

# **ANÁLISE DINÂMICA DE EDIFICAÇÕES MISTAS (AÇO-CONCRETO) DE MÚLTIPLOS ANDARES SUBMETIDAS A ATIVIDADES RÍTMICAS**

Elisângela Arêas Richter dos Santos, Eng.  
Universidade Estácio de Sá - UNESA

Miguel Henrique de Oliveira Costa, DSc.  
Universidade Estácio de Sá - UNESA

Vanessa da Silva de Azevedo, DSc.  
Universidade Estácio de Sá - UNESA

## **RESUMO**

Através dos anos a forma como a sociedade e seus indivíduos estabelecem as relações de utilização das edificações vem sofrendo grande e rápida mudança. Essa mudança vem apresentando um aumento dos problemas estruturais associados à vibração excessiva de pisos em edificações de múltiplos pavimentos constituídos por estruturas mistas (aço-concreto) devido a atividades humanas rítmicas. Essas atividades constituem uma das principais motivações para o estudo de metodologias de projeto com o apoio no alcance da resposta dinâmica de pisos mistos (aço-concreto), quando submetidos a cargas dinâmicas humanas de origem rítmica. Para tal, o modelo estrutural estudado baseia-se em pisos de uma edificação mista (aço-concreto) submetidos a aulas de ginástica aeróbica, objeto de carregamento bastante comum na pluralidade de ações ao qual as edificações vêm sendo submetidas. São empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos (MEF), por meio do programa ANSYS. Um estudo paramétrico foi realizado sobre o modelo estrutural investigado onde foram obtidos os valores para as acelerações de pico e deslocamentos, que por conseguinte são comparadas com as normas de recomendação de projeto indicando níveis de vibrações excessivas. Considerando-se os resultados e todas as configurações mencionadas é sugerida uma estratégia com base em alternativas viáveis para o controle estrutural, objetivando a atenuação das vibrações excessivas.

**Palavras-chave:** Modelagem Numérica, vibrações, Estrutura Mista

## 1. INTRODUÇÃO

Antes da segunda metade do século XVIII, período em que se deu a Revolução Industrial, as estruturas de maneira geral, eram provenientes de grande volume e massa, uma vez que as peças estruturais eram confeccionadas de madeira de lei ou grandes blocos sobrepostos. Por meio de um método construtivo tão antigo, era possível proporcionar um grande amortecimento estrutural intrínseco à estrutura, seja devido ao grande volume de massa modal ou elevado amortecimento do material utilizado, o que resultava em respostas ínfimas do sistema estrutural quando submetido a uma vibração (SOMMER, 2002).

Com o advento do estudo dos materiais, com aderência a uma elevada relação resistência x peso como o aço e o alumínio, o aumento do conhecimento das propriedades dos materiais, o aprimoramento dos processos de cálculo estrutural e a modernização de técnicas construtivas, foram possíveis as execuções de projetos arrojados com estruturas mais esbeltas e a utilização de grandes vãos-livres (BEARDS, 1996).

Nos dias atuais, o controle das vibrações e o impacto que elas podem causar nos diferentes tipos de estruturas, tem sido objeto de estudo em diversos domínios da Engenharia. Devido as atuais inovações presentes em estruturas mistas de aço-concreto, o desenvolvimento científico dos materiais atrelados a sistemas construtivos inovadores tem contribuído para tendências arquitetônicas ousadas, oriundas de um mercado cada vez mais exigente, impondo a engenharia estrutural grandes mudanças, em curto espaço de tempo (LANGER, 2007).

Considerando-se a ousadia dos projetos arquitetônicos, as características dos pisos mistos aço-concreto têm direcionado a sistemas estruturais de pisos mistos (aço-concreto) com frequências intrínsecas naturais cada vez mais semelhantes da faixa de frequências associadas a atividades humanas rítmicas. Ações como: andar, dançar, pular, aeróbica, dentre outras, podem ocasionar vibrações que sobrecarregam a estrutura no tocante ao conforto de sua utilização. Situações como estas podem gerar desde o desconforto do usuário, até problemas mais graves como o abalo ou comprometimento da estrutura (COSTA, 2010).

A fim de acompanhar essa evolução, é essencial que os sistemas estruturais de pisos sejam projetados levando-se em considerações tais efeitos. Ademais é importante ressaltar que esses sistemas vêm atendendo aos estados limites últimos, no entanto devem ser periciados quanto aos estados limites de utilização, a fim de que assegurar os critérios de segurança relacionados ao conforto dos usuários, durabilidade da estrutura e aparência de um modo geral (MELLO, 2005).

## **2. MODELAGEM DAS ATIVIDADES HUMANAS RÍTMICAS**

As atividades humanas rítmicas são fonte de excitação com magnitude, direção e posição variável no tempo, isto é, são carregamentos dinâmicos. Entretanto, em grande parte dos projetos estruturais os representam como uma majoração do carregamento estático, desconsiderando seus efeitos dinâmicos (CAMPISTA, 2015).

Várias são as fontes geradoras de carregamentos dinâmicos, como exemplo, pode-se citar a ação dinâmica do vento, a atuação de equipamentos, as ações sísmicas, o tráfego de veículos, as ações causadas por atividades humanas como caminhar, dançar e pular, entre outras (COSTA, 2010).

Para análise dos efeitos causados por cargas dinâmicas, o primeiro passo é conhecer e descrever corretamente as cargas que irão atuar no sistema estrutural. Em se tratando de atividades humanas, podemos tratar esses carregamentos como periódicos, ou seja, a variação da carga é repetida durante vários ciclos sucessivos (LOOSE, 2007).

Estas atividades são classificadas por Alves (1997) em duas categorias. Na primeira não há perda de contato com a estrutura, como dança de salão, a outra categoria se refere à perda de contato do indivíduo com a estrutura, de modo que o indivíduo em um determinado momento está em contato com a estrutura e instantes depois encontra-se no ar. Esta última categoria é exemplificada por atividades como corrida, saltos e atividades aeróbicas.

Este estudo tem por objetivo, tratar de atividades onde existe a perda de contato com a estrutura e sincronismo entre os indivíduos. A atividade estudada será a ginástica aeróbica. Para tanto, será utilizado um cenário, criado com a possibilidade de futuramente ser uma estrutura real.

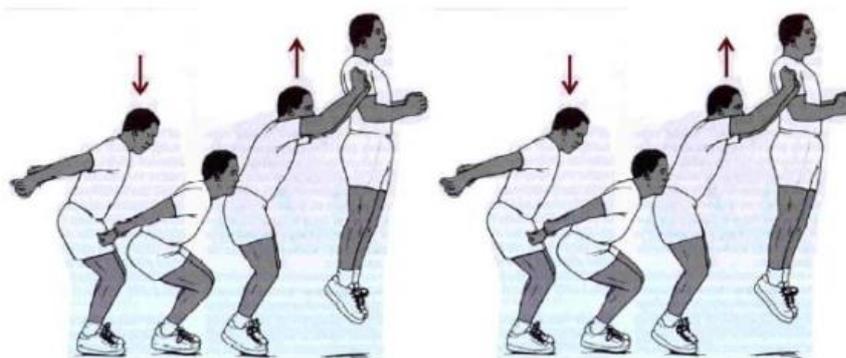
### **2.1 Caracterização das Ações Dinâmicas**

De acordo com Faisca (2003) a descrição do carregamento produzido por pessoas em movimento é bastante complexa, pois envolve características próprias de cada indivíduo como a idade, o peso, a habilidade física, o tipo de calçado e ainda a forma como cada indivíduo realiza tal atividade. No caso das ações dinâmicas que envolvem a perda de contato do indivíduo com a estrutura, o movimento realizado se configura por fases alternadas de contato, ou seja, durante um determinado período o indivíduo está em contato com a estrutura e por alguns instantes ele se mantém no ar (FAISCA, 2003).

Entre as atividades que envolvem a perda de contato com a estrutura, pode-se citar a ginástica aeróbica e aquelas realizadas por plateias em shows e torcidas. Todas, porém, são caracterizadas pela execução de saltos e são diferenciadas principalmente pelo grau de sincronismo em que atuam os participantes (FAISCA, 2003).

Em se tratando dos saltos, observam-se quatro fases distintas que caracterizam essa ação, Figura 1.

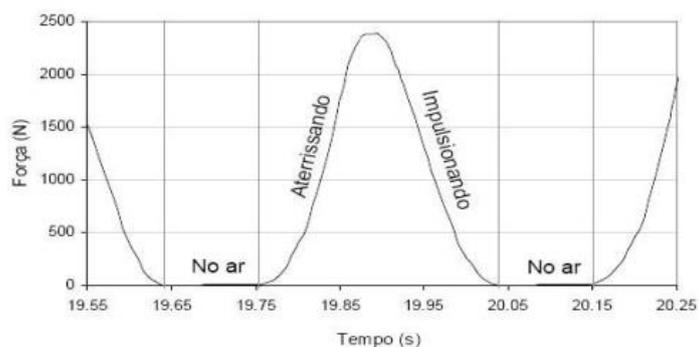
Figura 1 - Movimentação do corpo em um salto livre



Fonte: FAISCA, 2003.

Após a ilustração dos movimentos do corpo em um salto livre na Figura 1, foram realizados testes experimentais que foram representados graficamente e mostram a força gerada por este movimento, no domínio do tempo, sendo apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Força gerada na estrutura por movimento de saltos livres no domínio do tempo



Fonte: FAISCA, 2003.

A Figura 2 descreve de melhor maneira possível a ilustração da Figura 1, onde a força atuante na estrutura pelo salto, quando o indivíduo se encontra no ar é nula, enquanto a aterrissagem total do indivíduo na estrutura atinge a força máxima. Em seguida, a amplitude da força decresce na preparação para a realização de um novo salto, assim estes movimentos tornam-se um ciclo repetitivo (FAISCA, 2003).

## 2.2 Modelo de Carregamento I (MC-I)

Este modelo de carregamento trata da formulação associada às ações dinâmicas induzidas por ginástica aeróbica e saltos à vontade. Em sua investigação, Faisca (2003) observou que para diferentes atividades como saltos à vontade, ginástica aeróbica e show/torcida.

A partir dos resultados obtidos experimentalmente, verificou-se que a função semi-seno, não é tão adequada para representar esse tipo de carregamento. Sendo assim, foi sugerida a função conhecida como janela Hanning, Brigham (1988) apud Faisca (2003). A comparação do sinal experimental com as funções semi-seno e Hanning pode ser vista na Figura 3.

Figura 3 – Comparação entre o sinal experimental, e os obtidos com as funções semi-seno e Hanning

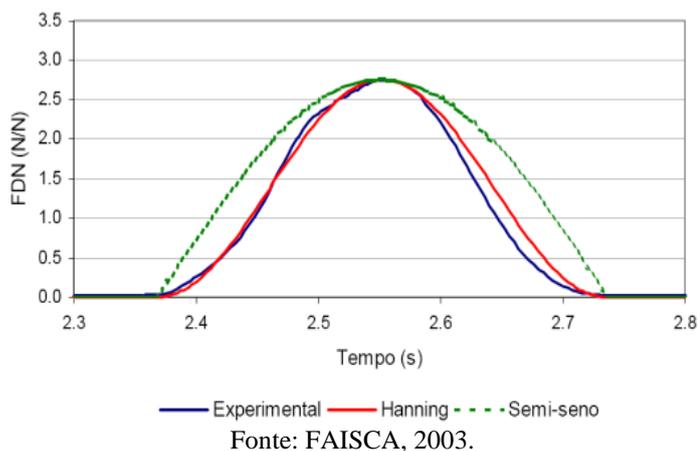
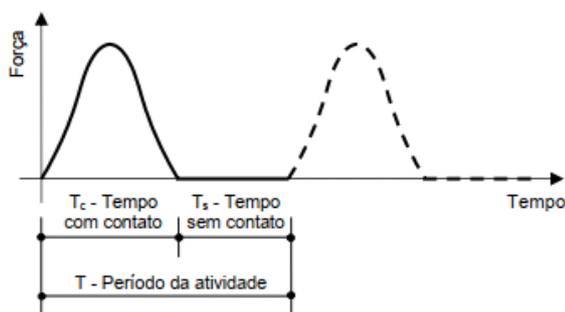


Figura 4 – Intervalos de tempo da função característicos da função Hanning



Fonte: FAISCA, 2003.

