

## **ESTUDO DE VIBRAÇÕES COM MÚLTIPLAS FONTES DE EXCITAÇÕES EM ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO CONSIDERANDO O CONFORTO HUMANO.**

**Ana Luiza da Silva Santana<sup>1</sup>, José Francisco Anunciação Pinto<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Graduanda em Engenharia Civil, Centro Universitário UNIFACIG, analuh2014@outlook.com.br

<sup>2</sup> Mestre em Engenharia da Construção, Universidade Federal de Viçosa (UFV),  
jf.anunciacao@hotmail.com

**Resumo:** A carga dinâmica é a uma das causas de diversos problemas de vibração em estruturas, sendo caracterizada por três propriedades fundamentais: os modos naturais de vibração, os fatores de amortecimento e as frequências naturais da estrutura. A vibração que ocorre nas estruturas não deve ser perceptível no caminhar humano durante sua utilização e é crescente o número de estruturas que apresentem problemas no que se refere ao conforto humano devido aos índices excessivos de vibração na estrutura. Uma estrutura possui vários modos de vibração e através do programa SAP2000 é possível analisar em uma estrutura, seus possíveis modos de vibração e suas frequências naturais. A análise numérica fornece os valores da frequência fundamental que possibilitam a análise precisa das vibrações na estrutura. O objetivo desse trabalho é realizar uma análise numérica de vibrações de uma estrutura mista de aço e concreto utilizando o software para análise estrutural SAP2000. Os resultados obtidos através da elaboração do modelo numérico computacional, por meio do Método dos Elementos Finitos foram avaliados de acordo com os critérios e recomendações das normas e guias de projetos nacionais considerando o conforto humano. Os valores obtidos pelos diferentes métodos não apresentaram resultado satisfatório considerando critérios de conforto humano pois não atendem a maioria das normas vigentes.

**Palavras-chave:** Vibrações; Engenharia; Estruturas mistas de aço e concreto; *Software*.

**Área do Conhecimento:** Engenharias

### **1 INTRODUÇÃO**

Devido ao avanço das pesquisas em novas tecnologias, materiais, softwares cada vez mais eficientes e rápidos, acompanhados de novas tendências arquitetônicas, têm tornado as estruturas cada vez mais leves e esbeltas e, portanto, mais flexíveis, assim tornando o seu comportamento dinâmico mais crítico na ótica do conforto humano dos usuários. E em função disso, diminuindo seu amortecimento estrutural e modificação da natureza e intensidade das cargas contribuem para um cenário onde este tipo de problema se torne mais considerável no projeto destas estruturas.

De um modo geral, os projetos de passarelas são elaborados considerando, somente, a ação de cargas estáticas, não levando em consideração as ações dinâmicas oriundas do movimento de pessoas sobre a mesma. Dessa forma, cada vez mais tem-se observado um número crescente de estruturas que apresentam comportamento dinâmico insatisfatório e, portanto, problemas associados ao conforto humano dos usuários.

Casos de vibrações excessivas podem causar desde leves desconforto aos seus usuários até colapsos da estrutural. Como exemplo destas patologias, pode-se citar a passarela Millennium Footbridge (NEWLAND, 2003), conhecida como a Passarela do Milênio, que cruza o rio Tamisa, em Londres, Inglaterra, no dia de sua inauguração em 10 de Junho de 2000 apresentou oscilações laterais com amplitudes além daquelas previstas em projeto, devido à interação do caminhar de pessoas se movimentando sobre a mesma. As amplitudes foram da ordem de 75 mm com frequências na faixa de 0,8 a 1,0 Hz, obrigando as autoridades a fecharem a passarela três dias após sua inauguração para que medidas corretivas fossem adotadas, conforme citado por Newland (NEWLAND, 2003). A Figura 1 ilustra essa estrutura.

Figura 1 - Millennium Footbridge localizada em Londres sobre o Rio Tâmesa



Fonte: (NEWLAND, 2003).

