

Tema: Estruturas de aço e mistas de aço e concreto

UMA REVISÃO SOBRE VIBRAÇÕES DEVIDO A ATIVIDADES RÍTMICAS HUMANAS EM SISTEMAS DE PISO DE ESTRUTURAS DE AÇO*

Priscilla Izabel dos Santos Ribeiro¹
André Vasconcelos Soares Gomes²
Guilherme Guignone¹
Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani³
Walnório Graça Ferreira³

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 de pesquisas pertinentes à modelagem de cargas dinâmicas oriundas de atividades humanas e referentes ao comportamento dinâmico de diferentes sistemas de pisos utilizados em estruturas de aço. Ao final, o resultado dessa revisão é apresentado por meio de uma tabela cronológica que servirá como base para futuras pesquisas relacionadas ao tema.

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

A REVIEW ON VIBRATIONS DUE TO HUMAN RHYTHMIC ACTIVITIES IN FLOOR SYSTEMS OF STEEL STRUCTURES

Abstract

The new architectural trends and market requirements lead the engineering to use structures that can reach large spans with a minimum number of columns, thereby allowing greater architectural flexibility. This design philosophy has led the structural elements to become thinner and with natural frequencies increasingly low, thus closer to the frequency bands of dynamic excitations related to human rhythmic activities. Thus, checking the limit state of excessive vibration and the compliance with regulatory criteria for human comfort become relevant already at the architectural design stage even before the project elaboration. In this context, this article attempts to develop a survey of the historical development of research on the dynamic load models arising from human activities and the dynamic behavior of different floor systems used in steel structures. At the end, the result of this review is presented

* Contribuição técnica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

through a chronological table that serves as a consistent basis for future research related to the topic.

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

¹Arquiteto e Urbanista, Estudante de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

²Estudante de Graduação, Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

³Engenheiro Civil, Professor Doutor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

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. Em 1821, Stevenson [1] 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). Em 1853, Tredgold [2] 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 [3] 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 esbelteza 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 da modelagem das cargas dinâmicas oriundas das atividades humanas, do comportamento dinâmico de sistemas de pisos utilizados em estruturas de aço e de critérios normativos relacionados ao tema em questão. Por fim, essa revisão é apresentada por meio de uma tabela cronológica.

2 CARREGAMENTOS INDUZIDOS POR ATIVIDADES HUMANAS

Os sistemas de piso estão submetidos, em sua grande maioria, aos carregamentos oriundos das atividades de seus ocupantes. Os carregamentos dinâmicos induzidos pela ação humana podem ser divididos em dois grupos: carregamentos fixos, sem variação no espaço, somente no tempo, como o salto, o agachamento e outros e os carregamentos móveis, que variam no

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

espaço e no tempo, como a caminhada, a corrida, a dança e a marcha. Diversos estudos foram realizados a fim de assimilar esses carregamentos.

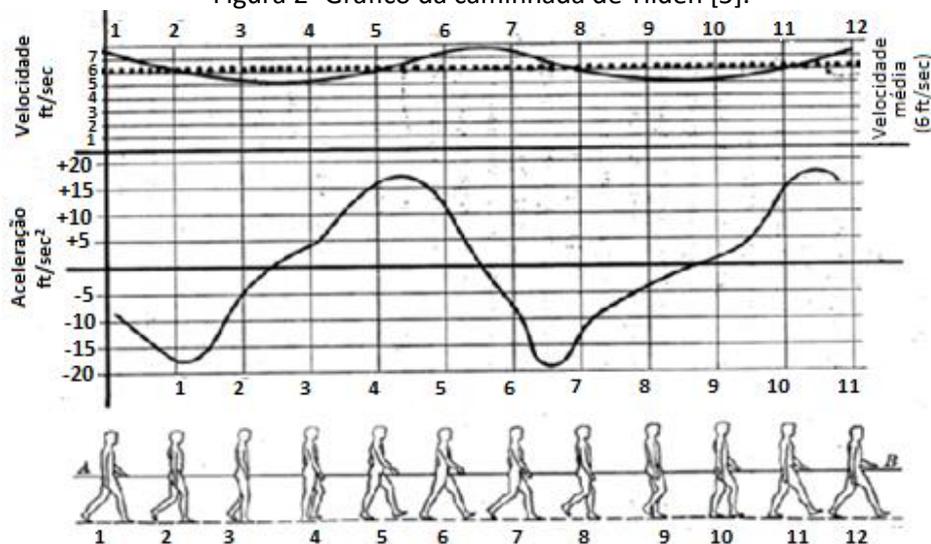
Conforme Lehmkuhl, Weiss e Smith [4], os precursores nesse campo foram o matemático alemão, Otto Fischer, e o anatomista, Wilhelm Braune, que calcularam trajetórias, velocidades, acelerações, forças e torques de articulações e segmentos em 31 fases do ciclo de marcha visando estabelecer a base científica da cinemática e a cinética da marcha humana.

Tilden [5] foi o pioneiro na quantificação experimental das cargas dinâmicas proveniente de atividade humana. Em seus experimentos considerou duas situações: o carregamento fixo com apenas o movimento vertical e o carregamento com a movimentação horizontal. Na primeira situação ele realizou testes com uma pessoa se agachando e se levantando sobre uma balança (Figura 1) e com uma pessoa sentada na cadeira e se levantando. No segundo caso, ele realizou testes com uma pessoa caminhando e correndo. No teste contemplando a caminhada, esboçou um gráfico (Figura 2) com a curva que representa a velocidade e a aceleração da ação.

Figura 1 - Teste experimental de agachamento realizado por Tilden [5].



Figura 2- Gráfico da caminhada de Tilden [5].

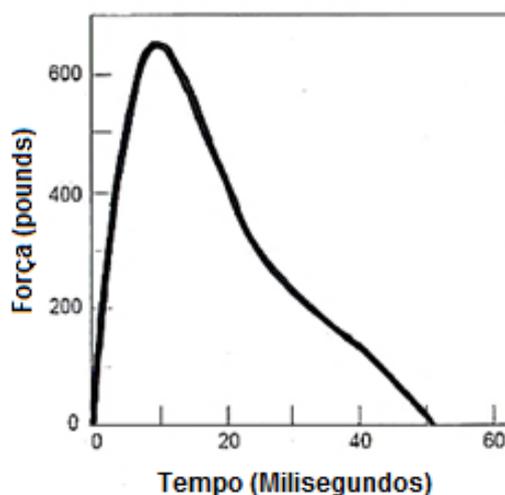


Em seguida, Fuller *apud* Ebrahimpour e Sack [6] quantificou experimentalmente o efeito dinâmico de uma multidão em um mezanino de ginásio.

Elftman *apud* Lehmkuhl, Weiss e Smith [4] construiu uma plataforma de carga para pessoas caminharem e por meio das reações dos apoios pôde-se determinar as magnitudes da ação dinâmica da caminhada. A plataforma era composta por uma placa de aço de aproximadamente 1m² apoiada por quatro pequenos pilares. Em cada um dos pilares foram instaladas células de carga para medir a variação da reação nesses pontos, portanto foi possível determinar a magnitude e a direção das forças transmitidas à superfície de apoio, denominadas forças de reação do piso.

