

Análise comparativa das respostas de vibração de pisos mistos de aço e concreto segundo métodos da NBR 8800:2008 e ANSI/AISC 360-16

Rafael Nunes da Cunha ^[1], Higor Sérgio Dantas de Argôlo ^[2]

[1] rafaelnunes1996ufs@gmail.com. Universidade Federal de Sergipe/Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. [2] higorsergio@academico.ufs.br. Universidade Federal de Sergipe/Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

RESUMO

O presente trabalho realiza uma análise comparativa dos resultados obtidos mediante a avaliação da vibração de pisos de edifícios formados por estruturas mistas de aço e concreto, sujeitos a atividades humanas de caminhar, segundo as metodologias simplificadas da NBR 8800/2008, da ANSI/AISC 360-16 e métodos numéricos, com o uso do programa computacional Ansys. Diversos modelos teóricos de pisos de edifícios foram elaborados, obtendo-se resultados de frequências naturais, acelerações de pico, deslocamentos verticais e massa total, pelos métodos simplificados das normas citadas e resultados numéricos de frequências naturais e acelerações de pico. Observou-se que, entre as metodologias das duas normas, a da AISC apresentou resultados mais próximos aos resultados numéricos, indicando que ela seria a mais recomendada para ser adotada pelos calculistas estruturais. No que se refere à massa das estruturas, foi observado que, em relação à ANSI/AISC 360-16, a NBR 8800/2008 proporciona estruturas até 54% mais pesadas (e, conseqüentemente, mais caras) para grandes vãos, porém estruturas mais leves ou sem diferença de peso para menores vãos. Há casos, ainda, em que o piso apresenta vibração acima do limite do conforto humano, segundo a AISC, enquanto a NBR resulta em valores dentro desse limite.

Palavras-chave: AISC 360-16. Análises numéricas. Atividades humanas dinâmicas. NBR 8800/2008. Pisos mistos de aço e concreto.

ABSTRACT

The present paper performs a comparative analysis of the results obtained by the evaluation of the building floors' vibration formed by composite structures of steel and concrete, subject to human walking activities, according to the simplified methodologies of NBR 8800/2008, ANSI/AISC 360-16, and numerical methods by the software ANSYS. The authors designed several theoretical models of building floors and obtained the values of natural frequencies, peak accelerations, vertical displacements, and total mass by the simplified methods of the aforementioned standards and numerical results of natural frequencies and peak accelerations. It was observed that, among the methodologies of the two standards, the AISC results were closer to the numerical results, indicating that this would be the recommended to be adopted by the structural designers. Regarding the mass of the structures, it was noted that, in relation to ANSI/AISC 360-16, NBR 8800/2008 provides structures up to 54% heavier (and, consequently, more expensive) for large spans, but lighter or with no difference in weight for smaller spans. There are still cases where the floor vibrates above the human comfort limit, according to the American Standard Code, while the NBR results in values within this limit.

Keywords: *dynamic human activities; composite structures of steel and concrete floors; NBR 8800/2008; AISC 360-16; numerical analyses.*

1 Introdução

A busca por ambientes mais amplos, com maior liberdade arquitetônica, esteticamente agradáveis e construídos em prazos cada vez mais curtos tem levado engenheiros e arquitetos a adotarem soluções estruturais mais leves e de rápida execução. Uma das soluções mais utilizadas para atender a tais exigências é o uso de estruturas mistas de aço e concreto em pisos de edifícios (as chamadas vigas mistas). Esse sistema estrutural alia a alta resistência do aço à robustez do concreto que, trabalhando em conjunto, aumentam a resistência da estrutura, permitindo a adoção de maiores vãos e de menores massas. Adicionando fôrmas metálicas (*steel deck*) a esse sistema, são reduzidos o tempo de execução da edificação e o peso, dispensando o uso de fôrmas de madeira e escoramentos. Isso ocasiona menos gastos e proporciona melhores acabamentos estéticos (METFORM, 2019; YU; LABOUBE; CHEN, 2019).

Apesar de todas as vantagens, a redução de massa da estrutura acarreta redução da rigidez e, conseqüentemente, aumento da aceleração do piso devido às ações dinâmicas. Portanto, a análise, quanto à vibração, torna-se uma etapa muito importante no processo de cálculo estrutural, pois pode evitar futuros desconfortos aos usuários da edificação.

Neste trabalho são comparados os resultados obtidos mediante duas normas que apresentam metodologias simplificadas de cálculo para a análise de pisos quanto à vibração devido às atividades humanas de caminhar: a NBR 8800 (ABNT, 2008) (norma brasileira) e a ANSI/AISC 360-16 (MURRAY *et al.*, 2016) (norma americana). A primeira apresenta uma avaliação simplificada, sendo fácil e rápida de ser realizada, porém em seu Anexo L, itens L.3.2 e L.3.3, é registrado que “A opção por esse tipo de avaliação fica a critério do projetista e pode não constituir uma solução adequada do problema” NBR 8800 (ABNT, 2008). A segunda norma propõe uma metodologia menos simplificada e mais condizente com a realidade, pois considera o caráter dinâmico das ações e estruturas envolvidas. Além disso, o presente trabalho modelou, com o uso do programa computacional de elementos finitos Ansys, os mesmos pisos resolvidos pelas supracitadas normas tendo os resultados do Ansys como referência, com o intuito de avaliar qual dos métodos simplificados é o mais preciso para duas opções de vão. O trabalho também analisa a influência do vão da estrutura na massa total de cada piso, para cada norma utilizada.

2 Referencial teórico

A busca por métodos para evitar problemas de vibração excessiva parte do século 19, com Tredgold (1871). Desde então, vários estudos foram realizados para o aperfeiçoamento dos métodos de análises de vibração excessiva, alguns deles citados na seção 2.

2.1 Análise de vibrações excessivas

A metodologia da ANSI/AISC 360-16 foi apresentada inicialmente por Murray, Allen e Ungar (1997) e atualizada por Murray *et al.* (2016), sendo este o manual utilizado no presente trabalho para obter os resultados correspondentes à metodologia da norma americana.

Barret (2006) realizou uma série de ensaios experimentais e uma modelagem computacional quanto à vibração de pisos, analisando os resultados com base na metodologia da norma americana, e propôs um novo modelo de análises por Resposta Função de Frequência (FRF). Por fim, o autor concluiu que, com relação aos experimentais, o método da ANSI/AISC 360-16 proporcionou apresentou resultados satisfatórios,

Davis (2008) elaborou um modelo de elementos finitos que simulasse a vibração para pisos com baixas frequências naturais (menores que 10 Hz). Para isso, o autor realizou uma vasta campanha de análises experimentais em pisos moldados em laboratório e em estruturas reais, e também uma modelagem computacional. Os resultados obtidos pelo modelo proposto apresentaram acurácia satisfatória e, em comparação com os limites apresentados por Murray, Allen e Ungar (1997), alguns pisos apresentaram vibrações excessivas.