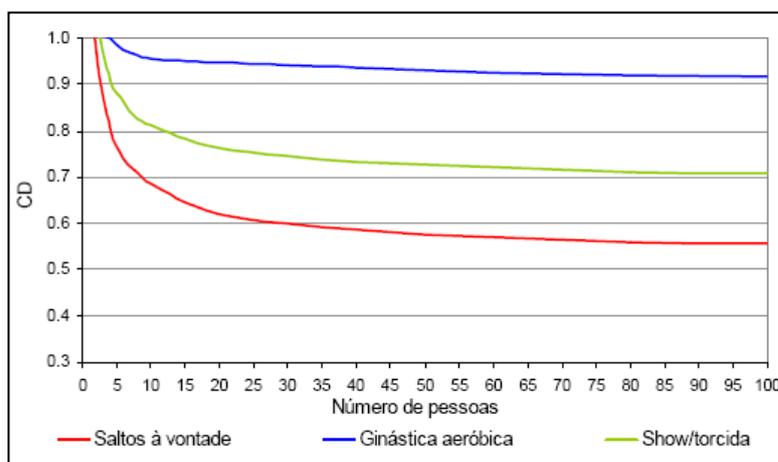
Dos parâmetros citados anteriormente, o coeficiente de impacto ( $K_p$ ), é um parâmetro que considera o impacto do salto sobre a edificação. Já o coeficiente de defasagem (CD) considera o grau de sincronismo na realização das atividades conforme o número de pessoa as praticando.

A obtenção do CD ocorreu através da razão entre o máximo da soma da força dinâmica de várias pessoas e a soma de cada um dos máximos de cada sinal, sendo representada pela Equação 1.

$$CD = \frac{\text{Pico do Sinal da Soma}}{\sum_{i=1}^n k_{pi}} \quad (1)$$

A Figura 5 representa o gráfico do coeficiente de defasagem (CD), para três atividades estudadas por Faisca (2003), extrapoladas para um grande número de pessoas. Isso permite que as cargas possam ser usadas para representar multidões.

Figura 5 – Coeficientes de defasagem para as atividades propostas



Fonte: FAISCA, 2003.

Percebe-se através da Figura 5, que o coeficiente de defasagem não varia muito para a atividade aeróbica como varia para a atividade de saltos à vontade, na medida em que o número de pessoas é aumentado. A partir da Figura 5 foi montado o Quadro 1, onde são apresentados os valores numéricos de CD relacionados ao número de pessoas (FAISCA, 2003).

Quadro 1 – Valores do coeficiente de defasagem (CD)

Nº de Pessoas	Ginástica aeróbica	Show/Torcida	Saltos à Vontade
12	0,95	0,80	0,67
90	0,92	0,71	0,56

Fonte: FAISCA, 2003.

A partir das diferentes situações estudadas por Faisca (2003) que avaliaram a influência da flexibilidade da estrutura nas respostas, foram obtidos diferentes resultados para os parâmetros que caracterizam cada atividade. No Quadro 2 são apresentados os valores das médias e desvios-padrão dos parâmetros T, Tc e Kp adotados neste trabalho para representar as atividades mencionadas.

Quadro 2 - Parâmetros utilizados nas análises

<b>Atividade</b>	<b>T (s)</b>	<b>Tc (s)</b>	<b>Kp</b>
Saltos à vontade	0,44±0,15	0,32±0,09	3,17±0,58
Ginástica aeróbica	0,44±0,09	0,34±0,09	2,78±0,60

Fonte: FAISCA, 2003.

A estrutura estudada neste projeto de pesquisa apresenta o carregamento de 12 e 90 pessoas com peso aproximado de 800 N, Este carregamento é considerado com pouca e máxima ocupação da estrutura, pois tem a finalidade de inferir a avaliação criteriosa das ações em atividade rítmica aeróbica em um período de atividade (T) igual a 0,44 segundos, onde o tempo de contato (Tc) com a estrutura é de 0,34 segundos. O tipo de atividade fornece um coeficiente de impacto (Kp) igual a 2,78 e um coeficiente de defasagem (CD) de 0,95 para 12 pessoas e 0,92 para 90 pessoas.

### 2.3 Descrição do estudo

Foi realizado um estudo de cenário baseado em um edifício dimensionado através do software de cálculo e projeto estrutural CypeCad, onde considerou-se uma estrutura típica de 5 andares, nesta pesquisa são estudados modelos mistos compostos por vigas de aço e laje maciça de concreto. A partir desse dimensionamento, foram gerados modelos que diferem, somente no carregamento ao qual a estrutura é submetida, são eles 12 e 90 pessoas.

O modelo estrutural de estudo foi desenvolvido e modificado a partir da geometria de um exemplo numérico descrito no Steel Design Guide Series, número 11, desenvolvido pelo American Institute of Steel Construction (AISC) (1997).

Os carregamentos considerados, são aqueles provenientes da atividade rítmica aeróbica, foco deste estudo. Após a definição dos carregamentos, a análise das influências dessas excitações, são analisadas por meio do software Ansys em que as características do estudo foram escritas em linguagem APDL uma forma de inserção mais rápida para a modelagem da edificação.

Nestes modelos são empregadas técnicas usuais de discretização através do método dos elementos finitos, por meio do programa computacional Ansys (versão 12.1). Na modelagem, as vigas e os pilares são simulados por elementos finitos que consideram os efeitos de flexão e de torção. As lajes são simuladas por meio de elementos finitos de placa. Além disso, para

garantir que os modelos funcionem como um sistema misto, são utilizadas conexões do tipo “off-set” na ligação entre a laje e as vigas. Isso é feito para garantir a compatibilidade de deformações entre os nós dos elementos de viga e dos elementos de casca. Considera-se também, que os materiais, aço e concreto, trabalham no regime elástico-linear.

A cada modelagem, a carga de pessoas foi exposta a um piso referente a um andar, e todos os pontos centrais intrínsecos aos pisos ao redor da carga aplicada foram estudados, afim de confrontar tais resultados com a norma, no que tange não somente os estados de limite últimos, mas também os estados de limite de serviço.

Para tanto, os dados colhidos do software Ansys, foram comparados aos resultados da função Hanning, onde pode-se encontrar o coeficiente de defasagem da estrutura para cada carga aplicada. E após também utilizando os dados gerados pela modelagem no Ansys, por meio dos gráficos de deslocamento x tempo e aceleração x tempo, os parâmetros de deformação da estrutura

### **3. ESTUDO DE CENÁRIO**

Este capítulo apresenta a geometria dos modelos computacionais, as propriedades geométricas das peças e as propriedades físicas dos materiais. É também apresentada a descrição dos elementos finitos empregados na análise, a definição da malha utilizada nas análises e a modelagem do amortecimento dos sistemas.

O modelo estrutural considerado, foi projetado através do software de cálculo e projeto estrutural CypeCad, cujos recursos para detalhamento e dimensionamento estão de acordo com as normas brasileiras, dentre elas a ABNT NBR 6118:2007 para concreto armado. A estrutura investigada, corresponde a um edifício de 5 andares com pisos compostos por lajes maciças de concreto armado, apoiadas sobre vigas principais e secundárias de aço, com seção transversal referentes a perfis do tipo “I” e pilares de perfis também metálicos, configurando assim a interação total do sistema misto (aço- concreto).

A laje possui dimensões totais (eixo a eixo de colunas) de 9 m x 20 m, totalizando uma área de 180 m<sup>2</sup>, nos quais foram divididos em 10 painéis com dimensões de 9m x 10m. O espaçamento entre as vigas secundárias é igual a 3 m, enquanto nas vigas principais é 10 m. Os pilares têm uma altura de 5m e se situam nas extremidades dos painéis. A visualização da vista superior do piso misto e da seção transversal do painel, respectivamente, está ilustrado na próxima seção 3.1.5 (Modelos Estruturais Considerados).

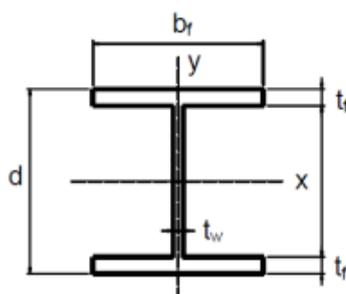
Os perfis metálicos utilizados constituintes do piso misto, como as vigas principais centrais, as quais se apoiam nos pilares, e as colunas, são compostas por perfis do tipo W 530x92. As vigas secundárias de periferia, as quais também se apoiam nos pilares, são compostas por perfis do tipo W 360x64, e as vigas internas apoiadas nos pilares são do tipo W 250x32,7. As características geométricas dos perfis de aço estão descritas nos Quadros 3. A figura 6 representa a seção genética dos perfis do tipo “I”.

Quadro 3 – Propriedades geométricas dos perfis de aço

Propriedades	Tipo de perfil				
	Viga				Coluna
		W 250 x 32,7	W 360 x 64	W 530 x 92	W 530 x 92
Altura (d)		258	347	533	533
Largura da mesa (bf)		146	203	209	209
Espessura da mesa superior (tf)	mm	9,1	13,1	15,6	15,6
Espessura da mesa inferior (tf)		9,1	13,1	15,6	15,6
Espessura da alma (tw)		6,1	7,7	10,2	10,2
Área da Seção (As)		mm <sup>2</sup>	42,1x10 <sup>2</sup>	81,7x10 <sup>2</sup>	117,6x10 <sup>2</sup>
Inércia da Seção (Is)	mm <sup>4</sup>	493,7x10 <sup>6</sup>	178,90x10 <sup>7</sup>	551,57x10 <sup>7</sup>	551,57x10 <sup>7</sup>

Fonte: ABNT NBR 8800:2006

Figura 6 – Seção genérica dos perfis adotados.



Fonte: ADAPTADO, Tabela de Bitolas Gerdau

Em relação às propriedades físicas, os perfis metálicos do tipo “I” são constituídos por um aço com limite de escoamento de 250 MPa. Para vigas de aço foi considerado um módulo de elasticidade igual a 210 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e massa específica igual a 7.850 kg/m<sup>3</sup>. O concreto da laje possui resistência característica a compressão de 30 MPa, módulo de elasticidade igual a 24 GPa, massa específica igual a 2.500 kg/m<sup>3</sup> e coeficiente de Poisson de 0,2 conforme a ABNT NBR 8800:2008.

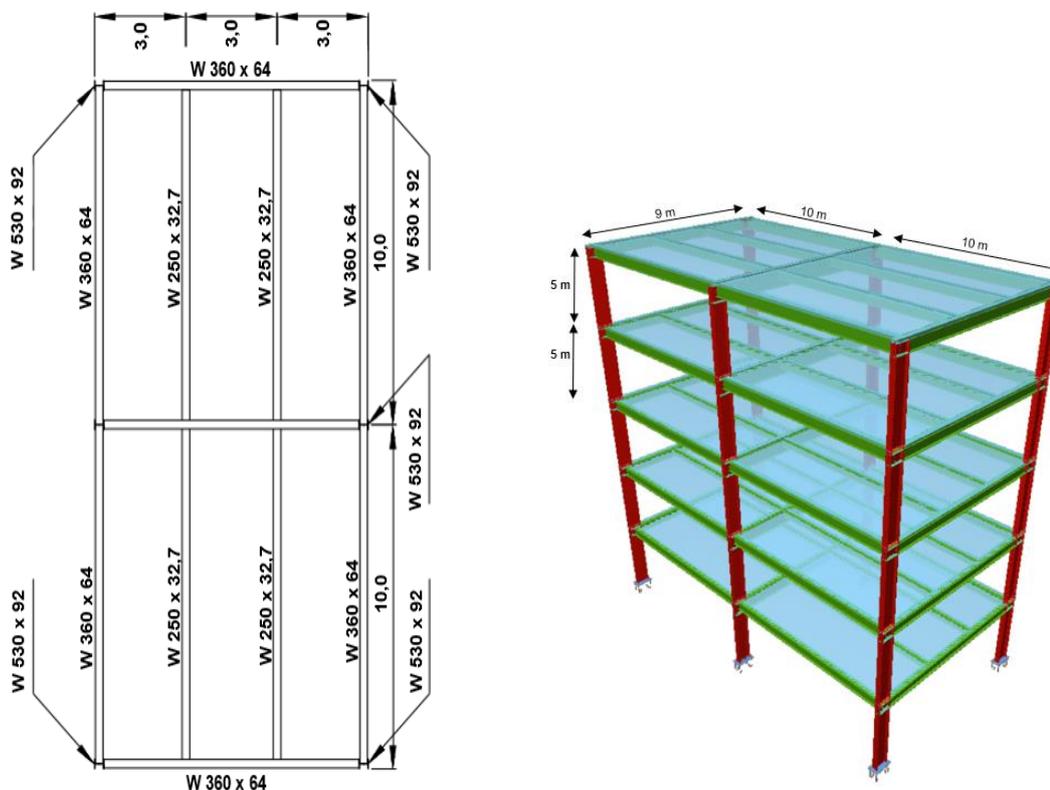
### 3.1 Modelos Estruturais Considerados

A Figura 7 apresenta um esquema do modelo estrutural estudado em planta, caracterizando a vista superior do edifício e um esquema do modelo estrutural isométrico genérico e a Figura 8 ilustra a seção transversal genérica do pavimento dos pisos em estudo

A laje de concreto dos pisos possui espessura de 0,10 m. A dimensão do vão das vigas verticais W 360 x 64 é mantida constante e igual a 9,0 m, como mostrado na Figura 7. O espaçamento entre as vigas secundárias W 250 x 32,7 é mantido constante e igual a 3,0 m e os vãos entre as vigas horizontais W 360 x 64 também possui dimensão fixa, ao longo da análise, igual a 10,0 m, conforme apresentado na Figura 7.

