration induced by human activities have been even more frequent these days. This may be related to the fact that the natural frequencies of the current structural elements are increasingly lower, therefore, closer to the frequency ranges of the dynamic excitations associated with human activities.

This fact is mainly related to:

- a) the use of structures capable of achieving large spans with a minimum number of columns;
- b) the appearance of more resistant materials, which enable the use of structural elements with smaller sections area and consequently greater slenderness for the same element length;
- c) the availability of software's that contribute to optimize projects economically.

In order to formulate a basis for future researches related to the whole issue, this article presents a survey of the literature development related to the dynamic behaviour of floor systems used in steel structures and its acceptance criteria related to the subject in question.

2 Dynamic behaviour of steel floor systems

The floor systems covered in this state of the art are mainly composed of steel beams as well as composite beams and composite slabs.

One of the pioneers in the dynamic analysis of steel structures was Pernica and Allen (1982). They carried out measurements on five floors of a shopping mall. Considering the occupation type of the floor as a walking area, the human comfort criteria were met according to the Canadian standard.

Loose (2008) aimed to evaluate the behaviour of composite floors of steel and concrete when induced by dynamic loads from human rhythmic activities, such as aerobics and free jumping.

Two load models were adopted. First, using a mathematical function that incorporates parameters obtained experimentally by Spark (2003). The other loading model was represented by a Fourier series function. In most of the results found, maximum accelerations were higher using the second loading type than the first one.

Mello et al. (2008) also contributed to the investigation of the dynamic effects caused by human walking loading. They analysed a single-story structure with composite beams, concrete slab and steel columns (Figure 1). Mello et al. (2008) concluded that the load models with spatial variation, i.e. considering the walk movement besides its time variation, produced greater accelerations than the loads without spatial variation and the limit criteria values. Hence, it has emphasized that the variation of the load in the space plays an important role in the evaluation of dynamic effects on structures.

De Silva and Thambiratnam (2009) determined the dynamic characteristics of a multi-panel floor system subjected to dance using finite element techniques. The results indicated the occurrence of multi-modal vibration in these structures and the influence of each type of activity on it. Vibration from higher load harmonics caused human's discomfort and excessive displacement of floor panels.

Parnel, Davis and Xu (2010) studied the dynamic behaviour of a floor systems composed of cold formed steel section. Further, 23 floor systems were constructed and analysed in the laboratory. Regarding the type of floor, they compared the oriented-strand board to the FORTACRETE without lightweight concrete topping. It was found that the FORTACRETE presented higher fundamental frequency and lower displacements, because it presents more stiffness than the OSB. In addition, they also found that the FORTACRETE without lightweight concrete topping when compared to the composite steel deck slab with concrete topping had presented lower fundamental frequency and higher displacements. Regarding the conception condition, the balloon and platform end-framing condition had an increase in the fundamental frequency and reduction of displacements compared to the simply supported condition. However, in the simply supported condition, damping rates were higher. Acceleration responses due to walking load were also analysed in all floor systems and all of them were at acceptable levels when compared to ISO 2631-2:1989.

Dietrich et al. (2014) studied the dynamic behaviour of two types of floor systems (reinforced concrete slabs supported by steel beams and steel floor plates supported by steel beams) subjected to walking activity. It was observed that the fundamental frequencies calculated by the analytical method are, for the most part, slightly smaller than the fundamental numerical frequencies, thus constituting a reliable analytical simplification for the determination of the fundamental frequency for this type of floor. It was also concluded that, in terms of accelerations, the values calculated by the analytical method were considerably higher than those of the numerical model, showing that the formulation of Murray, Allen and Ungar (2003) presents a reasonable margin of safety.

Moreover, Costa-Neves et al. (2014) analysed the limit state for excessive vibrations of multi-story buildings with composite slabs under aerobic activities. The results obtained for the peak accelerations were compared with the limit values for human comfort prescribed by ISO 2631-2:1989 and by Murray, Allen and Ungar (2003), and in some situations the numerical values exceeded the limit values. Thus, they showed that vibrations due to rhythmic activities are an important limit state and should be analysed concomitantly with the other design checks.

Campista, Gaspar and Silva (2015) evaluated the dynamic behaviour of a composite building under rhythmic human activities. The mathematical function that represent the human activities load is described by two different approaches proposed by Faisca (2003), Ellis and Littler (2004) and Smith, Hicks and Devine (2009). The dynamic response of the system was obtained in terms of peak accelerations, *r.m.s.* and VDV. According to the results, it was found that the system had levels of vibration that would compromise the users comfort.

3 Comfort criteria for human beings regarding vibrations

Having a simple and accurate model for the dynamic loading due to human rhythmic activities, knowing the dynamic properties of the structures and having defined the level of human tolerance to the vibrations are all necessary requirements to verify the acceptability of floor systems under service conditions. In the next paragraph are shown sections on floor systems vibrations extracted from two national standards, from the American design guide by Murray, Allen and Ungar (2003), the British design guide by Smith, Hicks and Devine (2009) and the International standards: ISO 2631-1:1997, ISO 2631-2:2003 and ISO 10137:2007.