No entanto, devido às dificuldades para a realização de ensaios experimentais, diversos trabalhos analisaram a vibração de pisos por meio de análises numéricas ou por métodos simplificados.

Mello *et al.* (2008) realizaram análises numéricas em pisos mistos de aço e concreto genéricos, com variação do vão da viga secundária. As análises foram desenvolvidas no programa computacional Ansys, comparando diferentes modelos de equacionamento que representam o caminhar humano, avaliando os resultados de aceleração aos limites sugeridos por Murray, Allen e Ungar (1997).

Loose, Ferreira e Silva (2008) realizaram a análise de vibração de pisos modelados no *software* Ansys, solicitados por ações dinâmicas provenientes de

atividades rítmicas, sejam estas aeróbicas ou saltos livres. Dessa forma, foi possível observar que as ações aplicadas em uma laje geravam vibrações em lajes circunvizinhas, corroborando a necessidade de verificação da vibração em todas as lajes do piso.

Além disso, Silva *et al.* (2006) verificaram a influência da modelagem numérica dos pilares de suporte dos pisos em comparação com resultados experimentais de frequência natural. Foi possível observar que a modelagem possibilitou a inclusão dos efeitos de rotação nas ligações viga-pilar, aproximando as frequências naturais dos modelos aos valores experimentais.

Pretti, Ferreira e Calenzani (2014) apresentaram uma análise teórica realizada para a ANSI/AISC 360-16, contendo a revisão das etapas do cálculo de verificação de pisos e passarelas, com diferentes modelos estruturais, sujeitas a ações dinâmicas devido ao caminhar ou atividades rítmicas.

Dietrich *et al.* (2014) desenvolveram uma análise comparativa entre os resultados obtidos pela ANSI/AISC 360-16 e o software Ansys. Essa análise foi feita por meio da elaboração de diversos modelos, modificando o vão das vigas e o espaçamento entre vigas secundárias. Os autores concluíram que os resultados de frequência natural obtidos pela metodologia simplificada, apresentaram proximidade com os da análise numérica, enquanto que os resultados de aceleração de pico foram pouco superiores aos obtidos na análise numérica, sendo considerados a favor da segurança.

As atividades do caminhar humano são de difícil caracterização, pois dependem do ritmo de caminhada, da massa da pessoa e de fatores pessoais (SOUZA *et al.*, 2003). Portanto, modelar esse tipo de carregamento dinâmico ainda apresenta diversos problemas. Varela e Battista (2009) propuseram um modelo para o caminhar dividido em cinco equações. Nesse modelo, os autores consideram o efeito do impacto do calcanhar. Outro modelo utilizado em trabalhos são as séries de Fourier, devido à sua fácil aplicação e aos bons resultados obtidos.

Portanto, como os modelos numéricos representam uma boa aproximação de estruturas reais, neste trabalho, os resultados foram adotados como resultados de referência, os quais foram comparados com os obtidos por meio de metodologias simplificadas propostas pela AISC 360-16 e a NBR 8800 (ABNT, 2008).

2.2 Metodologias simplificadas

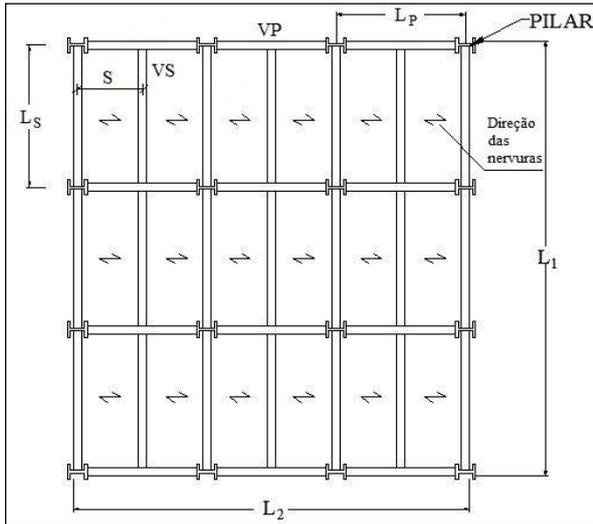
A análise através de métodos precisos, como o de elementos finitos, pode ser inviável, seja por capacidade de processamento seja por disponibilidade de software. Portanto, o uso de métodos simplificados visa auxiliar os calculistas durante a etapa de projeto. A seguir são apresentadas as metodologias da norma americana (AISC 360-16) e da NBR 8800 (ABNT, 2008).

2.2.1 American Institute of Steel Construction (AISC)

Esta norma utiliza o *Steel Design Guide 11* (MURRAY *et al.*, 2016) como guia que apresenta análises quanto à vibração para uma ampla variedade de pisos de edifícios sujeitos às atividades humanas. Leva-se em conta o conforto dos ocupantes da edificação. As metodologias propostas contemplam vários casos de pisos ao considerar aspectos como o tipo de laje, a fonte dos carregamentos dinâmicos e a natureza da ocupação.

As vigas dos pisos que se apresentam perpendiculares às nervuras da laje são denominadas de vigas secundárias (VS) e as paralelas às nervuras, vigas principais (VP), sendo estas últimas utilizadas como apoio para as vigas secundárias. O resultado dos cálculos, segundo a análise de vibração, admite que todas as lajes do piso se comportem de modo semelhante. No entanto, existe a possibilidade de analisar a laje de acordo com sua posição no pavimento, sendo elas: laje no meio do piso, laje com a viga secundária na borda e laje com a viga principal na borda. A Figura 1 apresenta o modelo de piso possível de ser analisado pela metodologia da norma americana.