O teste do impacto do calcanhar também pode ser usado para representar o modelo de carregamento das forças do movimento da caminhada. Essa carga é considerada a principal fonte de excitação durante o movimento da caminhada e produz uma resposta transiente, uma aplicação de força instantânea no sistema. Sua representação gráfica (Figura 3) foi ilustrada por Ohmart [7] em experimentos, onde os impactos individuais de seu calcanhar sobre o piso, depois de elevá-los a uma altura correspondente a seu peso foram medidos.

Figura 3 – Função do teste impacto do calcanhar [7].



Murray e Hendrick *apud* Mello *et al.* [8] também realizaram testes do impacto do calcanhar em diferentes tipos de construções como: salões de igrejas, lajes de shopping centers, lajes das varandas de um hotel e lajes de um edifício comercial. Com esses resultados, as repostas dinâmicas puderam ser determinadas em termos da magnitude de força, frequências e amortecimento.

Greimann and Klaiber [9] registraram os deslocamentos e as demais repostas dinâmicas durante os jogos de futebol americano no *Iowa State University* e deduziram uma função aproximada para multidões em estádios.

Ohlsson *apud* Wyatt [10] mostrou em seu trabalho um registro experimental típico da variação no tempo da força de contato com uma superfície produzido por um passo expresso pela correspondente medição da reação resultante do piso (Figura 4). Essa figura também contém uma função matemática da reação do piso, aproximada por uma série de *Fourier* com três termos, definida pela Equação 1, na qual considera a parcela estática associada ao peso da pessoa e três ou quatro componentes harmônicos da excitação. Os termos da série de *Fourier* que compõem a função aproximada da Figura 4 estão representados graficamente na Figura 5.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

$$F_p(t) = G + \sum_{i=1}^n G \alpha_i \text{sen}(2\pi i f_p t - \phi_i) \quad (1)$$

onde G é o peso da pessoa, α_i o coeficiente de Fourier do i -ésimo harmônico, $G \cdot \alpha_i$ a amplitude da força do i -ésimo harmônico, f_p a frequência da atividade (Hz), ϕ_i o atraso de fase do i -ésimo harmônico relativo ao primeiro harmônico, i o número do i -ésimo harmônico e n o número total das contribuições harmônicas.

Figura 4 - Força de contato do passo e reação do piso devido a caminhada [10].

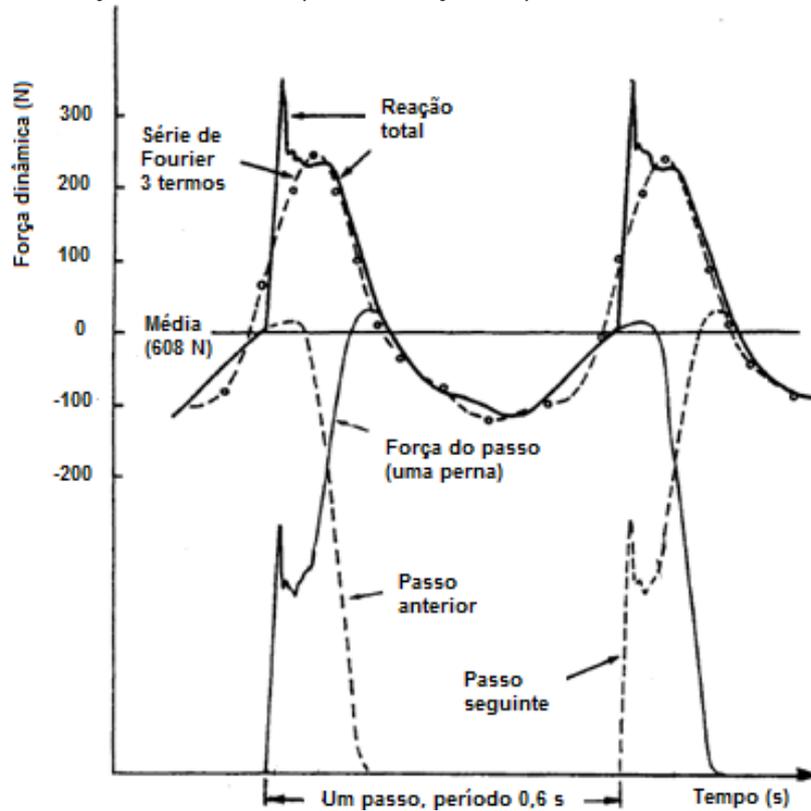
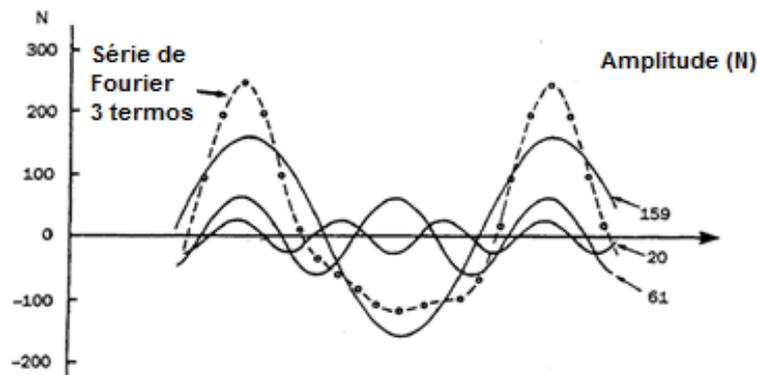


Figura 5 - Componentes harmônicas da série de *Fourier* para caminhada [10].

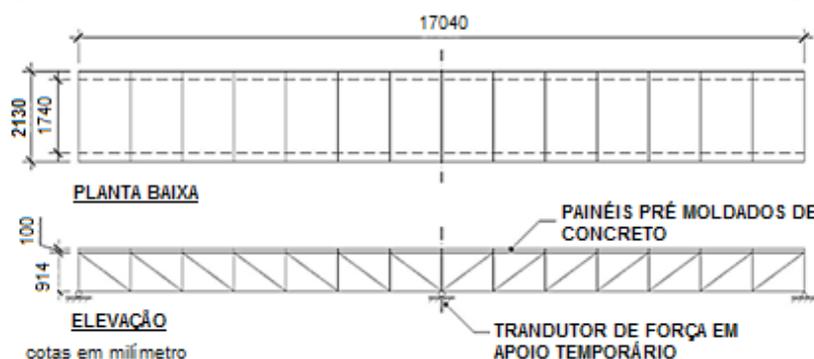


* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Tuan e Saul [11] definiram valores de pico de carregamentos a partir do registro das respostas dinâmicas de alguns movimentos, como sentar, levantar e saltar, com 22 pessoas, sendo uma por vez, em uma pequena plataforma piezoelétrica de força com dimensão de 60cm x 40cm. Rainer, Pernica e Allen [12] contribuíram propondo modelos de carregamento a partir de dados experimentais de pessoas caminhando, correndo e pulando. Foi utilizada uma plataforma de força sofisticada (Figura 6) com 17m de comprimento e com células de carga em um centro de suporte para registrar as forças de reação do solo transmitidas pelo pé. Em seguida, calcularam-se os picos de aceleração e compararam-se com os valores laboratoriais e com a norma britânica BS 5400:1978 [13].