Em outros casos, como aconteceu na Carolina do Norte/EUA, o efeito das vibrações levou a estrutura de uma passarela ao colapso durante a saída de uma multidão em um evento esportivo, deixando mais de 100 pessoas feridas (BBC NEWS, 2000). A Figura 2 ilustra o desabamento da passarela após o colapso estrutural.

Figura 2 - Desabamento de uma passarela na Carolina do Norte/EUA



Fonte: (BBC NEWS, 2000)

Segundo Pinto (2015), essas novas características têm levado estes sistemas estruturais a frequências naturais cada vez mais próximas da faixa de frequência de excitações associada às atividades humanas. Assim, os sistemas estruturais de pisos e passarelas vem se tornado mais vulneráveis aos efeitos de vibrações induzidas por pequenos impactos, como é o caso do caminhar de pessoas sobre o piso, e por excitações mais intensas, como é o caso das atividades rítmicas. Essas vibrações resultam em desconforto para os usuários da estrutura e, em casos menos comuns, podem até mesmo comprometer a estrutura.

“Para acompanhar esta evolução, é necessário que os sistemas estruturais de pisos sejam concebidos levando em consideração esses efeitos” (PINTO, 2015). De modo a evitar que a estrutura cause desconforto ao usuário durante sua utilização, assim é de extrema importância que se faça uma análise das vibrações geradas em estruturas mistas de aço e concreto durante a etapa de projeto para que, havendo problemas relacionados ao conforto humano, ela possa ser redimensionada de forma a solucionar o mesmo.

Nesse contexto os estudos dinâmicos de estruturas mistas de aço e concreto são relevantes para a avaliação do comportamento da estrutura, dessa forma a análise de vibrações decorrentes a excitações humanas se torna relevante para avaliação dos seus efeitos com relação ao seu conforto humano e seus estados limites de serviço. Levando em conta que os estudos nos quais são levadas em consideração múltiplas fontes de excitação, em passarelas mistas de aço e concreto, são escassas na bibliografia brasileira, este estudo tem grande importância na investigação de vibrações neste tipo de sistema estrutural.

## **2 METODOLOGIA**

O objetivo geral deste trabalho é realizar a análise numérica de vibrações com múltiplas fontes de excitações em sistemas de piso misto de aço e concreto, avaliar o desempenho considerando critérios de conforto humano e comparar com as principais normas e guias de projetos nacionais e internacionais.

### **2.1 Referencial Teórico**

De acordo com Pinto (2015), a maioria dos problemas de vibrações em sistemas de piso geralmente envolvem ações dinâmicas relacionadas com as forças repetidas causadas por máquinas, equipamentos ou por atividades humanas, tais como: dançar, saltar, correr, aeróbica (ginástica) ou caminhar.

Ainda segundo o autor, ao longo do tempo foram desenvolvidas algumas metodologias com o objetivo de avaliar o conforto humano frente às vibrações produzidas por determinadas atividades. Geralmente, essas metodologias requerem o cálculo da frequência natural do sistema de piso e da máxima amplitude da aceleração, velocidade ou deslocamento para uma excitação de referência. A avaliação da condição de serviço é feita em função de uma escala de conforto humano estabelecida em cada metodologia de cálculo.

Embora os critérios de projeto para avaliação dos níveis de vibração induzida por atividades rítmicas humanas sejam conhecidos há muitos anos, só recentemente foi possível aplicá-lo para o projeto de estruturas de piso. A principal razão foi relacionada à complexidade considerável do problema, em que a resposta dinâmica do sistema estrutural, geralmente, envolve um elevado número de modos de vibração. Além disso, nos problemas associados a pessoas andando as forças mudam sua localização, tornando a análise ainda mais difícil.

Dessa forma, estudos mais sofisticados só se tornaram economicamente viáveis com os avanços tecnológicos da computação, do desenvolvimento de *software* e processadores suficientemente eficientes e rápidos, que proporcionaram um menor esforço computacional e agilidade nas análises dinâmicas.