Figura 1 – Representação esquemática dos pisos

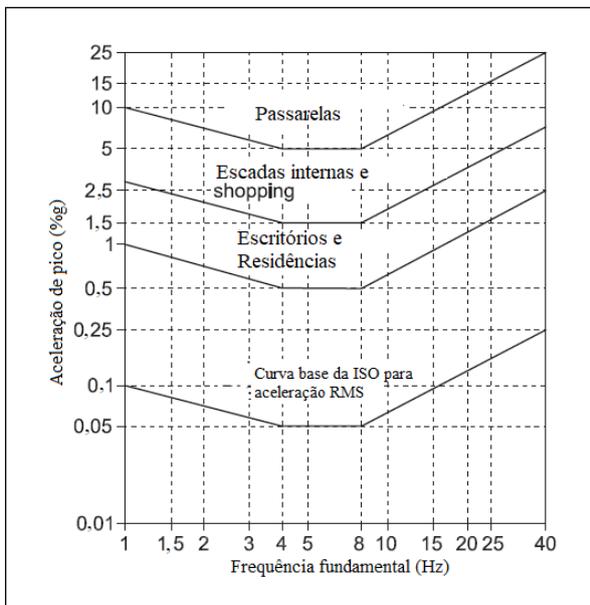


Fonte: elaborado pelos autores

em que L_1 e L_2 são as dimensões totais do piso, S é o espaçamento entre vigas secundárias, L_s é o comprimento da viga secundária, e L_p é o comprimento da viga principal.

Como critério para verificar a admissibilidade da vibração imposta ao piso, essa norma trabalha com limites de aceleração de pico em relação à aceleração da gravidade, admitindo valores máximos que variam de acordo com a ocupação e a frequência fundamental do piso, apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Limites de aceleração de pico



Fonte: adaptado da ANSI/AISC 360-16

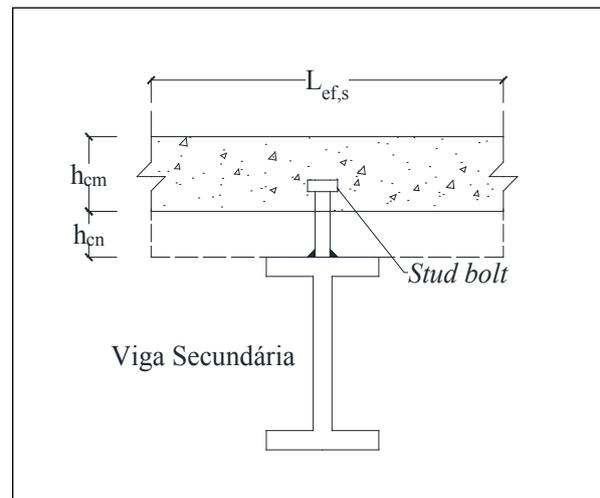
O procedimento de cálculo para essa metodologia deve ser iniciado com a determinação das larguras efetivas de concreto que auxiliarão na resistência da seção da viga mista, seja na direção da viga secundária, seja da principal.

Para a viga secundária, a largura efetiva de concreto ($L_{ef,s}$) é igual ao menor valor entre 40% do comprimento da viga principal e o espaçamento entre vigas secundárias.

Além disso, faz-se necessária a homogeneização da seção mista em um único material. O coeficiente de homogeneização do concreto em aço (n) é igual à razão entre o módulo de elasticidade longitudinal do aço e o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico do concreto. Murray *et al.* (2016) indicam que o módulo de elasticidade dinâmico do concreto pode ser calculado ao majorar o módulo de elasticidade longitudinal do concreto em 35%.

Para o cálculo das propriedades da seção resistente da viga secundária, sugerido por Murray *et al.* (2016), a altura de concreto das nervuras (h_{cn}) deve ser desconsiderada, pois existem seções em que não haverá concreto, como observado na Figura 3. Portanto, o cálculo do centroide e do momento de inércia é realizado apenas com a altura maciça da laje de concreto (h_{cm}).

Figura 3 – Corte paralelo às nervuras



Fonte: elaborado pelos autores

Com base nos valores calculados, determina-se a flecha da viga secundária (δ_{vs}), admitindo-a como bi-apoiada.

Além disso, são calculadas as constantes D_j , pela Equação (1), e D_s , pela Equação (2), a serem utilizadas para o cálculo do comprimento efetivo da laje na direção da viga secundária (B_j), que deve satisfazer a inequação apresentada na Equação (3):

$$D_j = \frac{I_{ef,s}}{S} \quad (1)$$

$$D_s = \frac{h_{ce}^3}{12n} \quad (2)$$

$$B_j = C_j L_s \left(\frac{D_s}{D_j} \right)^{0,25} \leq \frac{2NL_p}{3} \quad (3)$$

em que $I_{ef,s}$ é o momento de inércia da seção resistente da viga secundária (Figura 3), h_{ce} é igual à altura de concreto acima da nervura, acrescido de metade da altura da nervura, C_j é constante igual a 2 para os casos de lajes de interior, e 1 para lajes de borda, e N é o número de lajes na direção perpendicular a viga analisada, igual a três em ambas direções, para todos os exemplos elaborados no presente trabalho.

Na sequência, calcula-se o peso do painel referente à viga secundária (W_j), dado pela Equação (4):

$$W_j = \frac{1,5w_{js}B_jL_s}{S} \quad (4)$$

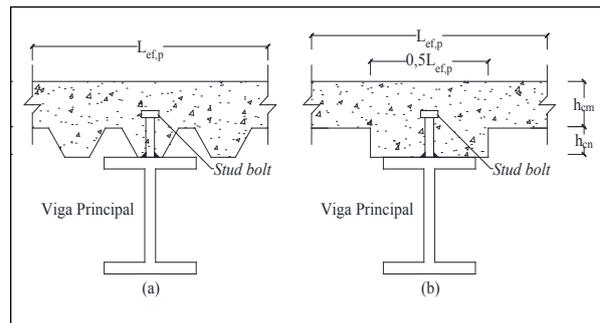
onde w_{js} é a carga distribuída na viga secundária.

De maneira semelhante ao que foi realizado para a viga secundária, as propriedades resistentes da seção para a viga principal devem ser determinadas.

A largura efetiva de concreto para viga principal ($L_{ef,p}$) é igual ao menor valor entre 40% do comprimento da viga principal ou o comprimento da viga secundária.

Para o cálculo do centroide e momento de inércia da seção resistente da viga principal, como pode ser observado na Figura 4a, sempre existirão nervuras contribuindo na resistência. Murray *et al.* (2016) sugerem adotar a altura da nervura (h_{nc}) em sua totalidade. No entanto, para esta região, a largura efetiva de concreto deve ser adotada igual à metade do valor de $L_{ef,p}$, como mostrado na Figura 4b.

Figura 4 – (a) Corte perpendicular às nervuras e (b) modelo simplificado



Fonte: elaborado pelos autores

A partir dos valores calculados, determina-se a flecha da viga principal ($\delta_{vp,0}$), admitindo-a como bi-apoiada.