Ebrahimpour e Sack [14] propuseram modelos probabilísticos objetivando estimar carregamentos dinâmicos de uma pessoa e de pequenos grupos de pessoas. A ideia principal era obter uma estimativa confiável da carga dinâmica de um grupo de pessoas através da combinação de forças de cada indivíduo. Para efeito, construíram uma plataforma com dimensões de 1,2m por 2,4m para medir as cargas fixas por indivíduos e grupos de duas e quatro pessoas. A partir desses dados experimentais, pôde-se comparar com dados simulados por programas de computador. Nesses programas, eles utilizaram uma série de *Fourier* para modelar o carregamento periódico e funções de decaimento logarítmico para o carregamento impulsivo como um salto e, assim, descrever analiticamente as cargas dinâmicas geradas por pessoas. Além disso, sugeriram que o controle do nível de vibração de uma estrutura poderia ser analisado pela função do carregamento do grupo de pessoas obtida a partir do carregamento dinâmico de um indivíduo. Sendo assim, foi estimada a área ocupada por indivíduo e estabelecida a intensidade de carga por pessoa em função do número de pessoas envolvidas.

Figura 6 - Plataforma de força utilizada por Rainer, Pernica e Allen [12].



Em um estudo posterior, os pesquisadores Ebrahimpour e Sack [15] construíram um sistema de piso de 3,7m por 4,6m com o objetivo de avaliar a acurácia dos modelos de cargas e os programas de computador desenvolvidos nos estudos anteriores. Com essa plataforma, foi possível medir a força de até quarenta pessoas executando movimentos harmônicos fixos. Com isso, puderam sugerir cálculo simplificado para critérios de resistência e de serviço para movimentos harmônicos de humanos.

Em outro estudo, Ebrahimpour *et al.* [16] apresentaram uma proposta semelhante para o estudo de carregamentos dinâmicos de atividades humanas variando no tempo e no espaço, tais como caminhada e corrida. Para isso, construíram uma plataforma de 14,2m de comprimento e 2,0m de largura projetada para medir o registro de pessoas caminhando

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

sozinhas e de grupos de duas e quatro pessoas. Analogamente ao estudo do salto, testes com uma pessoa foram utilizados para caracterizar estatisticamente o carregamento por indivíduo. Os testes com duas pessoas, por sua vez, quantificavam a coerência de movimento entre os indivíduos, e os testes com grupos de quatro pessoas para verificar os modelos de carregamentos e os resultados das simulações.

Outra contribuição foi dada também por Alves [17] ao construir uma plataforma rígida de concreto de dimensões 1,15m por 4,15m. Essa plataforma foi usada para analisar as cargas dinâmicas induzidas por pessoas em atividades com ou sem perda de contato entre o indivíduo e a estrutura, tais como: andar, correr e pular. Com os dados obtidos nesses experimentos, Alves [17] pôde ajustar estatisticamente os modelos de carregamento que propôs para essas atividades. Esse modelo, descrito pela Equação 2, foi expresso em termos de uma série de *Fourier*, relacionando um desses termos com o coeficiente de impacto, o tempo de contato do indivíduo com a estrutura e o período de carregamento. O coeficiente de impacto foi definido como a razão entre a amplitude máxima da força dinâmica e da força estática. Esse coeficiente de impacto bem como a razão entre o tempo de contato e o período de carregamento foram obtidos por meio de formulação matemática e ajustes estatísticos para cada atividade analisada. Logo em seguida, Alves [17] usou os resultados experimentais obtidos e os modelos analíticos estudados para concluir que a forma mais conveniente de representar o carregamento humano seria através da utilização de coeficientes de Fourier constantes para cada um dos harmônicos que descrevem o carregamento, conforme indicado na Tabela 1. Além disso, comparou tais resultados com os disponibilizados pelo *Comité Euro-International du Beton* (CEB) [18] (Tabela 1), que publicou em 1991 um boletim com recomendações de diversos tipos de cargas dinâmicas usadas em projetos de estruturas. A partir dessa comparação, Alves [17] verificou que seus resultados estavam bem próximos aos recomendados pelo boletim, exceto aqueles encontrados para a atividade correr, que apresentou coeficientes sensivelmente menores para os três harmônicos.

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{2\pi n t}{T} t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{2\pi n t}{T} t \quad (2)$$

onde os termos a_0 , a_n e b_n podem ser obtidos por pelas Equações 3, 4, 5 e 6.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt \quad (3)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cos \frac{2\pi n t}{T} dt \quad (4)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \sin \frac{2\pi n t}{T} dt \quad (5)$$

$$a_n = \frac{2k_p \left(\frac{T}{t_c}\right)}{\pi \left[\left(\frac{T}{t_c}\right)^2 - 4n^2\right]} \sqrt{2 \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi n t_c}{T}\right)\right)} \quad (6)$$

onde k_p é o coeficiente de impacto, t o tempo, T o período de carregamento, t_c o tempo de contato do indivíduo com a estrutura e n o número associado ao coeficiente de *Fourier*.

Faísca [19] analisou as cargas dinâmicas de atividades, ritmadas e não ritmadas, tais como o salto, ginástica aeróbica, torcidas de futebol e plateias de show. Para isso, foi construída uma plataforma de dimensões 2,20m por 12,20m com apoios móveis realizando experimentos com estrutura rígida e flexível. A partir dos resultados, foram ajustadas funções de carregamento para as atividades, sendo que as mesmas podem ser utilizadas em projetos que abriguem

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

grandes multidões. Faísca [19] verificou que uma função do tipo *Hanning*, conforme Equação 7, para o período em contato com a plataforma se ajustou melhor aos resultados experimentais e propôs que esta função fosse multiplicada pelos coeficientes K_p e CD para obtenção da força dinâmica normalizada mostrada na Figura 7. O coeficiente de impacto K_p foi determinado estatisticamente com os resultados dos experimentos e seus valores recomendados estão na Tabela 2. O coeficiente de defasagem CD está relacionado com o efeito de grupo, isto é, o efeito de atenuação na resposta de uma carga dinâmica devido à defasagem entre o movimento dos indivíduos do grupo. Esse coeficiente foi uma grande contribuição de Faísca [19] para o tema, e os resultados obtidos foram apresentados na Figura 8 para as atividades de saltos à vontade, ginástica aeróbica e show/torcida.

$$F(t) = (0,5 - 0,5 \cos \omega t) \quad (7)$$

onde ω é a frequência natural da estrutura e pode ser obtido pela Equação 8.

$$\omega = \frac{\pi}{T_c} \quad (8)$$

onde T_c é o tempo em contato com a estrutura.