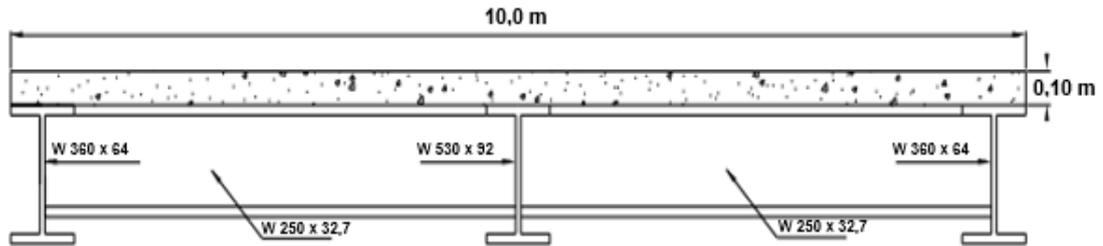
A altura das colunas de aço é considerada igual a 5,0 m. As extremidades das colunas foram modeladas com apoios de segundo gênero. As ligações entre os elementos estruturais no piso, que são as ligações viga-viga e viga-coluna são consideradas respectivamente flexíveis e rígidas. É importante notar que o sistema estrutural atende ao estado limite último (ELU) segundo a ABNT NBR 8800:2008.

Figura 7 - Modelo estrutural em planta e isométrico



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019

Figura 8 - Seção transversal genérica do pavimento do piso em estudo



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

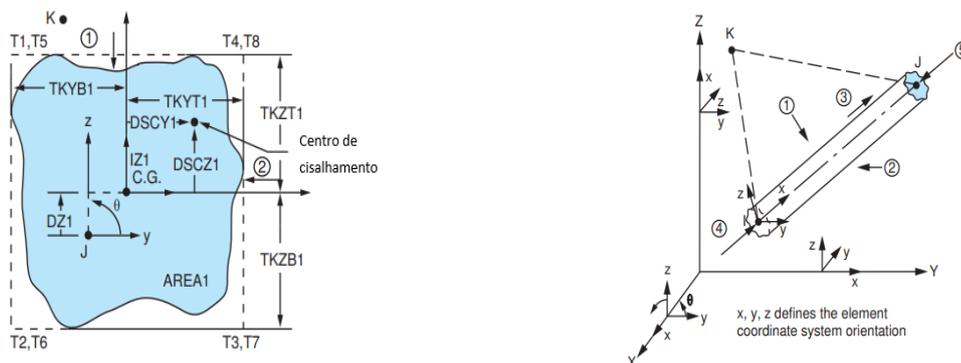
### 3.2 Definição dos Modelos Computacionais

No desenvolvimento dos modelos numérico-computacionais da estrutura, foram empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos, por meio do emprego do programa computacional Ansys. Neste modelo de piso misto utilizou-se o elemento finito tridimensional BEAM44, para representar as vigas e colunas de aço treliçadas (joists), no qual os efeitos de flexão e de torção são considerados. A laje de concreto armado foi representada por elementos de casca do tipo SHELL63.

O modelo do piso misto resultou em uma estrutura com 15561 nós, 2740 elementos tridimensionais de viga, 14400 elementos de casca, e 93348 graus de liberdade, de acordo com o modelo numérico desenvolvido no programa ANSYS. Além disso, levando-se em consideração a densidade do material 1 (aço) igual a 7.850 kg/m<sup>3</sup> e do material 2 (concreto) 2.550 kg/m<sup>3</sup>, o sistema gerou massas modais de 39.363,0 kg e 229.500,0 kg para os materiais 1 e 2 respectivamente.

O elemento BEAM44, apresentado na Figura 9, possui seis graus de liberdade por nó sendo três translações e três rotações nas direções x, y e z. Ele permite a utilização de diferentes geometrias nas extremidades opostas da barra. A orientação do elemento vai do nó I para o nó J, sendo esse eixo o x. Os eixos principais y e z estão localizados na seção transversal.

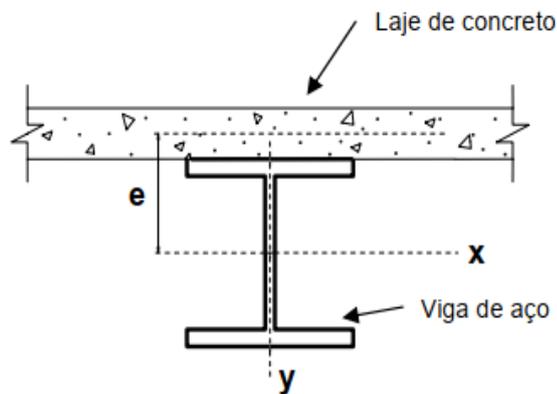
Figura 9 – Elemento BEAM 44



Fonte: ANSYS, 2012.

A grande vantagem deste elemento é a possibilidade de permitir considerar a excentricidade existente entre o eixo da viga e o plano médio da laje. Assim, esta excentricidade garante a compatibilidade de deformações entre os nós dos elementos de viga tridimensionais e os elementos de placa e influência de forma direta frequências naturais do modelo. Dessa forma, este modelo simula a situação real entre as lajes e as vigas, como apresentado na Figura 10.

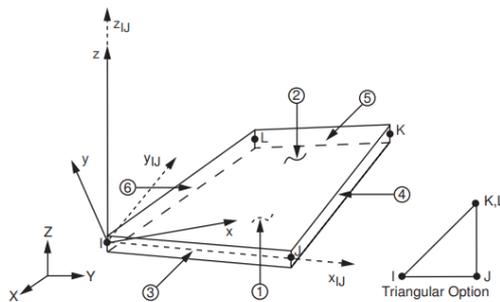
Figura 10 – Excentricidade entre a laje a viga



Fonte: LOOSE, 2007.

O elemento de placa SHELL 63 é definido por quatro nós, quatro espessuras e considera efeitos de membrana e/ou flexão. O elemento tem seis graus de liberdade por nó sendo três translações e três rotações nas direções x, y e z, como mostra a Figura 11, e admite a utilização de cargas normais e no plano.

Figura 11 – Elemento SHELL 63

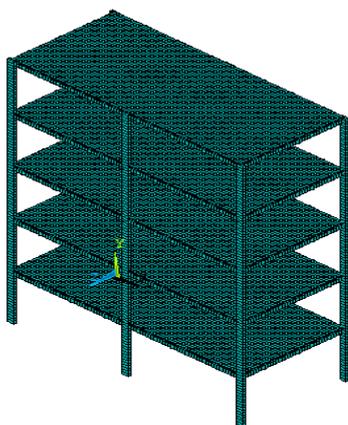


Fonte: ANSYS, 2012.

### 3.3 Malha de Elementos Finitos

Com base em estudos anteriores que definem o tamanho da malha de elementos finitos para análise de vibração livre, foi adotada a dimensão de 0,25m para os elementos de viga e pilar, e 0,25m x 0,25m para os elementos de laje. Desse modo, os modelos numéricos possuem um grau de refinamento adequado, permitindo uma boa representação do comportamento estrutural (frequências naturais, modos de vibração) e precisão das análises realizadas (deslocamentos e acelerações).

Figura 12 - Modelo em elementos finitos do piso misto (aço-concreto)

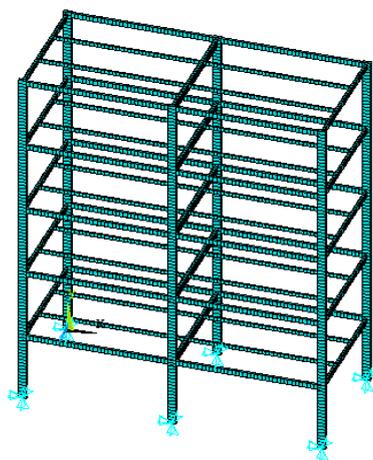


Elementos: 17140  
Beam44: 2740  
Shell63: 14400  
Nº de nós: 15561  
Graus de Liberdade: 93348  
Massa modal do material 1: 39.363,0  
Massa modal do material 2: 229.500,0

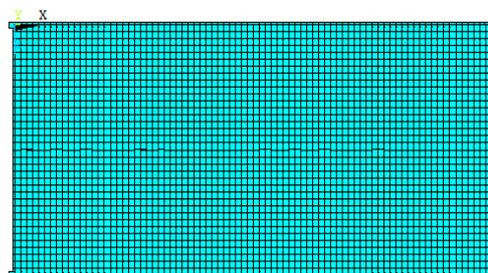
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019

Figura 13 – Vista isométrica e superior do modelo em elementos finitos (aço-concreto)

Vista isométrica



Vista superior



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

### 3.4 Esquema da Aplicação das Cargas e Pontos de Análise

Nesta investigação foram aplicados carregamentos dinâmicos sobre os modelos estruturais correspondentes a 12 pessoas e ao limite de carga de 90 pessoas, como ilustrado nas Figura 14, respectivamente. A distribuição foi feita utilizando uma taxa e ocupação da ordem de 0,25 pessoas/m<sup>2</sup> (Bachmann & Ammann, 1987), centradas no painel de laje. Foi considerado, ainda, que o peso de uma pessoa é igual a 800N (Bachmann & Ammann,1987).