Se $0,5 \leq L_p/B_j \leq 1$, o deslocamento vertical da viga principal pode ser reduzido conforme a Equação (5). Caso contrário, o valor δ_{vp} é definido igual a $\delta_{vp,0}$.

$$\delta_{vp} = \frac{L_p}{B_j} \delta_{vp,0} \quad (5)$$

Outra constante (D_g) é calculada pela Equação (6), a fim de determinar o comprimento efetivo da laje na direção da viga principal (B_g), utilizando a Equação (7), sendo $I_{ef,p}$ o momento de inércia da seção resistente da viga principal (Figura 4b), e C_g , constante igual a 1,8.

$$D_g = \frac{I_{ef,p}}{L_s} \quad (6)$$

$$B_g = C_g L_p \left(\frac{D_s}{D_g} \right)^{0,25} \leq \frac{2NL_s}{3} \quad (7)$$

Além disso, calcula-se o peso do painel referente à viga principal (W_g) de acordo com a Equação (8):

$$W_g = \frac{w_{gp}B_gL_p}{L_s} \quad (8)$$

onde w_{gp} é a carga distribuída na viga principal.

Por fim, é realizado o cálculo da frequência natural (f_n) e da carga equivalente do piso (W), apresentadas, respectivamente, nas Equações (9) e (10).

$$f_n = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\delta_{vs} + \delta_{vp}}} \quad (9)$$

$$W = \frac{\delta_{vs}}{\delta_{vs} + \delta_{vp}} W_j + \frac{\delta_{vp}}{\delta_{vs} + \delta_{vp}} W_g \quad (10)$$

sendo g a aceleração da gravidade adotada igual a $9,81 \text{ m/s}^2$.

Com os valores obtidos, calcula-se a aceleração de pico relativa para o piso, a partir da Equação (11):

$$\frac{a}{g} = \frac{P e^{-0,35f_n}}{\zeta W} \quad (11)$$

em que P é a carga devido ao caminhar, igual a $0,29 \text{ kN}$ (MURRAY *et al.*, 2016), e ζ é a taxa de amortecimento da estrutura.

A verificação da aceitação da aceleração máxima do piso para a norma americana é realizada com base nas curvas ilustradas na Figura 2. Se a aceleração de pico relativa do piso, para sua respectiva frequência natural, encontrar-se abaixo da curva correspondente ao tipo de ocupação, a vibração não causará desconforto aos usuários. Vale ressaltar que, caso a frequência natural fique abaixo de 3 Hz , a vibração relativa do piso deve ser calculada seguindo a metodologia para atividades rítmicas, a fim de garantir o conforto para os usuários do piso contra saltos.

2.2.2 ABNT NBR 8800:2008

A metodologia empregada pela norma brasileira difere-se da AISC ao não considerar as características dinâmicas do carregamento e da estrutura. Assim, a NBR 8800 (ABNT, 2008) admite que as ações no piso provenientes das atividades humanas são estáticas.

Como critério de verificação da vibração, essa norma define valores mínimos para a frequência natural do piso, porém não apresenta uma metodologia de cálculo para a determinação desse parâmetro. Para

o presente trabalho, esses valores de frequência foram adotados de forma análoga aos obtidos por meio da análise numérica, a fim de verificar os valores mínimos dados na norma brasileira. Além disso, a respectiva norma sugere outra análise simplificada. Nela os limites referentes à frequência natural são atendidos se o valor do deslocamento vertical máximo do piso, admitindo que todas as vigas são bi-apoiadas e as ações atuantes obtidas de acordo com a combinação frequente de serviço que está disposta na NBR 8681 (ABNT, 2003), forem limitados aos valores máximos citados.

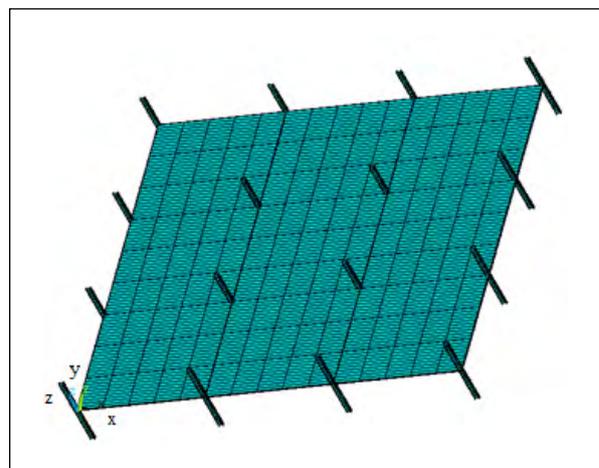
Para pisos sujeitos a atividade humana de caminhar, a NBR 8800 (ABNT, 2008) define que a frequência mínima do piso deve ser igual a 4 Hz e o deslocamento máximo do piso, igual a 20 mm .

2.3 Análise numérica

A resolução de problemas por meio da análise numérica proporciona uma solução aproximada dos efeitos que podem ocorrer na estrutura, mediante o uso de um modelo computacional que simule o objeto de estudo.

O programa computacional de elementos finitos Ansys foi utilizado para as modelagens realizadas no presente trabalho. Uma representação dos pisos modelados é observada na Figura 5, onde as vigas secundárias (situadas na direção do eixo X) foram todas consideradas como bi-apoiadas, e as vigas principais (situadas na direção do eixo Y) foram consideradas bi-engastadas.

Figura 5 – Modelo de piso



Fonte: elaborado pelos autores

2.3.1 Modelagem dos pilares

Como recomendado por Silva *et al.* (2006), a modelagem dos pilares foi realizada de modo a inserir um elemento de barra de altura igual à altura entre pavimentos, acima e abaixo do nível da laje. Isso foi realizado com o objetivo de considerar os efeitos de rotações das ligações viga-pilar.

O elemento finito utilizado para modelagem foi o Beam 188, por ser adequado para análise de peças delgadas e moderadamente espessas, com formulação baseada na teoria de vigas de Timoshenko (ANSYS, 2013).

2.3.2 Modelagem das lajes

Note que, como mostrado na Figura 4a, ao longo do comprimento de toda a laje há nervuras preenchidas com concreto. Entretanto, na direção paralela às nervuras (Figura 3) ocorrem trechos em que não há concreto abaixo da laje maciça. Portanto, a fim de facilitar a modelagem da laje, Barret (2006) sugere majorar o módulo de elasticidade longitudinal do concreto, com base no procedimento a seguir:

A laje deve ser modelada como maciça, com espessura igual à altura da laje acima da fôrma *steel deck* (h_{cm});

Para as lajes *steel deck* deve-se determinar a área equivalente da seção em uma largura unitária (L), a fim de obter uma seção equivalente (Figura 6), mantida a altura original da laje e a inclinação das nervuras;

O módulo de elasticidade do concreto deve ser definido como ortotrópico, de modo que, na direção paralela às nervuras, ele seja majorado pelo coeficiente PM, calculado pela Equação 12:

$$PM = \frac{I_{comp}}{I_{ret,m}} \tag{12}$$

em que I_{comp} é o momento de inércia da seção equivalente e $I_{ret,m}$ é o momento de inércia apenas da altura maciça da respectiva seção transversal.