Ao longo dos últimos anos, uma série de estudos têm indicado que o problema pode ser simplificado para ser devidamente aplicado na prática de projeto. Muitas pesquisas estão sendo realizadas na área da percepção humana de vibração de corpo inteiro e resposta humana à vibração. De acordo com Holmlunf e Lunntom (1998), as respostas humanas às vibrações podem ser divididas em cinco categorias: percepção, desconforto, interferência nas atividades, mal-estar e ocorrência de problemas de saúde devido às vibrações. No caso de vibrações passarelas em estrutura mista de aço e concreto para fins residenciais ou comerciais, a resposta principal é o desconforto ou aborrecimento.

### **2.2 Estudos realizados por outros autores**

Em 1981, Murray (1981), recomendou um critério de projeto baseado nos dados de ensaios de 91 pisos medidos. Mais recentemente, um critério para passarelas foi introduzido no *BSI British Standard*, BS 5400 (2006), e no *Ontario Highway Bridge Design Code*, ONT83 (1983), baseados na resposta da ressonância a uma força senoidal.

Por meio de investigações experimentais, Batista e Varela (2002) constataram que os problemas envolvendo excitações dinâmicas produzidas por atividades humanas são mais agudos e frequentes em painéis contínuos que apresentam multimodos de vibração, tais como os painéis contínuos de lajes mistas, lajes em grelha, lajes nervuradas e lajes pré-moldadas em concreto armado.

Varela (2004), baseado em relatórios técnicos que permitiram registrar a reação total do piso gerada durante uma caminhada sobre plataformas rígidas, propôs uma equação matemática que pudesse representar a magnitude dessa reação. A metodologia desenvolvida por Varela (2004) permitiu progredir nas estratégias de modelagem da carga humana gerada durante a caminhada. A sua representação matemática era acompanhada de um fator importante e geralmente ignorado nas estratégias de modelagem de cargas humanas. Nesse modelo matemático, considera-se o pico transiente representativo do impacto do calcanhar sobre o piso, o qual gera respostas bem significativas em termos de análise dinâmica.

Silva (2010) apresentou os resultados de uma análise experimental e numérica de uma passarela no qual foi apresentado um modelo numérico para análise da estrutura desenvolvido no programa de análise estrutural SAP2000. De modo a poder melhorar e confirmar o modelo, foram feitas as monitorações experimentais para avaliação do comportamento dinâmico da estrutura. Desta forma, inferiu-se as características dinâmicas naturais da ponte. Através da confrontação dos valores experimentais com os numéricos, foi possível obter um modelo que se ajusta adequadamente ao real funcionamento da estrutura. Finalmente, foi feita uma análise dos resultados, comparando os níveis de vibração com os limites regulamentares existentes, nas normas em vigor disponíveis.

Mendes (2014) investigou o comportamento dinâmico de três passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) localizadas no Rio de Janeiro, submetidas ao caminhar humano. Deste modo, foram desenvolvidos modelos numérico-computacionais, nos quais foram adotadas as técnicas tradicionais de refinamento presentes em simulações do Método de Elementos Finitos, com base no uso do software ANSYS. Os valores de aceleração de pico e aceleração (*r.m.s.*) encontrados na investigação indicaram que as passarelas analisadas apresentaram problemas relacionados com o conforto humano. A fim de reduzir as vibrações excessivas nas passarelas, uma investigação foi realizada com base em alternativas de controle estrutural, a partir do emprego de sistemas de atenuadores dinâmicos sintonizados (A.D.S.).

## **2.3 Critérios de projeto**

Várias normas, critérios de projeto e guias práticos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos, com a finalidade de servirem de base a projetistas e construtores, a fim de minimizar os efeitos nocivos das vibrações.

### **2.3.1 EN 1991-1 (2003)**

Desenvolvido pelos pesquisadores A. L. Smith, S. J. Hicks e P. J. Devine e publicado pela *The Steel Construction Institute* – SCI no ano de 2009, este guia tem como objetivo atualizar as recomendações de projetos elaboradas no ano de 1989 da ISO 2631-2 (1989) para limites de aceitação de vibrações em sistemas de pisos considerando o conforto humano.