A ação dinâmica induzida pelo ser humano (ginástica aeróbica) é aplicada sobre a laje de cada dos pavimentos nos nós centrais do 1 ao 5 pavimento da esquerda e da direita, o mesmo acontece com os andares subsequentes, esses nós são denominados com letras de A à J, onde:

Quadro 4 - Nós centrais

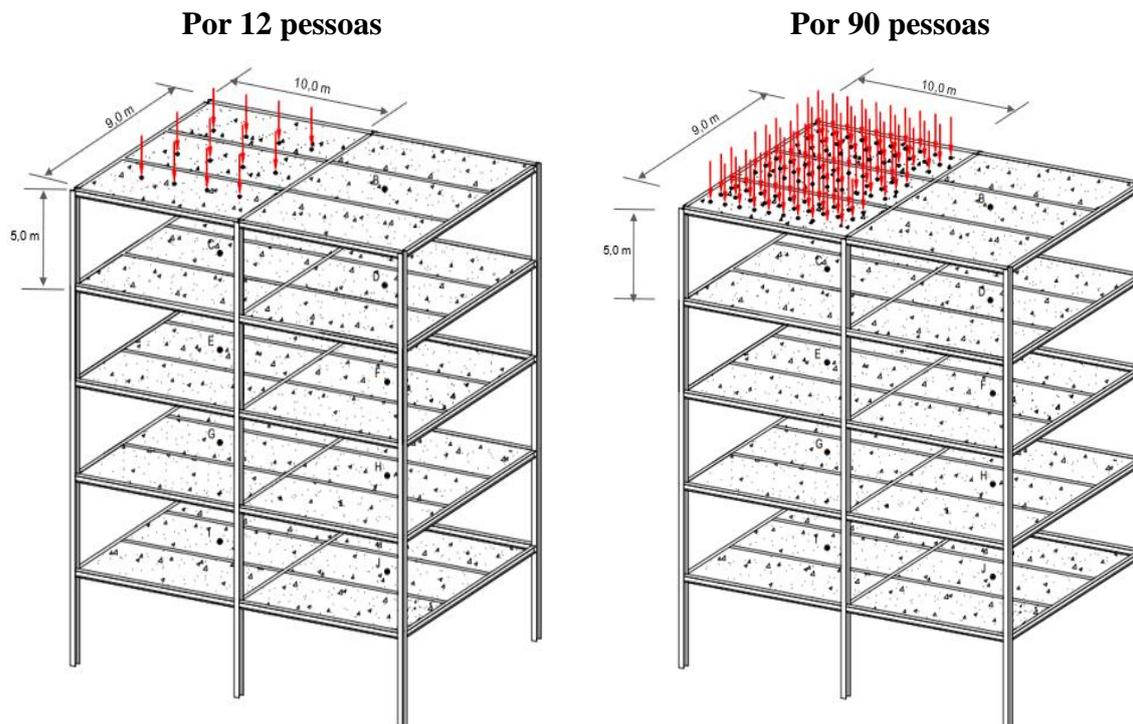
<b>Posição</b>	<b>Nó central</b>	<b>Posição</b>	<b>Nó central</b>
5° piso da esquerda	Nó A - 13631	3° piso da direita	Nó F - 9770
5° piso da direita	Nó B - 14918	2° piso da esquerda	Nó G - 5909
4° piso da esquerda	Nó C - 11057	2° piso da direita	Nó H - 7196
4° piso da direita	Nó D - 12344	1° piso da esquerda	Nó I - 3335
3° piso da esquerda	Nó E - 8483	1° piso da direita	Nó J - 4622

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

A resposta dinâmica (deslocamentos translacionais verticais e acelerações máximas) é obtida sobre o nó de cada um dos 9 pavimentos restantes, afim de serem avaliados os níveis de vibrações no piso onde são aplicadas as cargas, conseqüentemente no pavimento imediatamente ao lado, com o objetivo de verificar a influência da excitação nas lajes dos pisos laterais, e nos pavimentos inferiores ou superiores, com o objetivo de verificar a influência da excitação sobre essas as lajes.

As setas em vermelho, simbolizam o número de pessoas praticando atividade rítmica sobre o piso. Na Figura 14 há uma influência de carga referente a 12 e 90 pessoas. O número de indivíduos escolhido levou em conta critérios extremos, por exemplo, uma sala relativamente vazia, mas que ainda sim o número de pessoas causaria efeito sobre a estrutura e uma sala com a capacidade máxima de pessoas ao qual seu dimensionamento suporta, ou seja, completamente lotada.

Figura 14 - Carregamento dinâmico devido a cargas aplicadas



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

### 3.5 Modelagem do Amortecimento

O amortecimento é o fenômeno pelo qual a energia mecânica de um sistema é dissipada, sendo uma propriedade dinâmica cujo efeito sobre a resposta de uma estrutura é facilmente verificado quando associado à sua vibração livre. Para Carvalho apud Silva o amortecimento relaciona-se com a mensuração da dissipação de energia de uma estrutura em vibração que resulta em trazê-la a um estado de equilíbrio. A importância da estimativa do amortecimento vem sendo mais significativa à medida que as estruturas têm se tornando mais flexíveis. Nessas estruturas, os níveis de oscilação podem não ser significativos o bastante para causar danos, mas podem provocar desconforto aos ocupantes da edificação. Por esse motivo torna-se fundamental uma boa estimativa para o amortecimento.

A maneira mais adequada de definição do amortecimento estrutural é utilizando a taxa de amortecimento modal em vez de obter os coeficientes da matriz de amortecimento, visto que a taxa de amortecimento modal ou contribuição pode ser determinada experimentalmente ou estimada com adequada precisão, de acordo com Clough e Penzien (1993). Entretanto, existem casos em que é necessária a determinação da matriz de amortecimento para a obtenção da resposta dinâmica. Nestes casos, a análise dinâmica transiente é realizada através do método de integração numérica de Newmark.

Para tanto avaliar corretamente o amortecimento de uma estrutura seria necessário realizar ensaios experimentais, situação que demanda um alto custo. Por isso, o amortecimento é usualmente obtido através da matriz de amortecimento de Rayleigh, que considera uma contribuição da matriz de rigidez ( $\delta$ ) e uma contribuição da matriz de massa ( $\alpha$ ), que pode ser visto através da Equação 2. Sendo que  $M$  é a matriz de massa e  $K$  é a matriz de rigidez do sistema segundo Clough e Penzien (1993) e Chopra (2007).

$$C = \alpha M + \delta K \quad (2)$$

Em termos da taxa de amortecimento modal e frequência natural circular (rad/s), a Equação 3 pode ser escrita como:

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_{0i}} + \frac{\delta\omega_{0i}}{2} \quad (3)$$

Onde:

$\xi_i$ : taxa de amortecimento do modo  $i$ ;

$\omega_{0i}$ : frequência natural circular do modo  $i$ ;

O AISC (2010) indica valores para a taxa de amortecimento modal de acordo com as condições do piso. A partir de tais indicações, fixou-se o coeficiente de amortecimento igual a 3% ( $\xi = 3\%$ ) para a análise da estrutura. Essa taxa leva em conta a variação da existência de elementos que contribuem com o amortecimento da estrutura.

Abaixo apresentamos o Quadro 5 contendo os valores de  $\alpha$  e  $\delta$ , para o modelo de 5 andares, por taxa de amortecimento adotado em função das frequências fundamentais dos dois primeiros harmônicos encontrados na vibração livre.

Quadro 5 - Valores de  $\alpha$  e  $\delta$  por taxa de amortecimento

Modelo de 5 andares		
$\xi$ (%)	$\alpha$	$\delta$
3%	0.054589122	0.013469253

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

### 3.6 Análise Estática

Esta análise consiste na determinação do deslocamento máximo que ocorre devido a um carregamento estático. Na realização desta análise utilizou-se os dados utilizados no dimensionamento da estrutura feita através do software CypeCad (2016).

O carregamento estático é constituído pelas cargas provenientes das ações permanentes, relativo ao peso próprio e de elementos construtivos fixos, e variáveis, correspondentes ao tipo de utilização da estrutura. O peso próprio e revestimento permanente da estrutura utilizado foi de 1 kN/m<sup>2</sup>, enquanto a carga de utilização do piso é de 1,5 kN/m<sup>2</sup>, baseada na ABNT NBR 6120:2003 no item 2.2 da tabela 2. Desta maneira, o carregamento estático total é majorado conforme as definições da norma.

Em relação às normas de projeto vigentes, o anexo L da NBR 8800/2008, referente à vibração de estruturas destinadas a atividades rítmicas, tais como academias, o deslocamento vertical total do piso causado pelas ações variáveis, calculado considerando-se as vigas como biapoiadas e usando-se as combinações frequentes de serviço, dadas em 4.7.7.3.3, não supere 5 mm. Por outro lado, a mesma norma, no seu item Q.3.2.2, estabelece que o deslocamento vertical de lajes mistas de aço e concreto não pode ser maior que  $LF/350$ , onde  $LF$  é o vão teórico da laje na direção das nervuras.

No entanto, a estrutura considerada foi dimensionada com propósito inicial de abrigar um edifício residencial, ou escritório, desprovidos assim de carga dinâmica. Deste modo, considera-se o limite das vigas referente aos elementos estruturais, igual a  $L/250$  conforme a tabela 13.2 (ABNT NBR 6118:2003, p.70), já citado anteriormente. Como o maior vão da estrutura é 10m obtém-se o valor de 40 mm como o deslocamento máximo permitido.

Comparando-se com o deslocamento máximo da estrutura que é igual a 39,79 mm, desse modo percebe-se que o valor limite da estrutura não ultrapassa a norma ABNT NBR 6118:2007.

### **3.7 Análise Paramétrica**

A partir do programa Ansys (2012) foram realizadas análises de vibração livre, e a partir delas obtém-se as frequências naturais (autovalores) e os modos de vibração dos pisos (autovetores), segundo Avelino (2008), esta análise constitui uma indicação de como esta responderá ao carregamento atuante sobre a mesma. Por fim foram realizadas análises de vibração forçada. Para isso foi adotado um modelo matemático, que sofreu variações no que diz respeito ao amortecimento imposto à estrutura.

Utilizando de simulações numéricas foram determinadas as frequências naturais e os modos de vibração do modelo. Comparativamente, foi apresentado o valor da frequência fundamental calculada no AISC (2010), para o exemplo original considerando o carregamento estimado para eventos com atividades rítmicas.

Quadro 6 - Resumo das Frequências Fundamentais dos Modelos em Estudo

Frequências Naturais (Hz) – Modelo de 5 andares									
$f_{01}$	$f_{02}$	$f_{03}$	$f_{04}$	$f_{05}$	$f_{06}$	$f_{07}$	$f_{08}$	$f_{09}$	$f_{10}$
0,20	0,50	0,54	0,70	1,26	1,79	1,84	2,07	2,18	3,88

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Observa-se, no Quadro 6, que os valores das frequências naturais aumentam em que se apresentam os modos de vibração, onde observa-se que o primeiro e o terceiro modos de vibração correspondem a modos onde a flexão é o efeito dominante, enquanto que o segundo, o quinto e o sexto modo de vibração correspondem a modos de torção, sendo que o quarto modo de vibração é correspondente a um modo de flexo-torção.

Através da análise modal, seis primeiras frequências naturais do piso misto, variando de 0,20 a 1,79Hz (Quadro 6), encontram-se distantes a faixa da frequência de excitação correspondente ao terceiro harmônico de atividades aeróbicas, variando de 5,66 a 8,57Hz (Faisca, 2003). Isso mostra que a estrutura em questão é bastante flexível dificultando que a frequência de excitação se iguale a uma dessas frequências naturais, o que levaria a ressonância do piso. Vale ressaltar que o posicionamento do carregamento pode contribuir para a amplificação das vibrações, principalmente nos pontos de maior amplitude modal.

O Quadro 7 mostra os valores mínimos de frequência natural fundamental da estrutura, de acordo com as normas de critérios de projeto destinada a atividades rítmicas praticadas sobre pisos.

Quadro 7 – Frequências naturais recomendadas para atividade aeróbica

<b>Crítérios de projeto</b>	<b>Atividade praticada</b>	<b>Freq. natural (Hz)</b>
ABNT NBR 8800	Ginástica aeróbica	8
ABNT NBR 6118	Ginásio de esportes	9,6
Guia AISC	Ginástica aeróbica para pisos leves	9,2