O elemento finito utilizado para a modelagem da laje foi o Shell 181, pois é adequado para a análise de estruturas de casca fina a moderadamente espessas (ANSYS, 2013).

2.3.3 Modelagem das vigas

O elemento finito utilizado para a modelagem das vigas foi igual ao adotado para os pilares. No entanto, também foi utilizado o elemento Combin 39, a fim de garantir que as vigas secundárias se comportassem como bi-apoiadas.

Além disso, as vigas foram modeladas aplicando um *offset* entre o eixo médio da laje de concreto e o eixo de flexão do perfil metálico, a fim de serem mantidas as propriedades resistentes da seção mista.

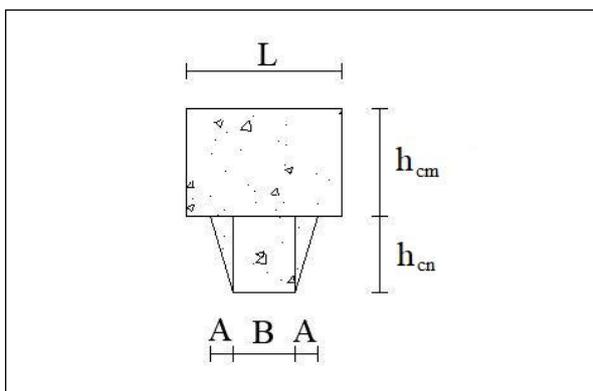
2.3.4 Caminhar humano

Com o objetivo de descrever a atividade de pessoas caminhando no piso, o presente trabalho utilizou o modelo de séries de Fourier (Equação 13), com os três primeiros harmônicos:

$$P(t) = P \left(1 + \sum_{i=1}^3 \cos(2\pi\alpha_i f_{s,i} t + \varphi_i) \right) \tag{13}$$

em que P é o peso médio de uma pessoa, adotado igual a 700 N, $f_{s,i}$ é a frequência de passo para cada harmônico, α_i são os coeficientes dinâmicos da série de Fourier, e φ_i são os ângulos de defasagem entre harmônicos. Estes parâmetros são apresentados na Tabela 1.

Figura 6 – Seção ortogonal às nervuras equivalente



Fonte: elaborado pelos autores

Tabela 1 – Parâmetros da série de Fourier

Harmônico	$f_{s,i}$ (Hz)	α_i	φ_j (rad)
1	1,6 - 2,2	0,5	0
2	3,2 - 4,4	0,2	/2
3	4,8 - 6,6	0,1	/2

Fonte: Mello *et al.* (2008)

A fim de considerar os efeitos do amortecimento do piso, foi utilizado procedimento dos coeficientes da matriz de Rayleigh, apresentado por Clough e Penzien (2003). Esse procedimento define o amortecimento como a soma de uma parcela de contribuição da matriz de rigidez (β) e de uma parcela de contribuição da matriz de massa (α). Esses coeficientes podem ser calculados pelas Equações (14) e (15), com o uso de duas frequências naturais (W_i e W_j) da estrutura, sendo W_i a frequência fundamental e W_j uma frequência que proporcione significativa contribuição na resposta dinâmica da estrutura.

$$\alpha = 2\xi W_i - \beta W_i^2 \quad (14)$$

$$\beta = \frac{2(\xi W_j - \xi W_i)}{W_j^2 - W_i^2} \quad (15)$$

3 Método da pesquisa

Para o desenvolvimento do trabalho, foram avaliados 10 pisos mistos de aço e concreto, considerando a variação das dimensões do piso. Todos os pisos foram dimensionados de acordo com as recomendações da NBR 8800 (ABNT, 2008), quanto ao Estado Limite Último e Estado Limite de Serviço (deslocamentos máximos).

3.1 Dimensionamento dos pisos

Para a análise da vibração de pisos com as metodologias descritas no Item 2, foi realizado o dimensionamento de 10 diferentes exemplos de pisos mistos de aço e concreto, constituídos com fôrmas *steel deck*, de modo a trabalhar com modelos formados por uma grande variedade de perfis metálicos, com diferentes dimensões e massas.

Com base na NBR 6120 (ABNT, 2019) e na NBR 8681 (ABNT, 2003) foram determinados os valores dos carregamentos que atuam no piso, considerando ocupação para escritórios ou residências. O peso próprio da laje mista foi obtido com o auxílio do catálogo da empresa METFORM. Para isso, adotou-se um único modelo de laje para todos os exemplos, com altura de concreto acima da nervura igual a 80 mm e altura da nervura da fôrma metálica igual a 50 mm.

Todos os pisos dos exemplos foram dimensionados de acordo com as recomendações da NBR 8800 (ABNT, 2008), quanto ao Estado Limite Último e Estado Limite de Serviço (deslocamentos máximos).

Em relação às dimensões dos pisos, a partir dos resultados obtidos por Dietrich *et al.* (2014), foi observado que, para o caso em que o espaçamento entre vigas secundárias foi igual a três metros, os resultados obtidos pela metodologia americana foram melhores em termos de frequências naturais e acelerações máximas. Desta forma, os pisos elaborados no presente trabalho foram constituídos de vigas secundárias regularmente espaçadas em três metros.

Os exemplos desenvolvidos contemplam dois diferentes casos de estruturas, variados conforme o vão. Para o primeiro caso, a viga secundária possui 10 metros de comprimento (L_s) e a viga principal, nove metros (L_p) (exemplos 1 ao 7), com dimensões totais do piso iguais a 30 m x 27 m. Para o segundo caso, a viga secundária possui 7 metros de comprimento e a viga principal, 6 metros (exemplos 8 ao 10), cujas dimensões totais do piso foram 21 m x 18 m.

A Figura 1 apresenta o modelo dos pisos analisados, com dados dos perfis descritos na Tabela 2 (página seguinte), na qual a posição 1 refere-se à laje central, a posição 2 refere-se às lajes com a viga secundária na borda, e a posição 3 refere-se às lajes com a viga principal na borda.

A taxa de amortecimento adotada foi igual a 0,03, mesmo valor para os cálculos da metodologia americana e análise numérica, determinada de acordo com as recomendações apresentadas por Murray *et al.* (2016). Foi considerada a ocupação típica de escritórios e a presença de repartições em *dry wall*, de modo a ser representativo ao tipo de ambiente previamente escolhido.