Regarding the Brazilian standards, ABNT NBR 6118:2014 recommends that the analysis of vibrations should be done in a linear regime in the case of the usual structures. The standard only recommends that in structures subject to vibration, the relation (Equation 1) between fundamental and critical frequency must meet the standard recommendations (Table 1). ABNT NBR 8800:2008 recommends that under no circumstances should the natural frequency be lower than 3.0 Hz. In addition, it provides parameters for a simplified evaluation of floor vibrations under human-induced load (Table 2).

Concerning to the design guide by Murray, Allen and Ungar (2003), the main objective is to provide simple analytical tools to evaluate steel floor systems and footbridges subjected to human-induced vibrations, such as rhythmic walking and aerobic activities. Firstly, the natural frequency is calculated, and then the peak acceleration. Finally, a human comfort scale (Figure 4) is used to determine whether the floor meets service requirements or not.

The design guide published by Smith, Hicks and Devine (2009) aims to provide a simple method for determining the r.m.s. acceleration of floor systems in order to compare it with the acceptability levels described in BS 6472:1992 and ISO 10137:2007 for building design as well as in the Health Technical Memorandum 08-01 standard for hospitals. The guide includes design orientation for floors using steel structural elements in rolled or cold formed steel sections and is particularly useful for structural arrangements that are usual in designs.

In the case of international standards, ISO 2631-1:1997 defines some methods to quantify periodic, random and transient vibrations in the whole-body regime, i.e. in standardized positions such as standing, seated or recumbent. In addition, it presents procedures for the evaluation of these vibrations effects on humans. Further, ISO 2631-2:2003 focuses on assessing the acceptable levels of human vibration exposure in relation to comfort. Finally, ISO 10137:2007 presents guidelines to assess the service limit state of excessive vibration in buildings and footbridges. It does not include bridges with vehicle traffic even in conjunction with pedestrian traffic, nor the design of foundations or structures supporting machines.

4 Conclusion

This paper has presented the current state-of-the-art dealing with the different aspects related to excessive vibrations due to human activities in floor systems. It is found that the whole issue is quite complex and still under-researched. However, the problem can be simplified by addressing three key aspects separately: the type of human-induced dynamic load, the different floor systems used in steel structures as well as their dynamic responses, and, finally, the effects of vibration on human beings, assessed by standards and design guides.

This literature review found that steel floor systems discussed in previous studies, which there is dynamic analysis using human-induced force, included constructive techniques that emerged from the middle of the 20th century. For instance, the composed beams and composed slabs of steel and concrete and the light steel framing system. All the references about their dynamic behaviour are recent, mainly because they have used the finite element method that is currently being used due to the technological advance of computer science. In addition, the use of such tools has enabled a

more reliable modelling of these floor systems. Therefore, for further advancements in this topic, the use of computer programs and high performance machines are fundamental.

Another aspect of this paper is related to the design guidelines that cope with the effect of vibrations on human beings, and it has analysed national and international references. The limitation of the natural frequencies by the Brazilian standards is strongly related to the risk of resonance. However, the real influence of dynamic loads in the human receivers is not measured in terms of floor frequency, but rather acceleration. Thus, the serviceability requirements of human comfort is not evaluated with this criterion. The international design guidelines discussed in this review have as their main purpose the analysis of human comfort in relation to vibrations. The design guide published by Murray, Allen and Ungar (2003) recommends that this analysis should be done by means of peak acceleration. Practical, it prescribes simplified equations for the calculation of accelerations of steel beam- or joist-supported floor systems. The Smith, Hicks, and Devine (2009) design guide uses the r.m.s. acceleration as its verification parameter and it brings two methods for the evaluation of steel floors. One uses finite element analysis and another a simplified procedure using equations and tables. The standards ISO 2631-1:1997, ISO 2631-2:2003 and ISO 10137:2007 propose a comparison of dynamic responses of structures with weighted frequency curves according to each effect of vibration on human beings. Thus, the acceptance criteria for human comfort is found in international standards and design guidelines, even though some of them provide only simplified load functions and few of them bring a method that deals with complex floor systems.

Finally, the whole issue has been presenting relevance for researchers in the field of construction since the beginning of the last century. However, advances still need to be made to make Brazilian standards more precise and reduce dependence on complementary foreign literature to assess the effect of vibrations on the human body. In addition, due to the recent technological advancement of computational systems it would also be possible to enhance the dynamic analysis of the floor systems built by now. Consequently, the standards and design guidelines could be improved with complex models of floor systems. As a result, structural designers would have a more extensive and accurate information related to the human comfort in buildings subjected to vibrations as well as to the proper performance of the structure against dynamic actions.