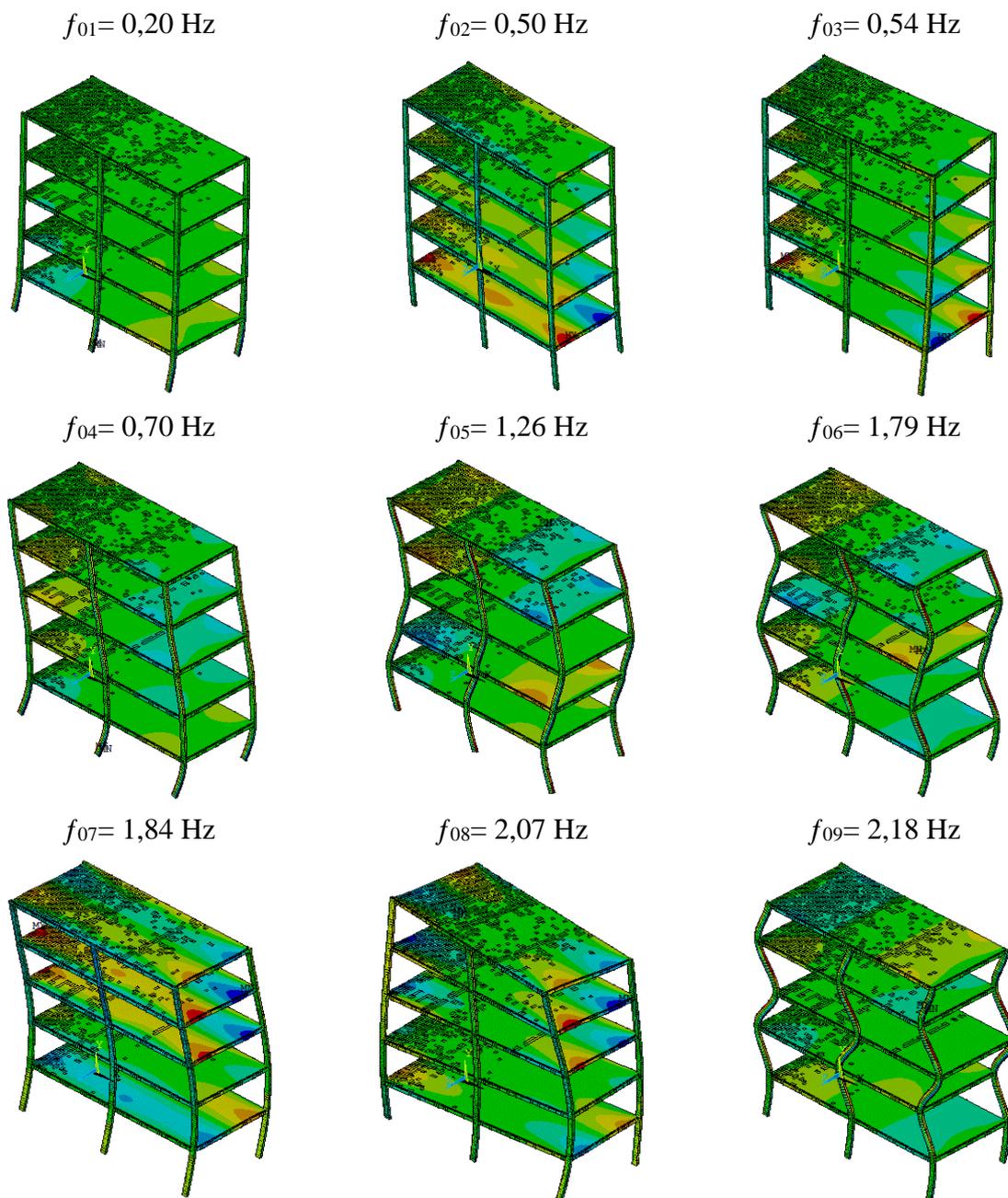
Fonte: ABNT NBR 8800:2008 [15]; ABNT NBR 6118:2007 [16]; Guia AISC, 1997 [28]

Comparando os valores indicados pelas normas e guia de projeto, presentes na Quadro 7, com a frequência fundamental do piso ( $f_{01}=0,20\text{Hz}$ ), conclui-se que o piso está abaixo do valor mínimo recomendado. Esta situação remete a uma baixa probabilidade de problemas relacionados a vibrações excessivas.

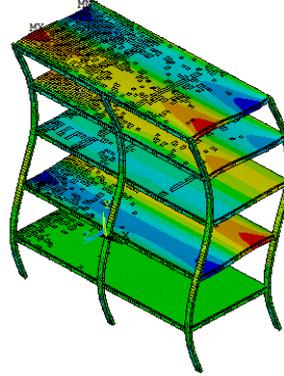
### 3.8 Modos de Vibração

A seguir, são apresentadas as formas modais do modelo proposto. Essas formas apresentam características bem regulares, importantes para o conhecimento do comportamento dos modelos. Na representação do modelo isométrico, as tonalidades mais claras apresentam às menores amplitudes e as tonalidades mais escuras as maiores amplitudes. O primeiro modo tem amplitude mais elevada nas coordenadas centrais dos modelos e conseqüentemente a menor frequência natural. Percebe-se que a maioria dos modos de vibração estão associados aos modos de predominância de flexão e torção dos pilares.

Figura 15 - Modos de vibração referente às 10 primeiras frequências naturais



$$f_{10} = 3,88 \text{ Hz}$$



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

### 3.9 Comportamento geral dos modelos

Inicialmente, busca-se avaliar o comportamento dinâmico global do modelo de piso misto (aço-concreto), quando submetido ao carregamento dinâmico, correspondente a ginástica aeróbica exercida por 12 pessoas. Os parâmetros utilizados para esta análise foram os seguintes:  $T = 0,44 \text{ s}$ ,  $T_c = 0,34 \text{ s}$ ,  $K_p = 2,78$  e  $CD = 0,95$ .

Na sequência do estudo, a análise foi ampliada para o estudo do caso de carregamento associado a 90 pessoas praticando ginástica aeróbica, considerando os seguintes parâmetros experimentais:  $T = 0,44 \text{ s}$ ,  $T_c = 0,34 \text{ s}$ ,  $K_p = 2,78$  e  $CD = 0,92$ . Em ambos os casos não há variação da taxa de amortecimento.

Para as análises seguintes, foram exemplificados os gráficos referentes aos efeitos de vibração, proveniente da aplicação das cargas, somente no quinto andar. Isso se deve ao fato de os efeitos serem mais expressivos nos pontos mais alto da estrutura.

### 3.10 Análise no domínio do deslocamento

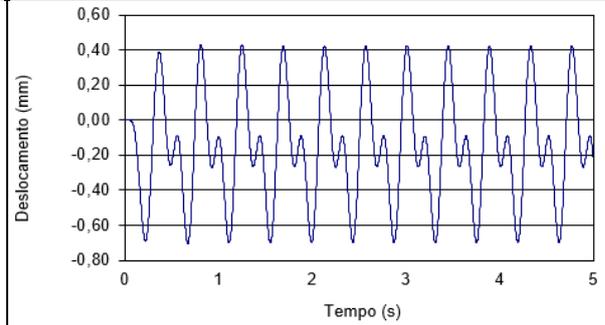
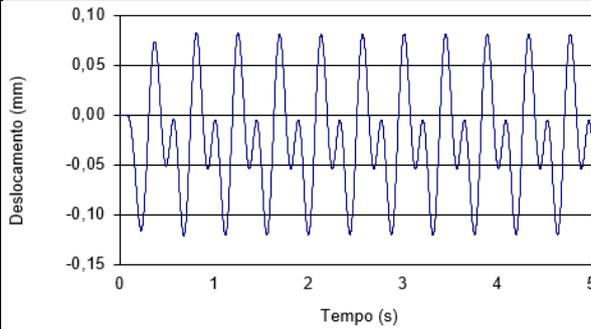
As respostas dinâmicas do piso misto, em termos dos deslocamentos translacionais verticais (mm), obtidos nos nós centrais objetos de análise, são dispostos nos gráficos abaixo do Quadro 8.

Quadro 8 - Deslocamentos obtidos nos pontos

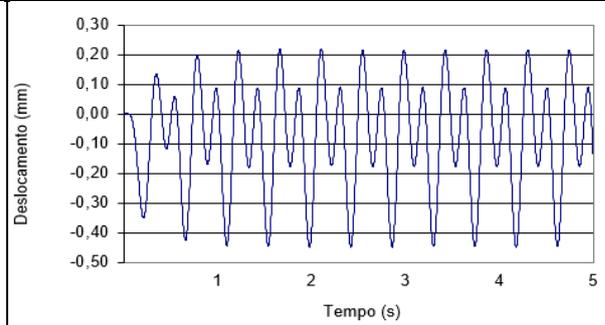
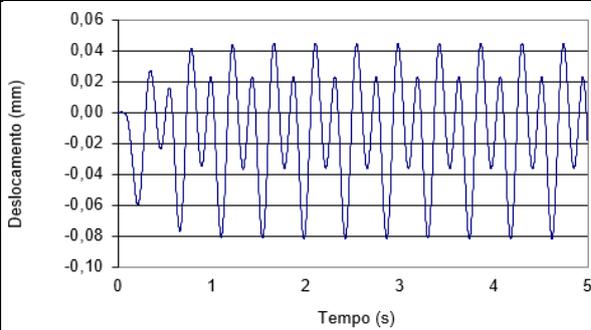
Carga aplicada por 12 pessoas	Carga aplicada por 90 pessoas
Distribuição espacial de pessoas: Ponto A – 5º piso da esquerda.	
<b>Efeito gerado no ponto A – 5º piso da esquerda</b>	
<b>Efeito gerado no ponto B – 5º piso da direita</b>	
Distribuição espacial de pessoas: Ponto C – 4º piso da esquerda.	
<b>Efeito gerado no ponto A – 5º piso da esquerda</b>	
<b>Efeito gerado no ponto B – 5º piso da direita</b>	

Distribuição espacial de pessoas: ponto E – 3º piso da esquerda.

**Efeito gerado no ponto A – 5º piso da esquerda**

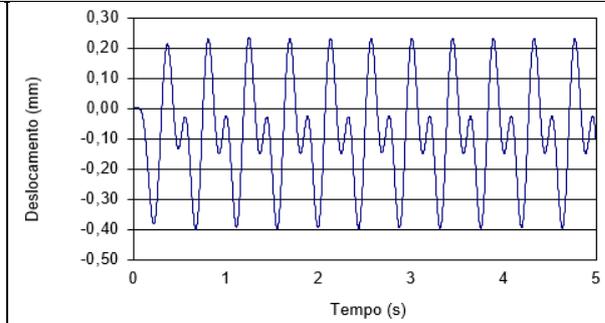
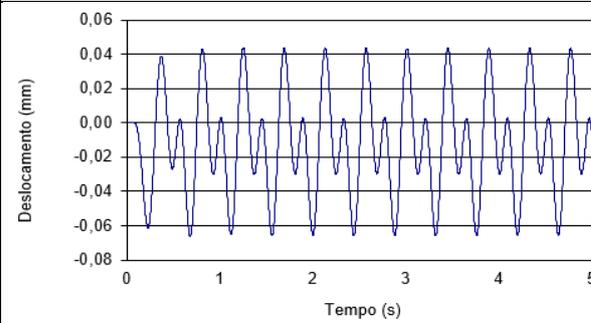


**Efeito gerado no ponto B – 5º piso da direita**

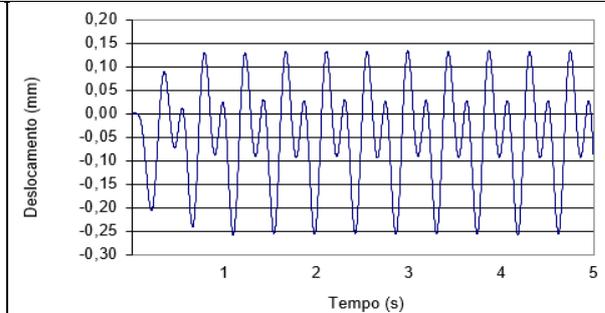
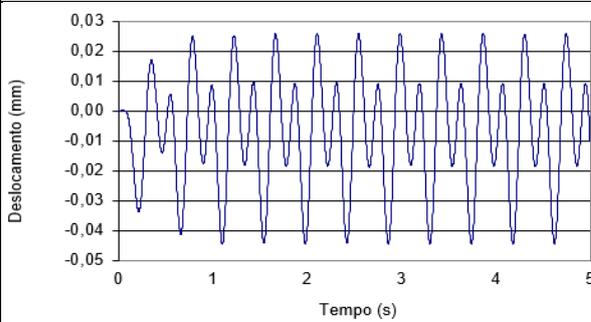


Distribuição espacial de pessoas: ponto G – 2º piso da esquerda.