No primeiro guia publicado pela SCI de 1989, eram relacionados critérios e orientações de limite de vibração para sistemas de pisos considerados normais, como edifícios residências e escritórios, sendo este amplamente utilizado nos últimos tempos. Este novo guia de recomendações, foi desenvolvido com intuito de permitir aos projetistas determinar a resposta de vibração de pisos sensíveis com maior precisão. Permitindo que a resposta seja comparada com as normas BS 6472 (1992) e ISO 10137 (2007) para estruturas gerais, e com o padrão de desempenho NHS específico para hospitais, *Health Technical Memorandum 08 01 The Stationary Office* (2008). Incluindo diretrizes de projetos para todos os tipos de sistemas de pisos, como pisos submetidos a atividades rítmicas, pisos de hospitais, sistemas de pisos leves, estacionamentos e os demais sistemas de pisos que já eram abordados na primeira publicação.

No escopo do trabalho são apresentadas técnicas para modelagem de estruturas em elementos finitos, uma vez que as condições de contornos utilizadas para a análise estática são diferentes quando comparadas com as de análise dinâmica. Também foram inseridos 4 apêndices que tratam respectivamente sobre a comparação de metodologias de análise dinâmica, estratégias de controle e correção de vibrações excessivas, ensaios dinâmicos em sistemas de pisos e exemplos de trabalhos.

De forma análoga a ISO 10137 (2007) e a *AISC/CISC Design Guide 11* (Murray *et. al* 2003), o critério de aceitação da *SCI Publication P354* é baseado em fatores de multiplicação para as curvas bases. Estes fatores dependem da utilização do sistema de piso, horário de ocorrência e tipo de vibração. As curvas base são as mesmas apresentadas na ISO 10137 (2007) e BS 6472 (1992), apresentadas anteriormente.

Como explicado anteriormente, devido a complexibilidade de utilização de vibrações intermitentes, na prática são adotados os valores de multiplicação para vibrações contínuas. Estes valores são multiplicados pela curva base e comparados com os limites de resposta calculados. O valor da resposta calculado é definido com a determinação da aceleração (*r.m.s.*). Abaixo são apresentadas as tabelas de fatores de multiplicação para sistemas de pisos comuns e sistemas de pisos para hospitais, respectivamente.

Tabela 0-1 – Valores dos fatores de multiplicação para excitação de uma única pessoa

| Local   | Fator de multiplicação para vibrações contínuas |
|---|---|
| Escritórios   | 8   |
| Shopping Centers                                      | 4   |
| Pisos de Escritórios                                  | 4   |
| Escadas – uso diário (edifícios de escritórios)       | 32  |
| Escadas – uso intenso (edifícios públicos e estádios) | 24  |

Fonte: Smith *et al.* (2009).

Tabela 0-2 – Valores dos fatores de multiplicação para hospitais de acordo com a HTM 08-01

| Tipos de sala  | Fator de multiplicação para vibrações contínuas |
|--|---|
| Salas de cirurgia, laboratórios de precisão, cabine de testes áudio métricos | 1   |
| Enfermarias  | 2   |
| Laboratórios gerais, áreas de tratamento                                     | 4   |
| Escritórios, salas de consulta   | 8   |

Fonte: Smith *et al.* (2009).

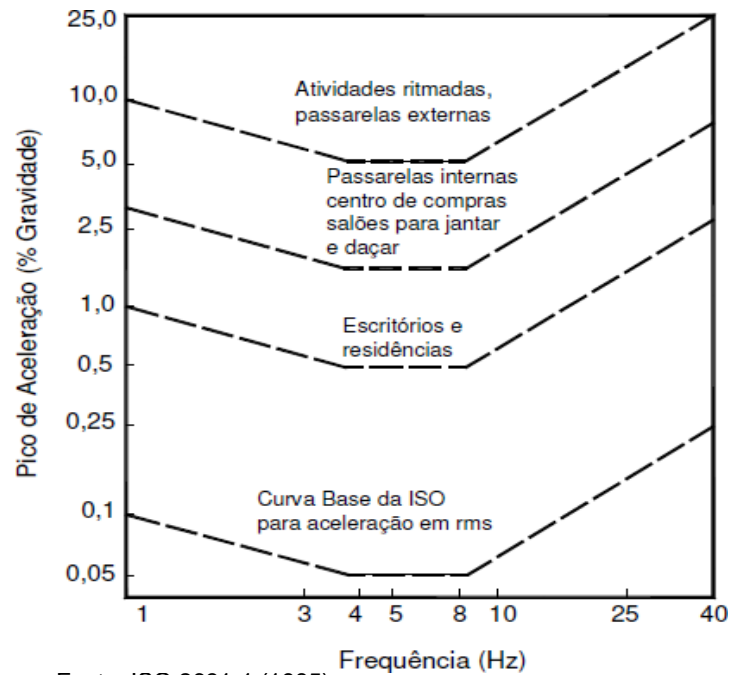
### 2.3.2 AISC/CSIC Design Guide 11 (2003)