Tabela 1 – Coeficientes de *Fourier* associados aos três primeiros harmônicos [17].

Atividade	Coeficiente de Fourier					
	1º	2º	3º	1º	2º	3º
	Harmônico - Exp.	Harmônico - Exp.	Harmônico - Exp.	Harmônico - CEB	Harmônico - CEB	Harmônico - CEB
Correr	1,35	0,25	0,13	1,60	0,70	0,20
Pular	1,80	1,19	0,51	1,80	1,30	0,70
Andar	0,34	0,11	0,11	0,40	0,10	0,10

Figura 7 - Função proposta por Faísca [19].

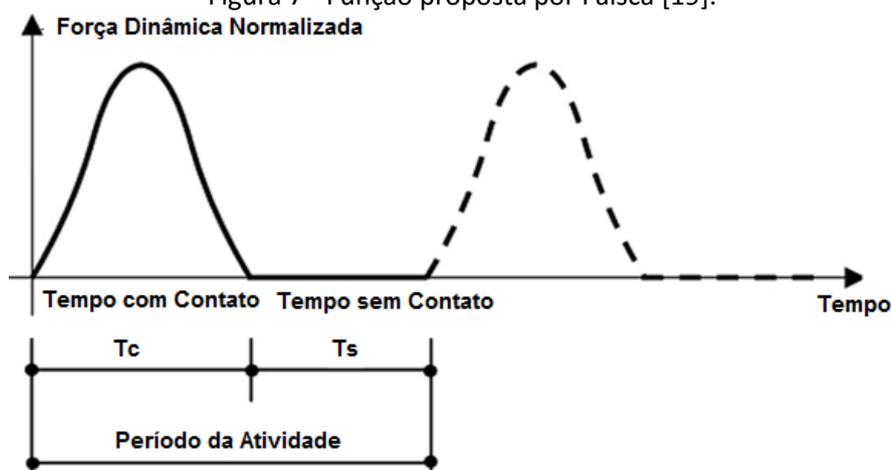
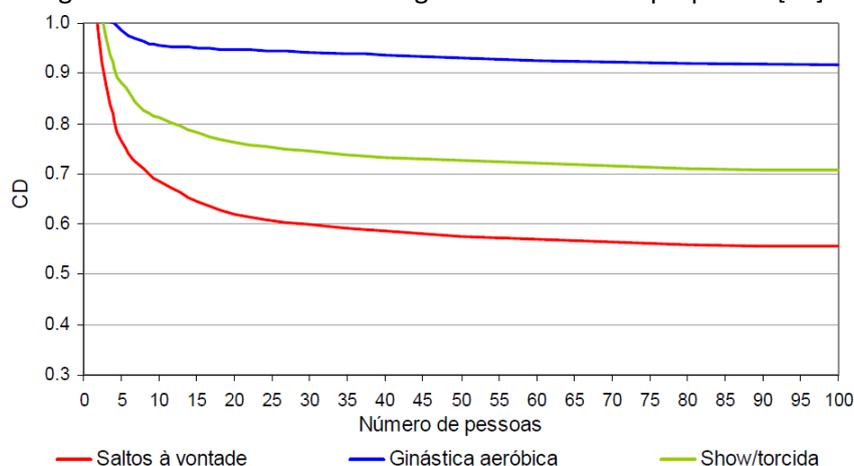


Tabela 2 - Parâmetros experimentais utilizados em atividades rítmicas [19].

Atividades	T (s)	T_c (s)	K_p
Saltos à vontade	$0,44 \pm 0,15$	$0,32 \pm 0,09$	$3,17 \pm 0,58$
Ginástica Aeróbica	$0,44 \pm 0,09$	$0,34 \pm 0,09$	$2,78 \pm 0,60$
Show/torcida	$0,37 \pm 0,03$	$0,37 \pm 0,03$	$2,41 \pm 0,51$

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Figura 8 - Coeficiente de defasagem das atividades propostas [19].



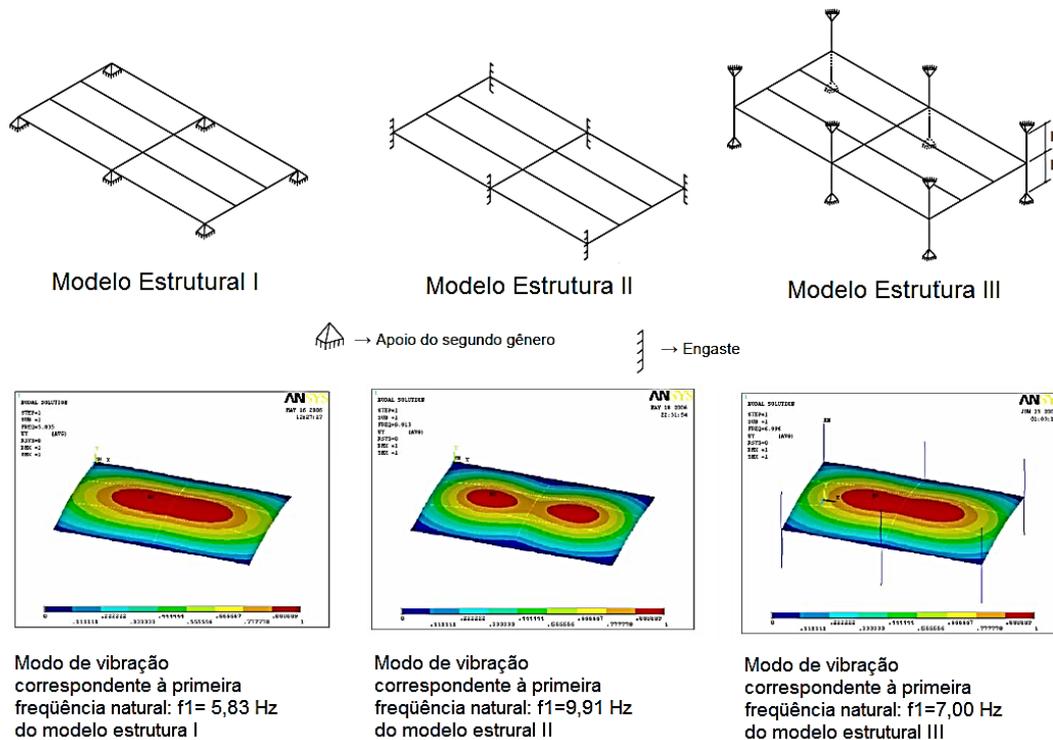
3 COMPORTAMENTO DINÂMICO DE SISTEMAS DE PISOS UTILIZADOS EM ESTRUTURAS DE AÇO

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*) [20]. Também, são abordados sistemas de piso compostos por vigas em perfis leves do tipo *light steel framing* e lajes em painel OSB, placas cimentícias ou mistas de aço e concreto. Uns dos pioneiros na análise dinâmica em estruturas em aço foram Pernica e Allen [21]. 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 [22] 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 [19], 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 [23]. 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 (Figura 9). 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.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Figura 9 – Modelos estruturais e respectivos modelos de vibração correspondente à frequência natural estudados por Loose (adaptado de [22]).