**Efeito gerado no ponto A – 5º piso da esquerda**

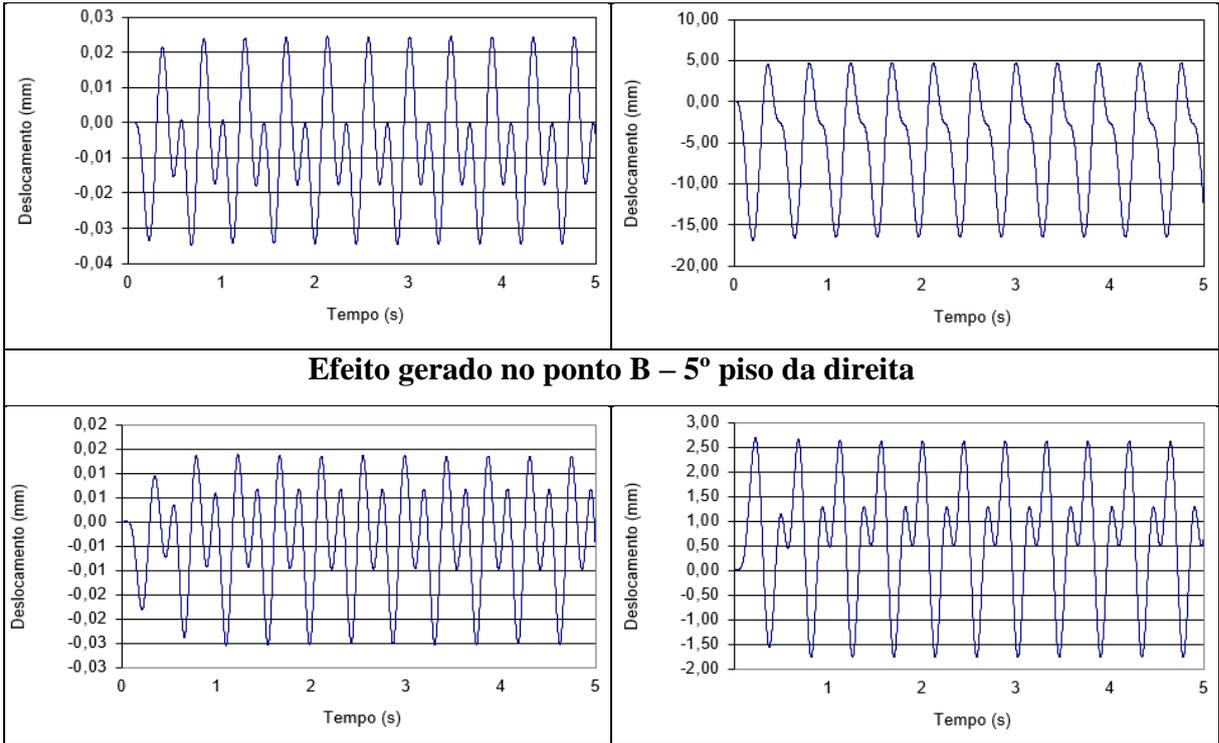


**Efeito gerado no ponto B – 5º piso da direita**



Distribuição espacial de pessoas: ponto I – 1º piso da esquerda.

**Efeito gerado no ponto A – 5º piso da esquerda**



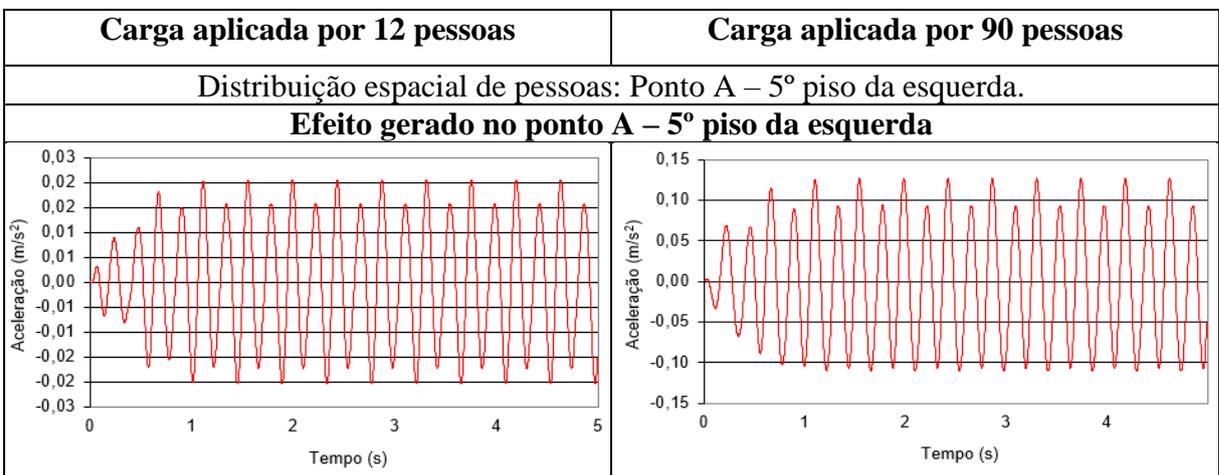
Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Os sinais no tempo mostrados nos gráficos acima (Quadro 8) em termos dos deslocamentos, apresentam em alguns pontos uma pequena fase transiente, e logo após a fase permanente é atingida. A fase transiente é mais evidente nos gráficos referentes ao carregamento induzido por 90 pessoas.

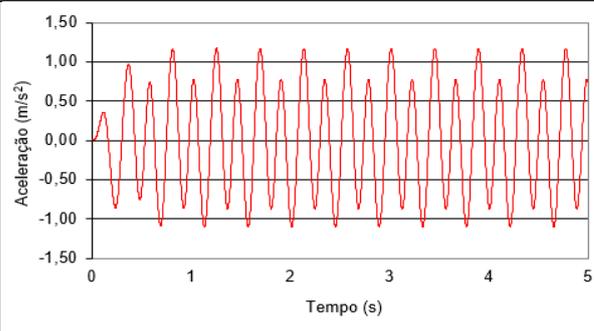
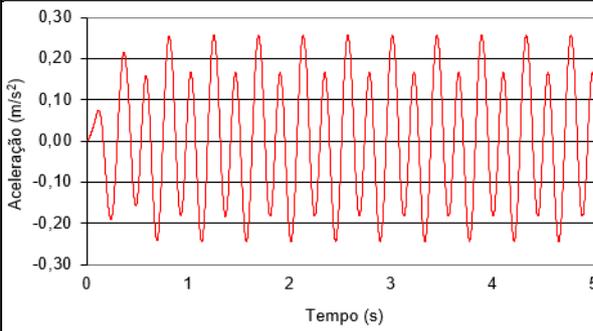
### 3.11 Análise no domínio da aceleração

As respostas dinâmicas do piso misto, em termos de acelerações ( $m/s^2$ ) obtidos nos nós centrais objetos de análise, são dispostos nos gráficos abaixo. A partir desses gráficos é possível encontrar a aceleração de pico ( $a_p$ ).

Quadro 9 - Acelerações obtidas nos pontos

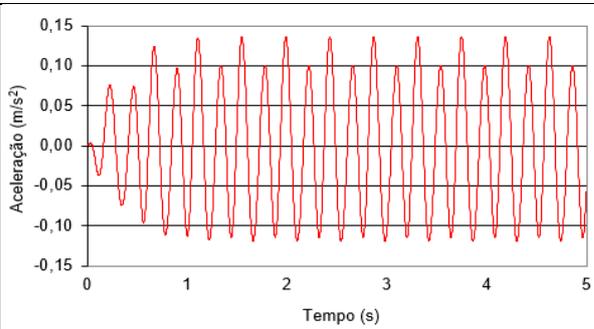
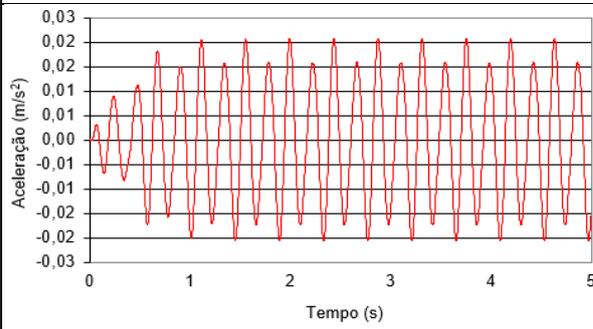


**Efeito gerado no ponto B – 5º piso da direita**

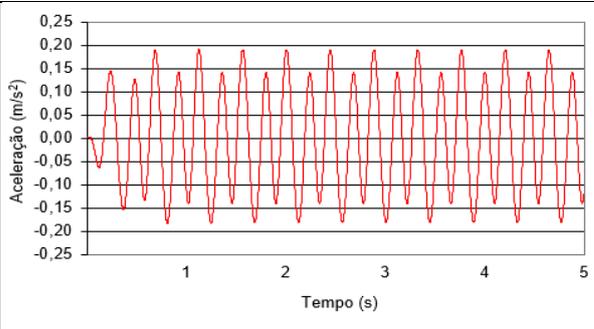
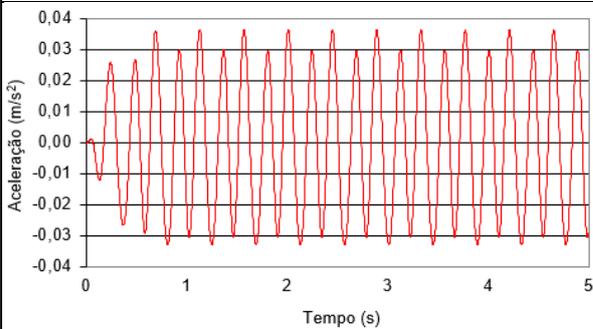


**Distribuição espacial de pessoas: Ponto C – 4º piso da esquerda.**

**Efeito gerado no ponto A – 5º piso da esquerda**

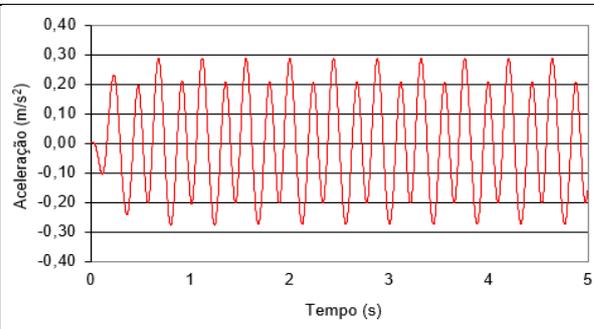
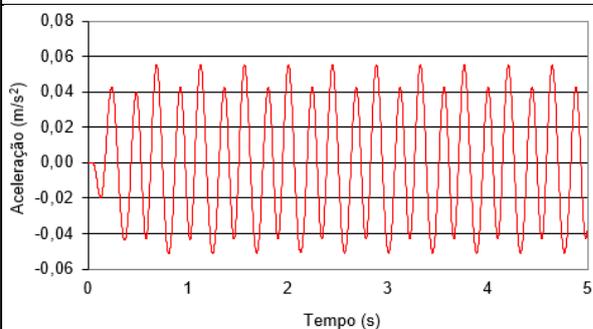


**Efeito gerado no ponto B – 5º piso da direita**



**Distribuição espacial de pessoas: ponto E – 3º piso da esquerda.**

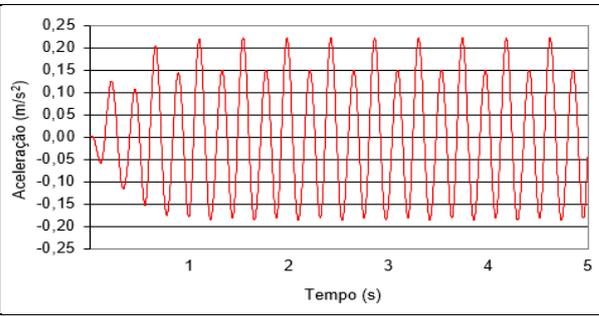
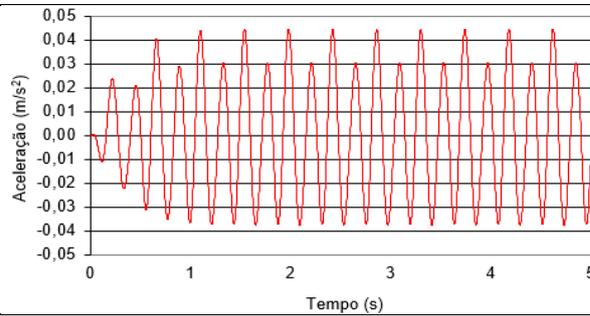
**Efeito gerado no ponto A – 5º piso da esquerda**