Tabela 2 – Resumo dos exemplos analisados

Exemplo	Posição	Dimensões (L1xL2) (m)	Perfil da Viga Secundária	Perfil da Viga Principal
1	1	30x27	W460x52	W530x109
2	1	30x27	W360x51	W530x101
3	1	30x27	W460x97	W530x109
4	2	30x27	W360x51	W530x101
5	2	30x27	W410x53	W530x101
6	3	30x27	W360x51	W530x109
7	3	30x27	W360x57,8	W530x109
8	1	21x18	W250x44,8	W410x85
9	2	21x18	W250x44,8	W410x85
10	2	21x18	W310x44,5	W460x106

Fonte: dados da pesquisa

3.2 Análises numéricas

As análises numéricas foram realizadas no programa computacional Ansys. Para os modelos dos pisos, as ligações viga-viga foram adotadas como flexíveis; as ligações viga-pilar, como rígidas.

O tamanho da malha de elementos finitos foi definido igual a 1/10 do vão, como sugerido por Barret (2006). Além disso, como indicado por este mesmo autor e por Campista e Silva (2018), de modo a considerar a interação total entre a laje de concreto e os perfis de aço, a malha para esses elementos finitos tiveram dimensões iguais, a fim de garantir a compatibilidade de deslocamentos e a transferência de esforços.

Os pilares foram modelados com seis metros de altura, sendo três metros acima e três metros abaixo do nível da laje. Ademais, as condições de contorno adotadas foram de deslocamento nulo nas três direções, e de rotação nula na direção das vigas principais. Foi utilizado o perfil metálico W360x79 para a modelagem de todos os pilares.

A princípio foi realizada uma análise modal, sendo obtidas as primeiras 10 frequências naturais da estrutura, das quais foram utilizadas a primeira e terceira para o cálculo dos coeficientes do amortecimento de Rayleigh (Equações 14 e 15). A terceira frequência foi adotada, pois apresentou valor próximo à frequência de excitação para o terceiro harmônico (Tabela 1).

Além disso, foi observada qual região do piso apresentou maior deformação na direção perpendicular ao piso para o primeiro modo de vibração.

Realizou-se, também, uma análise transiente e, como sugerido por Murray *et al.* (2016), a fim de obter os maiores resultados de aceleração do piso, aplicou-se o carregamento dinâmico na posição de maior deformação observada. Foi utilizada a série de Fourier, apresentada na Equação (13), com o uso de três harmônicos, cujas constantes estão dispostas na Tabela 1.

4 Resultados

A verificação da aceitabilidade dos pisos quanto à vibração excessiva é de extrema importância em projetos, pois os custos de reparo na etapa de pós-ocupação tendem a ser mais elevados. A princípio, os resultados determinados com as normas americana e brasileira foram comparados aos obtidos por meio da análise numérica. Além disso, também foi desenvolvida uma análise comparativa entre as massas das estruturas, quando dimensionadas com as duas metodologias simplificadas.

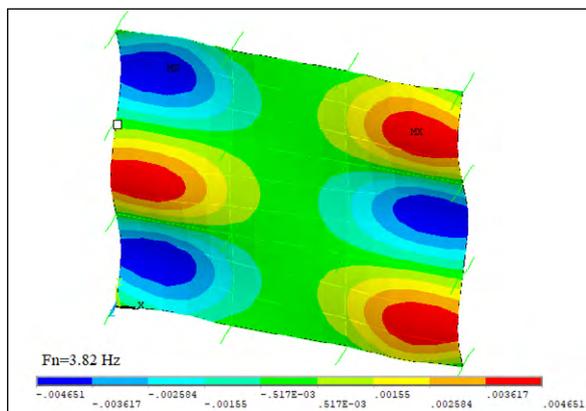
4.1 Análise comparativa da vibração máxima dos pisos

A partir do dimensionamento dos pisos, os 10 exemplos elaborados foram analisados através dos métodos simplificados. Foram obtidos os resultados de frequência natural e de aceleração relativa (a/g) através da metodologia da ANSI/AISC 360-16. Também foram determinados os resultados pela NBR 8800 (ABNT, 2008) em termos do deslocamento total do piso, a partir da soma do deslocamento máximo da viga secundária e da viga principal.

Com relação às análises numéricas, a princípio foram obtidas as 10 primeiras frequências naturais da estrutura, as quais foram utilizadas para a determinação dos coeficientes da matriz de Rayleigh para a consideração do amortecimento. Além disso, foram plotados os deslocamentos verticais da estrutura para o primeiro modo de vibração, mostrado na Figura 7, com o intuito de verificar a posição de maior deformação, à qual foi aplicada a carga dinâmica.

A análise transiente foi realizada de modo a considerar um intervalo de tempo para a aplicação do carregamento de 20 segundos. A partir dessa análise, foram obtidas as respostas de Aceleração x Tempo. Com base nesses valores, foram determinadas as acelerações máximas relativas (em valores absolutos).

Figura 7 – Deslocamento total do piso para primeiro modo de vibração



Fonte: elaborado pelos autores

Os resultados de aceleração de pico e de frequência fundamental para todos os pisos, calculados com o uso da metodologia da norma americana, e obtidos numericamente nas modelagens no Ansys, estão apresentados na Tabela 3. Esta mesma tabela apresenta os resultados de deslocamento vertical máximo dos pisos.

Os exemplos calculados segundo a AISC foram considerados aprovados ou reprovados ao comparar seus valores de frequência e a/g com os limites dados na Figura 2.

Os resultados em termos de deslocamento vertical obtidos segundo a NBR foram verificados quanto ao limite máximo de 20 mm. Além disso, como esta norma não fornece um procedimento para determinar a frequência natural do piso, essa verificação foi realizada comparando-se com os valores obtidos por meio da análise numérica com o valor mínimo de 4 Hz.

Tabela 3 – Resultados dos exemplos por ambas as metodologias de cálculo

Exemplo	AISC 360-16		Ansys		NBR 8800:2008
	Frequência fundamental (Hz)	a/g (%g)	Frequência fundamental (Hz)	a/g (%g)	Deslocamento Total (mm)
1	3,32	0,35	3,25	0,352	26,94
2	2,84	2,46	3,83	0,429	33,84
3	3,75	0,27	3,75	0,392	20,94
4	2,84	2,46	3,83	0,429	33,84
5	3,16	0,50	3,82	0,380	29,74
6	3,32	0,56	3,83	0,494	33,04
7	3,45	0,55	3,82	0,524	31,04
8	5,06	0,36	7,54	0,592	11,03
9	5,06	0,59	7,54	0,592	11,03
10	5,75	0,49	7,65	0,588	8,73

Fonte: dados da pesquisa

Em relação às análises numéricas, as acelerações obtidas foram comparadas ao limite para escritórios e residências, dado em Murray *et al.* (2016), igual a 0,5 %g.