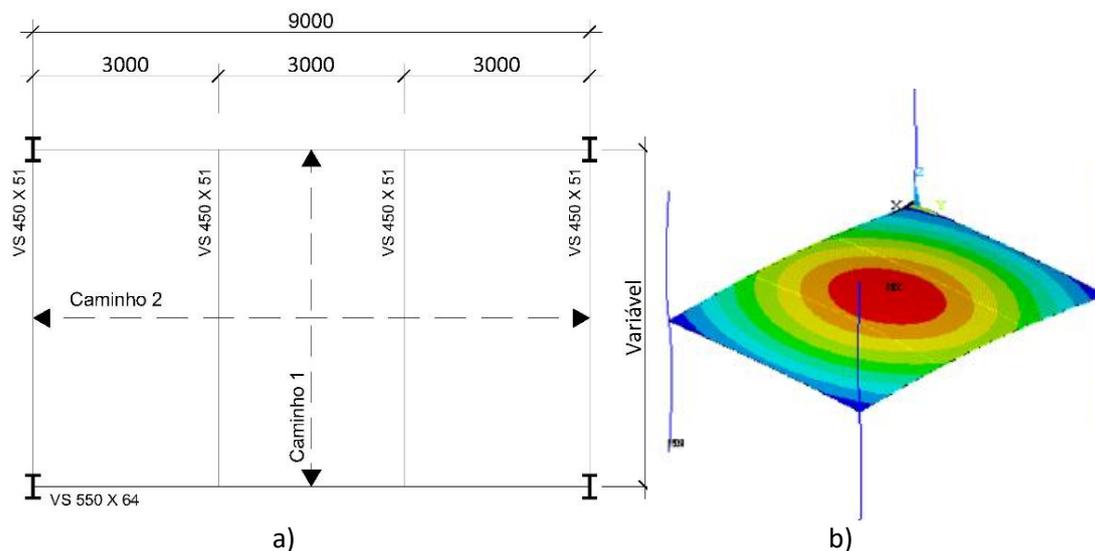


Mello *et al.* [8] contribuíram também na investigação dos efeitos dinâmicos causados por carregamento humano devido à caminhada. Por meio de análise numérica no *software* ANSYS, a estrutura de um piso com vigas mistas de aço e concreto, laje maciça de concreto e pilares de aço (Figura 10a) foi analisada e teve os seus primeiros modos de vibração determinados, conforme mostra a Figura 10b. 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 10a), 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 [23] e os valores limites da ISO 2631-2:1989 [24], uma das conclusões de Mello *et al.* [8] 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 [25] 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.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

Figura 10 – a) Layout do sistema estrutural estudado por Mello (cotas em milímetros) [8]. b) Modo de vibração associada a primeira frequência natural, $f_n = 7,42$ Hz [8].



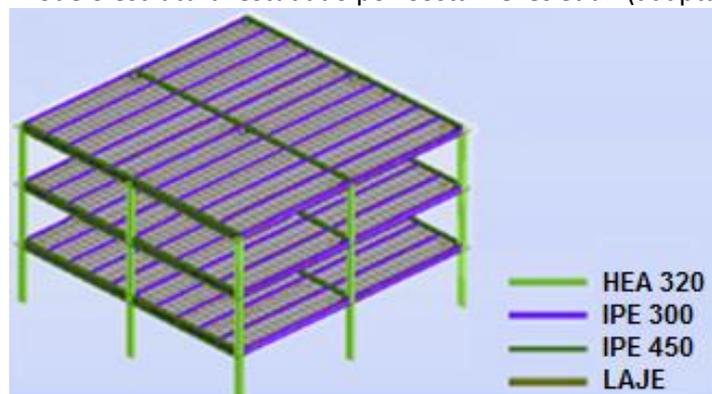
Parnel, Davis e Xu [26] estudaram o comportamento dinâmico de sistemas de piso compostos por perfis formados a frio. Foram construídos e analisados 23 sistemas de piso no laboratório na Universidade de Waterloo, 8 sistemas de piso na Dietrich Design Group e 12 sistemas de piso em edifícios residenciais. 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 (*Oriented Strand Board*), 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 apertada 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 [24].

Dietrich *et al.* [27] 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 [23]. 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

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

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 [23] apresenta uma razoável margem de segurança. Costa-Neves *et al.* [28] analisaram o estado limite de vibração excessiva de lajes mistas de edifícios de múltiplos andares e vãos (Figura 11) 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 Faisca [19]. 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 [24] e por Murray, Allen e Ungar [23], sendo que em algumas situações os valores numéricos ultrapassaram os valores limites. Dessa forma, Costa-Neve *et al.* [28] mostraram que as vibrações devido às atividades rítmicas é um estado limite importante e deve ser analisado concomitantemente com as demais verificações de projeto.

Figura 11 - Modelo estrutural estudado por Costa-Neves *et al.* (adaptado de [28]).



4 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS DE PROJETO

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 [29] e ABNT NBR 8800:2008 [30]), do guia de projeto americano de Murray, Allen e Ungar [23] e de duas normas internacionais direcionadas para o tema em questão (ISO 2631-1:1997 [31] e ISO 2631-2:2003 [32] e BS 6841:1987 [33]).

* Contribuição científica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

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

Segundo a norma brasileira NBR 6118:2014 [29], 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. Quanto à relação entre f e f_{crit} , a norma recomenda que seja:

$$f > 1,2f_{crit} \quad (9)$$

Além disso, a norma indica que nos casos especiais em que as prescrições recomendadas não os atendam, o projetista poderá recorrer as normas internacionais para uma avaliação mais apurada.

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

Conforme a norma NBR 8800:2008 [30], em nenhum caso é permitido uma frequência natural da estrutura do piso inferior a 3,0 Hz.

Para uma avaliação precisa, a NBR 8800:2008 [30] recomenda uma análise dinâmica visando evitar problemas com vibrações em pisos, levando-se em conta:

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

A ABNT NBR 8800:2008 [30] fornece parâmetros para uma avaliação mais simplificada para vibrações de piso induzidas por atividades humanas (Tabela 3), entretanto deixa claro que a avaliação simplificada pode não ser uma avaliação adequada para o problema.

Tabela 3 - Parâmetros para uma avaliação simplificada segundo a NBR 8800:2008 [30].

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 repetitiva.	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.

Para obtenção de procedimentos de avaliação considerada precisa, a NBR 8800:2008 [30] direciona o leitor à literatura internacional: Wyatt [10], CEB [18], Murray *et al.* [23], dentre outros.