Essa obra integra uma série de livros denominada *Steel Design Guide Series*, desenvolvida no *American Institute of Steel Construction* (AISC) pelos pesquisadores Murray, Allen e Ungar (2003).

Esse guia de projeto permite avaliar a resposta dinâmica estrutural, em termos de aceleração de pico, segundo as características dos elementos estruturais e carregamentos envolvidos no projeto. Os valores das acelerações de pico são então comparados com os valores limites definidos na curva base das ISO's ISO 2631-1 (1985) e ISO 2631-2 (1989), que representam o limite no qual as acelerações verticais passam a ser perceptíveis, sendo nesse critério ajustadas de acordo com a intenção da ocupação. Os valores limites podem ser vistos na Figura 3, podendo apresentar variações numa faixa de 0,8 a 1,5 vezes dos valores recomendados de acordo com a duração da vibração e da frequência desta.



Figura 3 - Pico de aceleração máximo recomendado para o conforto humano



Fonte: ISO 2631-1 (1985).

### 2.3.3 EN 1991-1 (2003)

A norma europeia EN 1991-1:2003: recomenda que os critérios de projetos estruturais de conforto dos usuários deverão ser definidos em termos de aceleração máxima aceitável em qualquer parte do tabuleiro. Também recomenda valores máximos de aceleração em outras partes como aparece Tabela 3, a seguir:

Tabela 3 - Aceleração máxima aceitável

| Direção                              | Aceleração Máxima (m/s <sup>2</sup> ) |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Direção vertical                     | 0,7                                   |
| Direção transversal, caminhar normal | 0,2                                   |
| Direção transversal, caminhar rápido | 0,4                                   |

Fonte: EN 1991-1:2003

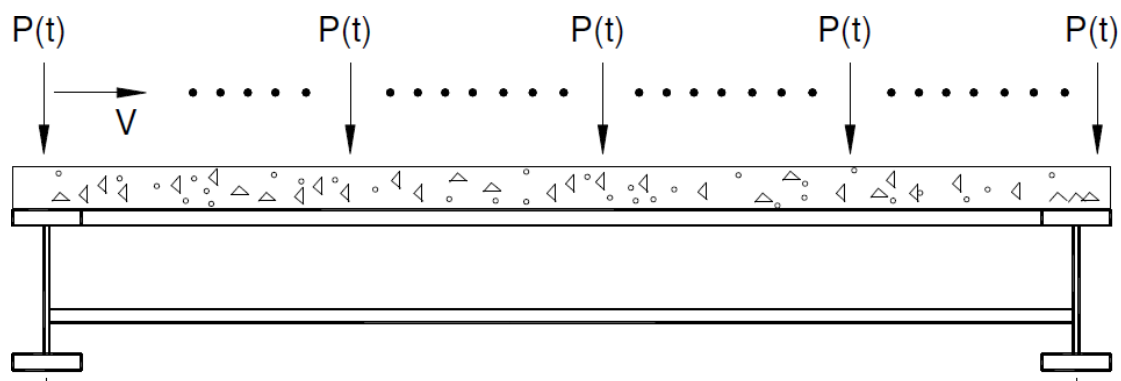
O EN 1990:2002 (2002) define modelos de cargas para projetos de pontes rodoviárias, passarelas e pontes ferroviárias. No item **Erro! Fonte de referência não encontrada.** trata do modelo de carregamento dinâmico do caminhar humano. Esta condição depende das características dinâmicas da estrutura, a frequência natural do tabuleiro se torna relevante e deverá ser analisada com um modelo estrutural apropriado. Favorecem esta condição as forças exercidas por pedestres induzindo forças com a mesma frequência que uma das frequências naturais da passarela, podendo resultar em ressonância. Este fato necessita ser levado em consideração na verificação do estado limite de utilização em relação à vibração. Finalmente, a EN 1990:2002 recomenda que deve ser implementado um adequado modelo dinâmico da carga gerada pelo caminhar de pessoas, bem como devem ser considerados os critérios de conforto. O EN 1991-2:2003 deixa a forma de modelar a carga dos pedestres por conta do projetista.