Continua

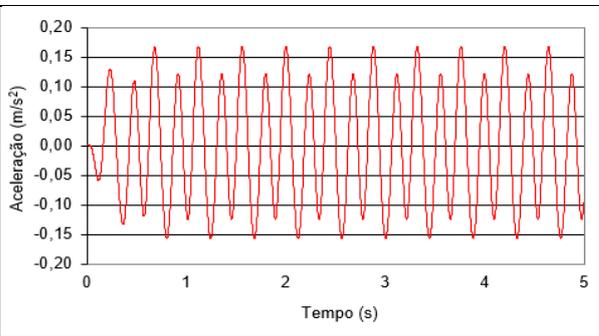
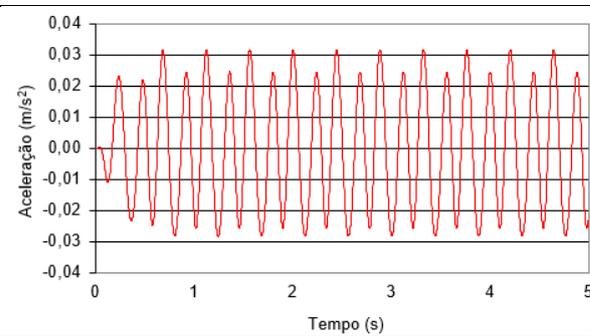
Continuação do Quadro 9 - Acelerações obtidas nos pontos

**Efeito gerado no ponto B – 5º piso da direita**

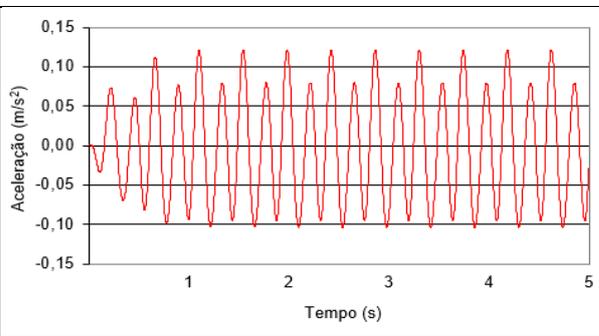
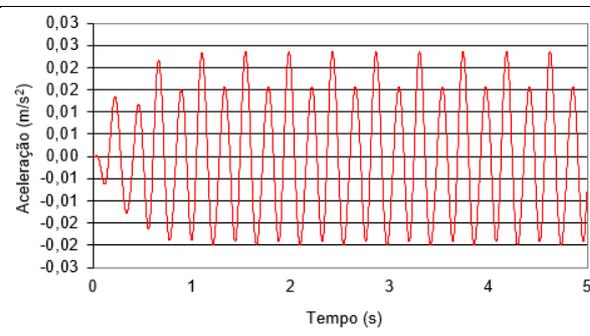


Distribuição espacial de pessoas: ponto G – 2º piso da esquerda.

**Efeito gerado no ponto A – 5º piso da esquerda**

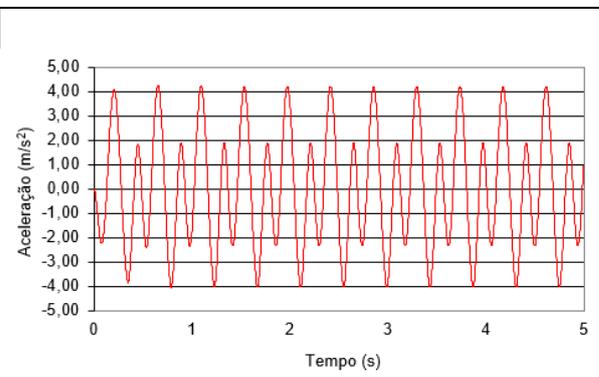
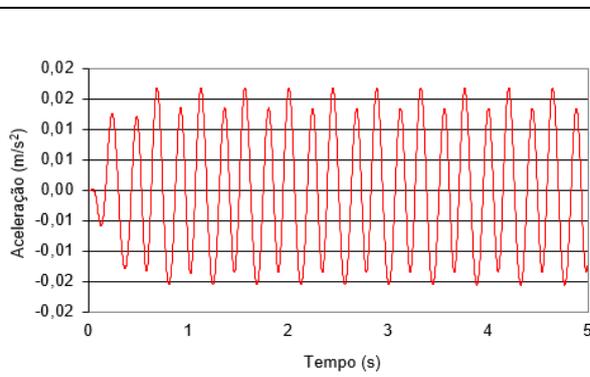


**Efeito gerado no ponto B – 5º piso da direita**

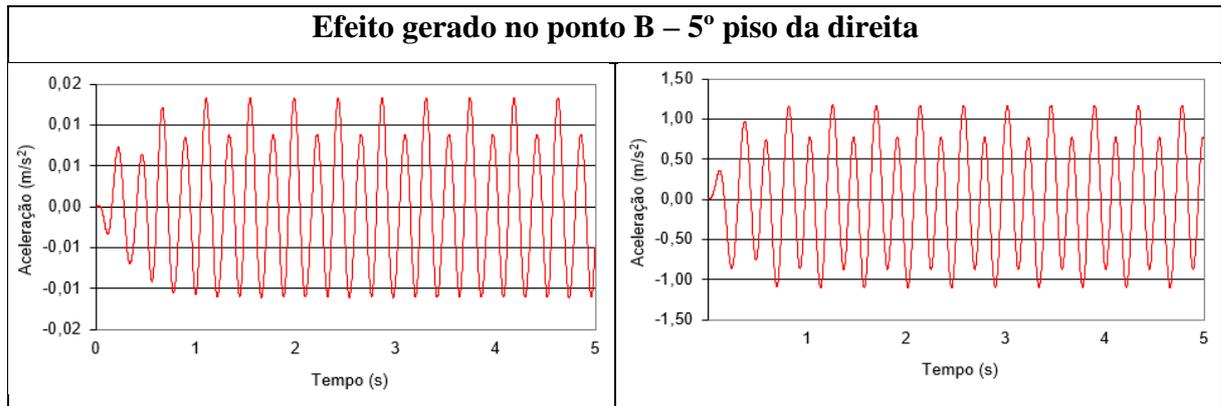


Distribuição espacial de pessoas: ponto I – 1º piso da esquerda.

**Efeito gerado no ponto A – 5º piso da esquerda**



Continua



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

No Quadro 9, nota-se que as respostas dinâmicas entram rapidamente em regime permanente. Nesse sentido, a avaliação através da amplitude em regime permanente é mais razoável, de modo que o guia prático do AISC (2003) a utiliza em seus cálculos de acelerações.

Notou-se o crescente aumento das respostas dinâmico à medida que se adicionava mais indivíduos sobre o piso misto praticando atividade dinâmica rítmica, ginástica aeróbica, ou seja, os valores mínimos foram obtidos nos casos de carregamentos referentes a doze pessoas e os valores máximos se encontram nos carregamentos referentes a noventa e quatro pessoas, conforme o modelo de carregamento I (MC-I) proposto por Faisca (2003).

### 3.12 Estudo do conforto humano

Os critérios de avaliação do nível de conforto humano, até o presente conhecimento dos autores, são divergentes em relação aos valores limites de aceitação para atividades humanas rítmicas (Smith et al. 2009). Vários pesquisadores (Bachmann et al. 1995 [46]; Murray et al. 2003; Ellis & Littler 2004; Smith et al. 2009; Setareh 2012) têm estabelecido limites de conforto em função dos métodos de avaliação das acelerações.

Neste trabalho, considerando estes aspectos, as acelerações de pico foram avaliadas com base nas acelerações de pico no regime permanente (steady-state) ap. O limite para as acelerações de pico (ap) é igual a 0,5 m/s<sup>2</sup> (5%g), associado a atividades aeróbicas (Murray et al., 2003).

O Quadro 10 a seguir, mostra os resultados das acelerações de pico, obtidas na fase permanente da resposta do modelo, referentes aos nós A, B, C, D, E, F, G, H, I e J respectivamente, para os diferentes carregamentos (12 e 90 pessoas) considerando-se a taxa de amortecimento adotada para a estrutura de 3%. Também é apresentado o valor recomendado pelo Guia AISC (2003) de 0,5 m/s<sup>2</sup>, para as áreas sujeitas aos carregamentos devido às atividades humanas rítmicas, os valores escritos em vermelho ultrapassam o limite de conforto humano proposto por Murray at al., (2003).

Quadro 10 – Acelerações de pico ( $a_p$ )

$\xi$ 3%	Acelerações de Pico ( $a_p$ : m/s <sup>2</sup> ) - 12 e 90 Pessoas										AISC
	Andar										
	1°		2°		3°		4°		5°		
	Número de pessoas										
	12	90	12	90	12	90	12	90	12	90	
A	0,02	4,23	0,03	0,17	0,06	0,29	0,02	0,14	1,06	4,23	0,50
B	0,01	1,17	0,02	0,12	0,04	0,22	0,04	0,19	0,26	1,17	0,50
C	0,01	0,13	0,04	0,18	0,02	0,11	1,01	3,94	0,02	0,13	0,50
D	0,01	0,18	0,03	0,14	0,03	0,14	0,26	1,16	0,04	0,18	0,50
E	0,02	0,28	0,01	0,05	1,00	3,87	0,02	0,10	0,06	0,28	0,50
F	0,02	0,22	0,02	0,11	0,27	1,18	0,03	0,14	0,04	0,22	0,50
G	0,02	0,16	0,99	3,81	0,01	0,05	0,04	0,18	0,03	0,16	0,50
H	0,02	0,12	0,27	1,21	0,02	0,11	0,03	0,14	0,02	0,12	0,50
I	0,99	0,09	0,02	0,11	0,02	0,10	0,01	0,08	0,02	0,09	0,50
J	0,28	0,07	0,02	0,11	0,02	0,08	0,01	0,05	0,01	0,07	0,50

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Para nos pontos sujeitos ao carregamento de 12 pessoas verificou-se, que os únicos valores de aceleração de pico ( $a_p$ ) que não atendem ao valor sugerido pelo Guia AISC, são aqueles submetidos diretamente a carga, ou seja, os pontos da periferia não sofrem uma influência que extrapole o limite recomendado.

No entanto, para nos pontos sujeitos ao carregamento de 90 pessoas verificou-se que além dos pontos submetidos as cargas, os pontos adjacentes sofrem forte influência apresentando um valor médio que extrapola em média de 7 a 8 vezes o limite sugerido pelo Guia AISC (2003).

Quadro 11 – Deslocamentos translacionais verticais

ξ 3 %	Deslocamentos (mm) – 12 e 90 Pessoas										ABNT NBR 8800:2008 (mm)
	Andar										
	1°		2°		3°		4°		5°		
	Número de pessoas										
	12	90	12	90	12	90	12	90	12	90	
A	0,02	0,004	0,04	0,23	0,08	0,42	0,02	0,15	1,05	4,72	5
B	0,01	2,68	0,02	0,13	0,04	0,21	0,05	0,27	0,06	2,68	5
C	0,01	0,14	0,04	0,25	0,01	0,10	0,90	0,003	0,02	0,14	5
D	0,01	0,27	0,02	0,11	0,03	0,20	0,66	2,87	0,05	0,27	5
E	0,02	0,42	0,01	0,07	0,87	3,84	0,01	0,11	0,08	0,42	5
F	0,01	0,21	0,03	0,18	0,68	2,97	0,03	0,20	0,04	0,21	5
G	0,05	0,22	0,85	0,003	0,01	0,07	0,04	0,25	0,04	0,22	5
H	0,03	0,12	0,70	3,09	0,03	0,18	0,02	0,00011	0,02	0,12	5
I	0,00085	0,00012	0,05	0,26	0,02	0,15	0,01	0,10	0,02	0,13	5
J	0,73	0,06	0,03	0,17	0,01	0,06	0,01	0,05	0,01	0,06	5

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Com relação aos deslocamentos translacionais verticais para o carregamento de 12 pessoas, observou-se que nenhum dos pisos ultrapassou o valor de 5 mm recomendado pela norma ABNT NBR 8800:2008.

Diante das respostas obtidas em termos dos deslocamentos translacionais verticais pela análise estática descritos no Quadro 8, pode-se concluir que o piso misto investigado apresentou deslocamento máximo de 4,72 mm, sendo assim, inferior ao valor recomendado de 5 mm anexo L da ABNT NBR 8800:2008, ao mesmo tempo que atende o estado limite de serviço (ELS) conforme o item Q.3.2.2 no valor de 28,6 mm.

Entretanto, esta análise (análise estática) não é adequada para a avaliação dinâmica de pisos, visto que o carregamento real atuante sobre o sistema estrutural apresenta natureza essencialmente dinâmica (atividades humanas rítmicas). Além disso, para ratificar tal consideração, ao longo do trabalho foram verificados, através da análise dinâmica, os níveis de vibrações excessivas no piso investigado.