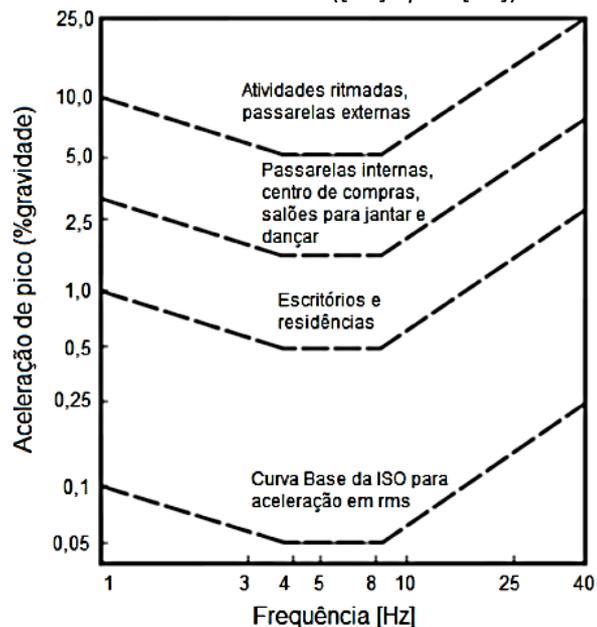
4.3 Guia de Projeto de Murray, Allen e Ungar (2003): *Floor Vibrations Due to Human Activity*

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. Calcula-se,

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

primeiramente, a frequência natural, seguida da aceleração de pico. Uma escala de conforto humano (Figura 12) é utilizada para determinar se o piso atende aos requisitos de serviço. O guia apresenta critérios de projeto para carregamentos dinâmicos de atividades humanas rítmicas e carregamentos dinâmicos de equipamentos mecânicos.

Figura 12 - Aceleração de pico recomendada para conforto humano para vibrações devido a atividades humanas ([23] *apud* [24]).



4.3.1 Frequência fundamental do piso

Para uma viga simplesmente apoiada, com uma carga uniformemente distribuída, a frequência natural fundamental pode ser obtida pela Equação 10.

$$f_n = \frac{\pi}{2} \left[\frac{gEI_t}{wL^4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

onde f_n é a frequência natural fundamental (Hz), g a aceleração da gravidade, $9,81 \text{ m/s}^2$, E o módulo de elasticidade do aço, I_t o momento de inércia transformado; momento de inércia transformado efetivo caso as deformações de cisalhamento sejam incluídas, w a carga uniformemente distribuída por unidade de comprimento (carga nominal, não a de projeto) e L o vão do elemento.

A Equação 10 pode ser reescrita como a Equação 11.

$$f_n = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta}} \quad (11)$$

onde a flecha (Δ) é obtida pela Equação 12.

$$\Delta = \left(\frac{5wL^4}{384 EI_t} \right) \quad (12)$$

Caso as vigas secundária e principal forem consideradas simplesmente apoiadas, a relação de Dunkerley pode ser reescrita conforme a Equação 13.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

$$f_n = 0,18 \sqrt{\frac{g}{(\Delta_j + \Delta_g)}} \quad (13)$$

onde Δ_j é a flecha do painel da viga secundária devido à carga suportada e Δ_g a flecha do painel da viga principal devido à carga suportada.

A frequência natural do piso (modo combinado) é obtida pela relação de Dunkerley (Equação 14).

$$\frac{1}{f_n^2} = \frac{1}{f_j^2} + \frac{1}{f_g^2} \quad (14)$$

onde f_j é a frequência do painel da viga secundária e f_g a frequência do painel da viga principal. A carga distribuída, w , utilizada no cálculo da flecha deve ser quantificada com muito cuidado. Devem ser utilizadas as sobrecargas que atuam no momento da ação dinâmica, e não as de projeto. Como referência para sobrecarga, pode-se citar os seguintes valores:

- 0,5 kN/m² para escritórios que contêm mesas, armários de arquivos, estantes, entre outros. Caso estes itens não estejam presentes, esse valor pode ser reduzido;
- 0,25 kN/m² para residências;
- 0 kN/m² (ou próximo a zero) para passarelas, ginásios e pisos de shopping centers.

4.3.2 Aceleração de Pico

O critério é baseado na resposta dinâmica de sistemas de piso com vigas de aço para forças dinâmicas da caminhada e pode ser usado para avaliar sistemas de piso de escritórios, shoppings centers, passarelas e ocupações similares. Tem como princípios:

- Limite de aceleração como recomendado pela ISO 2631-2:1989[24], ajustado para a intenção da ocupação.
- Utilização do carregamento da caminhada como uma única componente harmônica dependente do tempo cuja frequência se iguala à frequência fundamental do piso, de acordo com a Equação 15. Somente uma componente é utilizada uma vez que todas as outras vibrações harmônicas são pequenas comparadas ao harmônico associado à ressonância.

$$F_i = P \alpha_i \cos(2\pi i f_n t) \quad (15)$$

onde P é o peso da pessoa, toma-se 0,7 kN para projeto, α_i o coeficiente dinâmico para a enésima componente força harmônica, i o múltiplo harmônico para frequência do passo e f_n a frequência fundamental do piso.

Valores recomendados para α_i estão presentes no guia.

A função da aceleração para o carregamento ressonante tem a forma apresentada pela Equação 16.

$$\frac{a}{g} = \frac{R \alpha_i P}{\beta W} \cos(2\pi i f_{step} t) \quad (16)$$

onde a/g é a relação entre a aceleração do piso e a aceleração da gravidade, R o fator de redução, β a taxa de amortecimento modal e W o peso efetivo do painel.

O fator de redução R leva em conta o fato de que o pleno movimento ressonante do estado estacionário não é alcançado para a atividade da caminhada e que a pessoa que caminha e a pessoa perturbada não estão simultaneamente no local de máximo deslocamento modal. Assim,

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

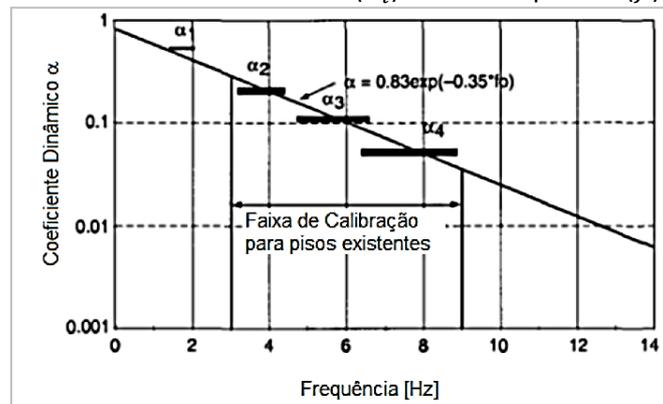
é recomendado utilizar um fator de redução de 0,7 para passarelas e 0,5 para estruturas de piso com modos de vibração bidirecionais.

Para finalidade de projeto, a Equação 16 pode ser simplificada substituindo o coeficiente dinâmico, α_i , pelo valor obtido pela expressão $\alpha = 0,83\exp(-0,35f)$, conforme Figura 13, com essa substituição, é obtido o critério de projeto expresso pela Equação 17.

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(-0,35f_n)}{\beta W} < \frac{a_0}{g} \quad (17)$$

onde $\frac{a_p}{g}$ é a relação entre a aceleração de pico estimada e a aceleração da gravidade, $\frac{a_0}{g}$ a relação entre as acelerações limite fornecidas pela Figura 12, f_n a frequência natural da estrutura do piso e P_0 a força constante igual a 0,29 kN para pisos e 0,41 kN para passarelas.