Cabe destacar o caso ocorrido nos exemplos 2 e 4, através da metodologia da norma americana, nos quais as frequências naturais ficaram abaixo de 3 Hz. Devido a isso, estes pisos foram recalculados seguindo

a metodologia para atividades rítmicas apresentadas por Murray *et al.* (2016), com o intuito de verificar a possibilidade de saltos inesperados. Portanto, os resultados de aceleração para esses exemplos ficaram muito acima do determinado pela análise numérica.

O resumo dos resultados de aceitabilidade quanto a vibração excessiva obtidos por ambas as verificações está disposto na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados das análises de aceitabilidade dos pisos

Exemplo	AISC 360-16	Ansys	NBR 8800:2008	
			Deslocamento	Frequência
1	Aprovado	Aprovado	Reprovado	Reprovado
2	Reprovado	Aprovado	Reprovado	Reprovado
3	Aprovado	Aprovado	Reprovado	Reprovado
4	Reprovado	Aprovado	Reprovado	Reprovado
5	Aprovado	Aprovado	Reprovado	Reprovado
6	Reprovado	Aprovado	Reprovado	Reprovado
7	Reprovado	Reprovado	Reprovado	Reprovado
8	Aprovado	Reprovado	Aprovado	Aprovado
9	Reprovado	Reprovado	Aprovado	Aprovado
10	Aprovado	Reprovado	Aprovado	Aprovado

Fonte: dados da pesquisa

Com base na Tabela 3, pode-se observar que, para a variedade de exemplos elaborados neste trabalho, os resultados obtidos pela metodologia da norma americana foram melhores do que os obtidos pela norma brasileira, tanto considerando o critério deslocamento vertical como de frequência natural, em comparação com os resultados numéricos. Em termos percentuais, 50% dos exemplos resolvidos pela metodologia da AISC coincidiram em aprovação ou rejeição com os resultados numéricos, enquanto que, para ambas as análises propostas pela norma brasileira (deslocamento máximo e frequência fundamental mínima), com a análise numérica, apenas 10% dos exemplos obtiveram resultados coincidentes. Esses resultados corroboram o fato de que o procedimento dado pela norma americana é mais preciso, pois considera os efeitos dinâmicos das ações e da estrutura, enquanto que o método da norma brasileira não analisa os efeitos dinâmicos das cargas, ou seja, admitindo-as como estáticas, além de não considerar parâmetros importantes nas análises dinâmicas como o amortecimento do piso, a posição da laje, o tipo de ocupação. O método brasileiro também não apresenta métodos de combinações de ações adequadas para esse tipo de análise.

Vale ressaltar que foram obtidas as máximas acelerações mediante a análise numérica, enquanto as acelerações resultantes da norma americana foram calculadas para diferentes posições da laje, que não necessariamente podem coincidir com os máximos.

Com relação às frequências naturais, os resultados alcançados pela metodologia da AISC foram inferiores ou próximos às frequências de referência. Portanto, com relação a esses valores, esse metodologia apresenta-se conservadora.

Além disso, também é observado que os resultados obtidos pela metodologia da norma brasileira, em comparação com os obtidos pela norma americana, apresentam taxa de coincidência em aprovação ou rejeição de 60% entre elas, destacando os casos dos pisos de menores vãos (exemplos 8 e 10). No entanto, nota-se que, o exemplo 9 seria aprovado pela norma brasileira enquanto não é aprovado pela metodologia americana e numérica, confirmando o que a NBR 8800 (ABNT, 2008) comenta em seu anexo L: “A opção por esse tipo de avaliação fica a critério do projetista e pode não constituir uma solução adequada do problema”. Para os demais exemplos avaliados, os resultados obtidos pela metodologia da norma brasileira foram semelhantes aos da norma americana ou considerados superdimensionados, favorecendo o conforto dos ocupantes, mas tornando a execução da obra mais onerosa.

4.2 Verificação da massa do piso de acordo com o critério de vibração

Foram elaborados novos exemplos com o objetivo de verificar a influência dos métodos simplificados na massa total dos pisos, a partir da massa linear dos

perfis. Tais comparações foram realizadas de modo a escolher o perfil que apresentasse resultados mais próximos dos limites exigidos, seja em termos de aceleração (AISC 360-16) seja em deslocamento vertical (ABNT, 2008), em todos os casos considerando uma laje central ao piso (posição 1). A Tabela 5

apresenta os dados das comparações elaboradas com os perfis para cada metodologia e as dimensões dos pisos. Na Tabela 6 são apresentados os resultados de massa total do piso, admitindo total modulação dos perfis e considerando apenas a massa das vigas de aço, pois as dimensões da laje são iguais.

Tabela 5 – Dados dos exemplos para análise de massa

Comparação	Dimensões (L1 x L2) (m)	AISC 360-16		NBR 8800:2008	
		Perfil da Viga Secundária	Perfil da Viga Principal	Perfil da Viga Secundária	Perfil da Viga Principal
1	30x27	W460x52	W530x92	W530x92	W530x109
2	30x27	W360x57,8	W530x101	W460x74	W610x125
3	30x27	W410x53	W530x92	W460x74	W610x140
4	30x27	W360x44	W610x125	W460x68	W610x155
5	30x27	W650x114	W750x125	W750x140	W850x155
6	30x27	W600x111	W800x129	W750x125	W850x174
7	21x18	W250x44,8	W360x79	W250x44,8	W360x57,8
8	21x18	W310x44,5	W360x64	W310x44,5	W360x51
9	21x18	W360x64	W460x68	W460x60	W460x82
10	21x18	W460x89	W530x109	W530x85	W530x109

Fonte: dados da pesquisa

Tabela 6 – Comparação das massas dos pisos

Comparação	Massa Total (kg)		Diferença de massa (kg)	Diferença de massa (%)
	NBR	AISC		
1	39372	25536	13836	54,18
2	35700	28248	7452	26,38
3	37320	25836	11484	44,45
4	37140	26700	10440	39,10
5	58740	47700	11040	23,14
6	56292	47232	9060	19,18
7	10747,2	10747,2	0	0,00
8	10213,5	10213,5	0	0,00
9	14724	14304	420	2,94
10	20931	20343	588	2,89

Fonte: dados da pesquisa

Observa-se que, para os casos de grandes vãos, o cálculo baseado na NBR 8800 (ABNT, 2008) exige o uso de perfis maiores e, portanto, com maiores massas, chegando a constituir pisos com acréscimo

de aproximadamente 54% de massa por pavimento, em comparação com os resultados da metodologia americana, tomada como mais precisa, com base nos resultados apresentados no Item 4.1. Esse aumento da

massa pode resultar em obras mais caras, inicialmente pelo custo direto dos perfis e, em segundo plano, pelo custo com as fundações do edifício. Esses problemas se relacionam com a simplificação do método apresentado na norma brasileira. Contudo, nota-se que, para os casos de vãos menores, os resultados obtidos pela NBR tornam-se mais próximos dos obtidos pela AISC, mostrando que, para esse tipo de situação, os resultados entre as metodologias se aproximam.