Desse modo, pode -se concluir que relativo aos deslocamentos translacionais, a estrutura atende a norma ABNT NBR 8800:2003. No entanto, relativo as acelerações de pico ( $a_p$ ), observa-se que, em todos os casos analisados estes valores.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este trabalho apresentou como objetivo principal o estudo do comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) quando submetidos à ação de excitações dinâmicas rítmicas provocadas por seres humanos. Basicamente, o sistema estrutural investigado, dimensionado pelo software CypeCad, é composto por vigas e pilares simulados por elementos finitos que consideram os efeitos de flexão e de torção que suportam a laje de concreto do piso. Foi examinado um tipo de carregamento dinâmico, a saber: ginástica aeróbica. Resultados obtidos a partir de testes experimentais foram empregados para a modelagem das cargas dinâmicas referentes a 12 e 90 pessoas.

A análise numérica foi feita mediante o emprego de técnicas usuais de discretização, por meio do método dos elementos finitos, com base no emprego do programa ANSYS. Inicialmente, realiza-se análises para o estudo da resposta dinâmica do modelo representativo do sistema estrutural, considerando-se fixa a taxa de amortecimento da estrutura e concepção estrutural. Em uma segunda etapa realizou-se um estudo sobre o conforto humano destes pisos para os carregamentos dinâmicos rítmicos mencionados anteriormente.

Os resultados das análises obtidos ao longo de todo o projeto, de acordo com a metodologia de análise proposta, tendo como principal base de estudo parâmetros fornecidos pelas normas ABNT NBR 6118:2007 e ABNT NBR 8800:2008. As conclusões das análises serão apresentadas, nos itens abaixo:

##### **4.1 Análise estática**

Diante das respostas obtidas em termos dos deslocamentos translacionais verticais pela análise estática, pode-se concluir que os pisos em estudo apresentaram deslocamento máximo de 39,79 mm para deformações estruturais verticais, sendo assim, inferior ao valor limite de 40 mm recomendado pela ABNT NBR 6118:2007. Quando o piso foi avaliado quanto a vibrações sentidas, o piso apresentou deslocamento máximo de 4,72 mm, também (inferior) ao limite especificado pela ABNT NBR 8800:2008 de 5 mm.

Entretanto, a análise estática não é a mais adequada para a avaliação dinâmica de pisos, visto que o carregamento real atuante sobre o sistema estrutural apresenta natureza essencialmente dinâmica (atividades humanas rítmicas), e esta análise não considera diversos fatores característicos deste tipo de carregamento. Além disso, ao longo do trabalho pode ser verificado este fato onde, através da análise dinâmica, observou-se diversos casos de vibrações excessivas no piso investigado.

## **4.2 Freqüências e modos de vibração**

Constatou-se a fragilidade da estrutura a problemas relacionados a vibrações excessivas, pelo fato da frequência fundamental do piso (0,20 Hz) ter apresentado valor muito abaixo do mínimo recomendado pela ABNT NBR 6118:2007 (9,6Hz) e pelo guia prático do AISC (9,2Hz). Os valores das frequências naturais do piso apresentaram uma variação na faixa de 0,20 Hz a 3,88 Hz, de forma que os primeiros modos de frequências naturais não se encontram na mesma faixa de frequência do das atividades rítmicas que são cima de 2Hz, contudo a partir do oitavo harmônico das atividades aeróbicas, cuja frequência é de 2,07 Hz o piso pode estar suscetível ao fenômeno de ressonância, ocasionando assim vibrações excessivas e conseqüentemente o desconforto humano dos usuários da estrutura.

## **4.3 Análise do conforto humano**

A verificação do conforto humano dos usuários sobre os pisos quando submetido a atividades rítmicas (ginástica aeróbica) foi realizada pela simulação das cargas provenientes destas atividades, com base no emprego de modelos de carregamento propostos pelo Hanning e Faisca, sendo este carregamento aplicado conforme duas formações distintas para casos de 12 e 90 pessoas atuando sobre o sistema estrutural. Esta configuração visa a verificação e o entendimento de uma utilização com alívio de cargas para 12 pessoas e uma utilização extrema de máximo aproveitamento para 90 pessoas. Em seguida, foram obtidos e confrontados os autovalores e autovetores dos deslocamentos e das acelerações oriundas da aplicação destes modelos de carregamentos dinâmicos.

Conforme a análise das respostas dinâmicas, em termos dos deslocamentos e acelerações no domínio do tempo, percebe-se que os modelos de carregamento apresentaram acelerações com valores muito superiores aos limites de conforto propostos pelo AISC. Além disso, observou-se que para o carregamento de aproveitamento máximo de 90 pessoas, a

estrutura apresentou-se como imprópria para a atividade aeróbica, com o conforto humano avaliado como no mínimo perturbador os casos dos planos de laje de carregamentos de 90 pessoas no primeiro piso. Porém, destaca-se que em alguns planos imediatamente a baixo ou acima dos carregamentos oriundos a disposição de projeto adotada, mesmo com o notável aumento do número de participantes na atividade aeróbica, o piso apresenta valores de aceleração aceitáveis para o conforto humano dos usuários da estrutura.

Observando-se a resposta dinâmica do piso de concreto, em termos da aceleração no domínio da frequência, o sistema estrutural apresentou um quadro de ressonância a partir da aproximação do 8º harmônico da excitação da atividade rítmica (ginástica aeróbica) com a frequência natural associada ao modo de vibração fundamental do piso em estudo (2,07 Hz).

Em edificações submetidas as ações dinâmicas não determinísticas do vento, onde as frequências são inferiores a 1 Hz, como as frequências fundamentais encontradas, podem causar elevado desconforto humano para os usuários, principalmente para os usuários dos pavimentos mais elevados.

Para excitações dinâmicas verticais associadas para atividades rítmicas de caminhar, pular, dançar e aeróbica, as frequências de ressonância são mais altas, acima de 2 Hz.

A estrutura possui transmissão de vibração pelas colunas com a necessidade de se avaliar a rigidez estrutural do edifício nas direções do plano vertical, analisando como se processa essa interação dinâmica entre a carga e a resposta.

Cargas muito elevadas mesmo fora da região de ressonância podem gerar problemas de vibração excessiva, pois as forças inerciais para equilibrar a ação dinâmica da estrutura são muito baixas, para as atividades ao qual a mesma é solicitada. Devido à grande flexibilidade da estrutura e sua baixa inércia a edificação está sujeita a picos de aceleração como os apresentados, mesmo estando apta a sua utilização para carregamentos estáticos de projeto conforme dimensionados pela ABNT NBR 8800:2008.

Uma solução seria a alteração da concepção estrutural adotada inicialmente como: a incorporação de contraventamentos nos planos laterais ou aumento da massa modal que contribui para o enrijecimento da estrutura.

O aspecto mais importante deste projeto de pesquisa é que evidencia que não é só ressonância que pode causar problemas de vibração excessiva nas estruturas, a análise de quais modos de vibração estão associadas as lajes e colunas podem interferir diretamente na qualidade do projeto e no conforto dos seus usuários.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SOMMER, R.M.R.. *Análise de Vibrações em pisos mistos aço/concreto*. Orientador: Prof. Dr. Fernando Amorim de Paula. 2002. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 2002.
- BEARDS, C.F. *Structural Vibration: Analysis and Damping*. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, INC., 1996. 276 p. ISBN 0340645806.
- LANGER, N.A. Dos S. *Estudo do Conforto Humano em Pisos Mistos (Aço-Concreto) Submetidos a Ações Humanas Rítmicas*. Orientador: Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva. 2009. 115 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - PGECIV da Universidade do estado do Rio de Janeiro - UERJ, Rio de Janeiro, 2009.
- COSTA, M.H. De O. *Avaliação do Conforto Humano em Edificações Mistas (Aço - Concreto) de Andares Múltiplos Submetidas a Carregamentos Dinâmicos Rítmicos*. Orientador: Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva. 2010. 117 p. Projeto Final (Faculdade de Engenharia Civil) - Universidade do estado do Rio de Janeiro - UERJ, Rio de Janeiro, 2010.
- MELLO, A.V. De A. *Vibrações em Pisos de Edificações Induzidas por Atividades Humanas*. Orientador: Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva. 2005. 189 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - PGECIV da Universidade do estado do Rio de Janeiro - UERJ, RJ, 2005.
- SILVA, N.M.T.F. *Análise Estática e Dinâmica de Lajes Nervuradas de Concreto Armado*. Orientador: Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva. 2008. 181 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do estado do Rio de Janeiro - UERJ, Rio de Janeiro, 2008.
- MURRAY, T.M.; ALLEN, D.E.; UNGAR, E.E. *Steel Design Guide Series 11: Floor Vibrations Due to Human Activity*. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction, 1997. 69 p.
- MURRAY, T.M. *Acceptability Criterion for Occupant-Induced floor Vibrations*. *Engineering Journal: American Institute of Steel Construction, AISC*, v. 18, n°. 2, p. 62-70, 1981.
- CAMPISTA, Fernanda F. *Análise de Vibrações e Estudo de Conforto Humano Sobre Pisos Mistos (Aço - Concreto) Submetidos a Ações Humanas Rítmicas*. Orientador: Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva. 2015. 117 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - PGECIV da Universidade do estado do Rio de Janeiro - UERJ, Rio de Janeiro, 2015.
- FAISCA, R.G. *Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas*. Orientador: Prof. Dr. Carlos Magluta Ney Roitman. 2003. 230 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. 237 p. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto: Procedimento**. 221 p. Rio de Janeiro, 2007.

LOOSE, J.K. **Análise Dinâmica de Pisos Mistos em Aço-Concreto Submetidos a Atividades Humanas Rítmicas**. Orientador: Prof. Dr. Walnório Graça Ferreira. 2007. 110 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

ALLEN, D.E.; RAINER, J.H. **Vibration Criteria for Long-Span Floors**. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Canadá, v. 3, n. 2, p. 165-173, 1975.

ALLEN, D.E.; RAINER, J.H.; PERNICA, G. **Vibration Criteria for Assembly Occupancies**. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 12, n° 3, p. 617-623, Abr 1985.

International Standard Organization. **ISO 2631/1: Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration – Part 1: General Requirements**, Switzerland, 1985.

BACHMANN, H. **Case studies of structures with man-induced vibrations**. *Journal of Structural Engineering*, v. 118, n° 3, p. 631-647, mar 1992.

MURRAY, T.M.; ALLEN, D.E.; UNGAR, E.E. **Steel Design Guide Series 11: Floor Vibrations due to Human Activity**. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction, 1997.

AISC/CISC **Steel Design Guide Series No. 11: Floor Vibrations Due to Human Activity**. - American Institute of Steel Construction, Chicago, III, 1997.

MURRAY, T.M., **Acceptability Criterion for Occupant-Induced Floor Vibrations**, *Engineering Journal*, AISC, Vol. 18, No. 2, 62-70, 1981.

MELLO, A.V.A.; SILVA, J.G.S. da; VELLASCO, P.C.G. da S.; ANDRADE, S.A.L. de; LIMA, L.R.O. de. **Dynamic analysis of composite systems made of concrete slabs and steel beams**. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 64, p.1142–1151, 2007.

DE SILVA, S.; and THAMBIRATNAM, D. P. **Dynamic characteristics of steel–deck composite floors under human-induced loads**. *Journal of Computers and Structures*, v. 87, iss. 17-18, p. 1067–1076, sep. 2009.

.ALLEN, D.E. **Floor vibration from human activities**. *Concrete International: Design and Construction*, v.12, n.6, p. 66-73, 1990.

ALVES, N. K. C., **Cargas Dinâmicas devido a Pessoas em Movimento**, 1997. 97p. Dissertação de Mestrado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL, 1997.

**TABELA DE BITOLAS**. Disponível: <<http://www.guerdau.com.br/perfisguerdauacominas>>. Acesso em: 10 Jul. 2019.

CYPECAD. **Software para cálculo estrutural e projeto estrutural - Versão 19**.

BACHMANN, H. & AMMANN, W. **Vibrations in structures induced by man and machines**,

AVELINO, Alves Filho. **Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE: Análise Dinâmica**. Ed Érica, 304 p. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120 - Cargas para o cálculo de estruturas de edificações** Rio de Janeiro, 1980. 5 p.