Figura 13 - Coeficiente Dinâmico (α_i) versus frequência (f) [23].



O numerador $P_0 \exp(-0,35f_n)$ da Equação 17 representa a força harmônica efetiva devido à ação da caminhada e resulta numa resposta ressonante na frequência natural do piso, f_n . Os valores limites P_0 , β e a_0/g e recomendados para ocupações em geral são fornecidos pelo guia. Essas recomendações podem ser aplicadas a sistemas cuja faixa de frequência natural esteja entre 3 Hz e 20 Hz.

4.4 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

* Contribuição científica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

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 [31] formula um procedimento para quantificar e avaliar as vibrações no corpo inteiro de um indivíduo relacionando com possíveis efeitos.

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

4.5 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 [31] 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 [31]. Além disso, a ISO 2631-2:2003 [32] apresenta em seu anexo “B” um guia para coleta de dados da resposta humana às vibrações de construções. Portanto, a ISO 2631-2:2003 [32] 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 [31].

4.6 BRITISH STANDARDS INSTITUTION 1987 BS 6841. *Measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical and repeated shock.*

Essa norma é muito similar à ISO 2631-1:1985 [34]. Oferece métodos para quantificar e avaliar as vibrações em relação a saúde humana, a interferência em atividades, a probabilidade de percepção e a incidência de enjoo. Para a medição da magnitude de vibração, a norma estabelece as unidades de medida, as direções do efeito da vibração no corpo humano, a localização dessa medição e as frequências ponderadas de acordo com o eixo de vibração e o seu efeito. A unidade de medida adotada para expressar a magnitude de vibração é a *weighted root-mean-square acceleration* (aceleração ponderada pela raiz média quadrática) em m/s^2 para vibração translacional e rad/s^2 para rotacional, semelhante à ISO 2631-1:1985 [34]. As direções possíveis para medição, assim como na ISO 2631-1:1985 [34], são as três direções ortogonais considerando a pessoa com o corpo sentado, em pé ou deitado. Para a avaliação das vibrações, a norma disponibiliza guias em relação aos diferentes efeitos das vibrações para o ser humano. Os quatro efeitos principais considerados nessa norma são: degradação da saúde, comprometimento de atividades, comprometimento do conforto e enjoo ao movimento. Além disso, são fornecidos quatro anexos (anexo “A”, “B”, “C” e “D”) que visam dar mais informações sobre a magnitude da vibração para cada efeito citado. Portanto, assim como a ISO 2631-1:1985 [34], a norma propõe um guia para medir a magnitude das vibrações em uma estrutura e em seguida avaliar a sua aceitabilidade para uso de acordo com os possíveis efeitos ao ser humano.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

5 TABELA CRONOLÓGICA DO ESTADO DA ARTE

De forma resumida, a tabela 4 mostra o levantamento do estado da arte, em ordem cronológica, das pesquisas relacionadas a vibrações induzidas por atividades humanas em estruturas de aço. A tabela se divide em duas principais linhas de pesquisa, a primeira referente à determinação do histórico no tempo das funções de carregamento oriundas de atividades humanas rítmicas e a segunda referente ao estudo do comportamento dinâmico de estruturas de aço e mistas de aço e concreto, considerando vibrações induzidas por esses carregamentos.

Tabela 4 – Levantamento Cronológico do Estado da Arte.

Ano	Autores	Contribuição
Carregamento Dinâmico		
1821	Stevenson	Ressaltou que somente as cargas estáticas não eram suficientes na concepção de estruturas submetidas a cargas dinâmicas.
1853	Tredgold	Propôs especificações construtivas para prevenir vibrações excessivas.
1895	Fischer e Braune	Calcularam trajetórias, velocidades, acelerações, forças e torques de articulações e segmentos em 31 fases do ciclo de marcha.
1905	Johnson	Definiu valores de carregamentos estáticos em caso de estruturas concebidas para multidões, entretanto não considerou os efeitos dinâmicos.
1913	Tilden	Pioneiro na quantificação experimental das cargas dinâmicas: “ <i>in situ</i> ” e em movimento.
1924	Fuller	Quantificou experimentalmente o efeito dinâmico de uma multidão.
1938	Elftman	Construiu uma plataforma de carga para pessoas caminharem, visando determinar a magnitude e a direção das forças transmitidas à superfície de apoio, denominadas de forças de reação do piso.
1968	Ohmart	Representou o carregamento através do impacto do calcanhar.
1977	Murray e Hendrick	Realizaram o teste do impacto do calcanhar em diversos locais visando a determinação das forças dinâmicas.
1978	Greimann and Klaiber	Deduziram uma função aproximada para multidões em estádios.
1982	Ohlsson	Realizou um registro experimental típico da variação no tempo da força de contato com uma superfície produzido por um passo
1985	Tuan e Saul	Definiram diversos tipos de carregamentos “ <i>in situ</i> ”.
1987	Rainer, Pernica e Allen	Propuseram modelos de carregamento a partir de dados experimentais de pessoas caminhando, correndo e pulando através de uma plataforma.

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

1989	Ebrahimpour e Sack	Propuseram modelos probabilísticos objetivando estimar carregamentos dinâmicos de uma pessoa e de pequenos grupos de pessoas
1992	Ebrahimpour e Sack	Sugeriram cálculo simplificado para critérios de resistência e de serviço para movimentos harmônicos e humanos.
1996	Ebrahimpour <i>et al.</i>	Realizaram um estudo de carregamentos dinâmicos de atividades humanas variando no tempo e no espaço, tais como caminhada e corrida variando entre um, dois ou quatro indivíduos.
1997	Alves	Desenvolveu funções de carregamento para atividades com estímulo e sem estímulo.
2003	Faísca	Ajustou funções de carregamento para as atividades ritmadas e não ritmadas podendo ser utilizadas para multidões.
Análise de Pisos Submetidos à Carregamento Dinâmico em Estruturas de Aço		
1982	Pernica e Allen	Realizaram medições em cinco pisos em um shopping center com algumas lajes mistas (aço-concreto).
2007	Loose	Analisou um modelo estrutural composto por dois painéis de laje apoiados em vigas e pilares de aço.
2008	Mello <i>et al.</i>	Investigaram os efeitos dinâmicos causados por carregamento humano devido à caminhada em uma estrutura com vigas mistas de aço e concreto, laje maciça de concreto e pilares de aço.
2009	De Silva e Thambiratnam	Determinaram as características dinâmicas de um sistema de piso com múltiplos painéis sobre atividades humanas aeróbica.
2010	Parnel, Davis e Xu	Estudaram o comportamento dinâmico de sistemas de piso compostos por perfis formados a frio
2014	Dietrich <i>et al.</i>	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.
2014	Costa-Neves <i>et al.</i>	Analisaram o estado limite de vibração excessiva de lajes mistas de edifícios de múltiplos andares e vãos devido às atividades humanas rítmicas.