5 Conclusões

O desenvolvimento do presente trabalho permitiu observar a diferença de resultados entre as metodologias de cálculo apresentadas na NBR 8800 (ABNT, 2008) e na ANSI/AISC 360-16, chegando à conclusão de que a primeira é mais simplificada, pois não considera os efeitos dinâmicos dos carregamentos, enquanto que a segunda é mais refinada, pois considera a natureza dinâmica de todas as variáveis envolvidas.

De acordo com os exemplos elaborados, foi possível observar que os resultados obtidos através da metodologia americana se mostraram mais precisos, quando comparados com os resultados numéricos, com proximidade em termos de frequência natural e de aceleração de pico, enquanto que os resultados dados na metodologia brasileira se mostraram mais conservadores e necessitariam de perfis maiores para a aceitabilidade dos pisos. Esse fato pôde ser observado na análise relativa à massa do piso, que revelou que, para os casos de maiores vãos, os resultados obtidos pela metodologia da norma brasileira exigiram maiores perfis, com massas totais superiores em aproximadamente 54% da obtida pela norma americana. Esse aumento da massa do piso implica maiores gastos, seja em termos da compra dos próprios perfis de aço, seja devido à maior capacidade que o sistema de fundação deve possuir. Porém, para o caso de menores vãos, os perfis empregados para ambas as metodologias se aproximaram bastante, tornando a diferença nula e sugerindo que há um limite a partir do qual os resultados dados pela NBR são de acurácia satisfatória.

Sugere-se, para futuros trabalhos, a elaboração de mais exemplos de pisos mistos de aço e concreto, de modo a verificar a influência dos comprimentos dos vãos nos resultados de aceitabilidade por meio da norma brasileira. Também é sugerido verificar a

influência da espessura da laje e de variações na taxa de amortecimento.

Também é sugerida a realização de análises semelhantes, específicas para atividades humanas rítmicas, por meio de metodologias simplificadas e modelos numéricos. Por fim, é sugerida a variação do modelo de carregamento aplicado nos métodos numéricos, de forma a analisar sua influência na resposta de aceleração de pico do piso, e uma posterior comparação com resultados experimentais.

REFERÊNCIAS

- ANSYS. **ANSYS Fluent User's Guide**. v. 15, 2013.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6120:2019 – Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8681:2003 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800:2008 – Projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- BARRET, A. R. **Dynamic testing of in-situ composite floors and evaluation of vibration using the finite element method**. 451 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto politécnico e universidade estadual de Virgínia, Blacksburg, 2006.
- CAMPISTA, F. F.; SILVA, J. G. S. Vibration analysis of steel–concrete composite floors when subjected to rhythmic human activities. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 8, p. 737-754, 2018.
- CLOUGH, R. W; PENZIEN, J. **Dynamics of structures**. 3. ed. Califórnia: Computers & Structures, Inc., 2003.
- DAVIS, D. B. **Finite element modeling for prediction of low frequency floor vibrations due to walking**. 2008. 266 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto politécnico e universidade estadual de Virgínia, Blacksburg, 2008.
- DIETRICH, M. Z.; TEIXEIRA, F. B.; CALENZANI, A. F. G.; FERREIRA, W. G. Vibrations in Steel-Frame Floors due to Human Activities. **Global Journal of Researches in Engineering: E Civil and Structural Engineering**, 2014.

LOOSE, J. K.; FERREIRA, W. G.; SILVA, J. G. S. Influência das atividades humanas rítmicas sobre a resposta dinâmica de pisos mistos (aço-concreto). 5 ed. Passo Fundo: **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, 2008.

MELLO, A. V. A.; SILVA, J. G. S.; VELLASCO, P. C. G.; ANDRADE, S. A. L. Dynamic analysis of composite systems made of concrete slabs and steel beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 64, n. 10, p. 1142-1151, 2008.

METAFORM. **A Solução em lajes steel deck**. Disponível em: <http://www.metform.com.br/wordpress/wp-content/uploads/2019/11/Cat%C3%A1logo-Steel-Deck-2019.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2020.

MURRAY, T. M.; ALLEN, D. E. A.; UNGAR, E. E.; DAVIS, D. B. **Steel Design Guide Series 11: Vibrations of steel-framed structural systems due to human activity**. 2 ed. Chicago, Illinois. American Institute of Steel Construction (AISC), 2016.

MURRAY, T. M.; ALLEN, D. E.; UNGAR, E. E. **Steel design guide series 11: Floor Vibrations Due to Human Activity**. Chicago, Illinois. American Institute of Steel Construction (AISC), 1997.

PRETTI, L. A.; FERREIRA, W. G.; CALENZANI, A. F. G. **Vibrações devidas ao caminhar e às atividades aeróbicas: uma verificação teórica**. IBRACON, Vitória, v. 7, 2 ed. p. 286-312, 2014.

SILVA, J. G. S.; VELLASCO, P. C. G. S.; ANDRADE, S. A. L.; LIMA, L. R. O. Dynamical response of composite steel deck floors. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 3, n. 2, p.163-178, 2006.

SOUZA, H. A.; PEREIRA, C. C. G.; NEVES, F. A.; SALES, U. C. **Análise da condição de conforto em relação à vibração para os pisos usados na construção em aço**. Anais: VII Encontro Nacional De Conforto No Ambiente Construído. Curitiba: 2003.

TREDGOLD, T. **Elementary principles of carpentry**. E. & FN Spon, 1871.

VARELA, W. D.; BATTISTA, R. C. Um modelo para estimativa realista das vibrações em estruturas induzidas por pessoas caminhando. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, v. 6, n. 1, p. 33, 2009.

YU, W. W.; LABOUBE, R. A.; CHEN, H. **Cold formed steel design**. 5 ed. Willey, 2019.