6 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, no século XIX mencionava-se sobre os efeitos dos carregamentos dinâmicos nas estruturas, entretanto somente a partir de 1913 [5],

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

estudos experimentais foram realizados para a avaliação dos carregamentos oriundos de atividades humanas, tais como: caminhada, corrida, dança e outros movimentos, visando obter modelos matemáticos que os representassem. As medições experimentais começavam pela construção de uma plataforma onde fosse possível analisar as características dos carregamentos em relação à atividade desempenhada. A seguir, utilizavam esses dados para ajustes de modelos matemáticos ou para representações através de gráficos ou tabelas desses carregamentos. Nos estudos mais atuais, o uso da série de *Fourier* na modelagem desses carregamentos foi recomendado uma vez que esses carregamentos podem ser considerados periódicos, entretanto todo o embasamento experimental foi necessário na determinação dos coeficientes de *Fourier* e de outros condicionantes como o efeito de multidão.

Os sistemas de piso de estruturas de aço abordados nesse estado da arte incluíram técnicas construtivas surgidas a partir da metade do século XX, como 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.

O terceiro 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 [23] 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. A ISO 2631-1 [32] e ISO 2631-1 [33], bem como a BS 6841 [34], 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 ainda não tratam de sistemas de pisos mais sofisticados.

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. Nos estudos mais recentes, o carregamento tem sido expressado por uma série de *Fourier*, sendo assim, publicações relacionadas aos coeficientes usados nessa série, como coeficiente de impacto e coeficiente de defasagem, seriam pertinentes para alcançar melhor precisão nos valores obtidos atualmente. 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. Logo, com o desenvolvimento das pesquisas sobre o carregamento dinâmico induzido pela atividade humana e de modelos mais sofisticados 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

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

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

- 1 Stevenson R. Description of bridges of suspension. Edinburgh Philosophical Journal. 1821; 10: 237-256.
- 2 Tredgold T. Elementary principles of carpentry. London: C. F. Hodgson; 1853.
- 3 Johnson LJ. New data on the weight of a crowd of people. Association of Engineering Societies. 1905; 34.
- 4 Lehmkuhl L, Weiss EL, Smith LK. Brunnstrom's clinical kinesiology. 5st ed. Philadelphia: F. A. Davis Company; 1996.
- 5 Tilden CJ. Kinetic effect of crowds. ASCE Proc. 1913; 34 (3), 2107-2132.
- 6 Ebrahimpour A, Sack RL. A review of vibration serviceability criteria for floor structures. Computers and Structures. 2005; 83: 2488–2494.
- 7 Ohmart RD. An approximate method for the response of stiffened plates to aperiodic Excitation Studies in Engineering mechanics. [Ph.D.]. Lawrence: The University of Kansas, Center for Research in Engineering Science; 1968.
- 8 Mello AVA, Silva JGS, Vellasco, PCGS, Andrade SAL, Lima LRO. Dynamic analysis of composite systems made of concrete slabs and steel beams. Journal Constructional Steel Research. 2008; 64: 1142–1151.
- 9 Greimann LF, Klaiber FW. Dynamic forces induced by spectators. Journal of the Structure Division. 1978; 104 (2): 348–351.
- 10 Wyatt TA. Design guide on the vibration of floors. London: The Steel Construction Institute; 1989.
- 11 Tuan CY, Saul WE. Loads due to spectator movements. Journal Structure Engineering. 1985; 111 (2):418–434.
- 12 Rainer JH, Pernica G, Allen DE. Dynamic loading and response of footbridges. Structures section, Institute for Research in Construction National Research Council of Canada, Ottawa. Ont. Canada KIA ORG. 1987; 2: 66–71.

* Contribuição técnica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

- 13 British Standard. Steel, concrete and composite bridges- Part 2: Specification for loads. London, BS 5400, 1978.
- 14 Ebrahimpour A, Sack RL. Modeling dynamic occupant loads. Journal Structure Engineering. 1989; 115 (6): 1476–1496.
- 15 Ebrahimpour A, Sack RL. Design live loads for coherent crowd harmonic movements. Journal Structure Engineering. 1992; 118 (4): 1121–1136.
- 16 Ebrahimpour A, Haman A, Sack RL, Patten WN. Measuring and modeling dynamic loads imposed by moving crowds. Journal Structure Engineering. 1996; 122 (12): 335-347.
- 17 Alves NKC. Cargas Dinâmicas devido a pessoas em movimento. [Mestre em Engenharia Civil], Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro; 1997.
- 18 Comité Euro -International du Béton. Vibrations Problems in Structure – Practical Guidelines. Bolletin d’informetion n. 209; Lousanne, Switzerland. CEB, 1991.
- 19 Faisca RG. Caracterização de cargas dinâmicas geradas por atividades humanas. [Doutorado em Engenharia Civil] Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2003.
- 20 Queiroz G, Pimenta RJ, Da Mata LAC. Elementos das estruturas mista aço-concreto. Belo Horizonte: Editora O Lutador; 2001.
- 21 Pernica G, Allen DE. Floor vibration measurements in a shopping centre. Structures section, Institute for Research in Construction National Research Council of Canada, Ottawa. Ont. Canada KIA ORG. 1982; 9: 149-155.
- 22 Loose JK. Análise dinâmica de pisos mistos em aço-concreto submetidos atividades humanas rítmicas. [Mestre em Engenharia Civil] Vitória: Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo; 2007.
- 23 Murray TM, Allen DE, Ungar EE. Floor vibration due to human activity: steel design guide Series 11. Chicago: American Institute of Steel Construction; 2003.
- 24 International Standard Organization. Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Human exposure to continuous and shockinduced vibrations in buildings (1 to 80 Hz), .ISO 2631-2, 1989.
- 25 De Silva SS, Thambiratnam DP. Dynamic characteristics of steel–deck composite floors under human-induced loads. Computers and Structures. 2009; 87: 1067-1076.
- 26 Parnell R, Davis BW, Xu L. Vibration Performance of Lightweight Cold Formed Steel Floors. Journal Structural Engineering. 2010; 136: 645-653.

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

- 27 Dietrich MZ, Teixeira FB, Calenzani AFG, Ferreira WG. Vibrations in steel-frame floors due to human activities. *Global Journal of Research in Engineering*. 2014; 14: 1-12.
- 28 Costa-Neves LF, Silva JS, Lima LRO, Jordão S. Multi-storey, multi-bay buildings with composite steel-deck floors under human-induced loads: The human comfort issue. *Computers and Structures*. 2014; 136: 34-36.
- 29 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projetos de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, NBR 6118, 2014.
- 30 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, NBR 8800, 2008.
- 31 International Organization for Standardization. Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements. ISO 2631-1, 1997.
- 32 International Organization for Standardization. Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibrations in buildings (1 to 80 Hz). ISO 2631-2, 2003.
- 33 British Standard. Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock. London, BS 6841, 1987.
- 34 International Standard Organization. Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements. ISO 2631-1, 1985.