### 2.3.4 Modelo do caminhar

O modelo de carregamento dinâmico proposto por Varela (2004), a posição do carregamento varia com o tempo, por isso é necessária uma representação mais realista do carregamento gerado em uma caminhada, através de uma descrição espacial e temporal.

O modelo de carregamento proposto por Varela, pode ser representado na Figura 4, em que a carga é aplicada constantemente na estrutura a uma certa velocidade.

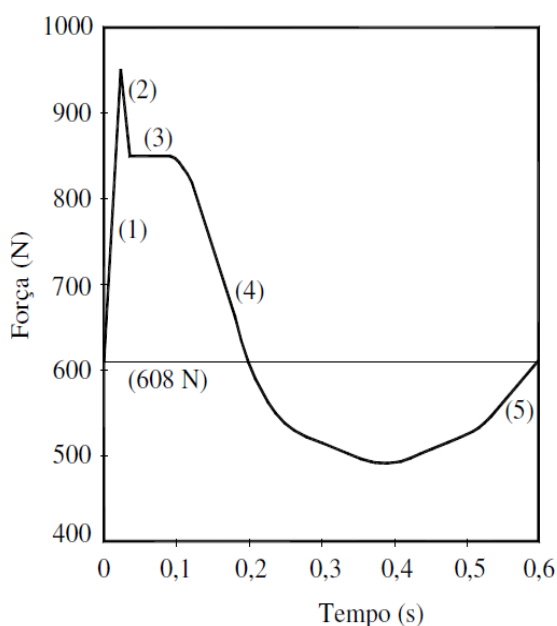
Figura 4 - Representação da carga durante a caminhada



Fonte: (MELLO, 2009).

A equação matemática proposta por Varela (2004), representa a reação total do piso gerada durante uma caminhada. A função de carregamento dinâmico de Varela é representada pela série de Fourier de três termos, como demonstra a Figura 4, e é acompanhada de um fator importante, que muitas vezes é ignorado, o pico transiente representativo do impacto do calcanhar sobre o piso. A aproximação matemática que Varela (2004) propôs, é definida por uma equação determinada segundo cinco trechos, que podem ser vistos na Figura 5, e nas equações 3.4.1 a 3.4.5.

Figura 5 - Função de carregamento proposta por Varela (2004).



Fonte: (VARELA, 2004)

Para o trecho "1", tem-se:

$$F(t) = \left( \frac{f_{mi} F_m - P}{0,04 T_p} \right) t + P \quad \text{se } 0 \leq t < 0,04 T_p \quad (3.4.1)$$

Para o trecho "2", tem-se:

$$F(t) = f_{mi} F_m \left[ \frac{C_1 (t - 0,04 T_p)}{0,02 T_p} \right] + 1 \quad \text{se } 0,04 \leq t < 0,06 T_p \quad (3.4.2)$$

Para o trecho “3”, tem-se:

$$F(t) = F_m \quad \text{se } 0,006 \leq t < 0,15 T_p \quad (3.4.3)$$

Para o trecho “4”, tem-se:

$$F(t) = P \left[ 1 + \sum_i^n \alpha_i \sin(2 \pi i f_p (t + 0,1 T_p) + \phi_i) \right] \quad \text{se } 0,15 T_p \leq t < 0,9 T_p \quad (3.4.4)$$

Para o trecho “5”, tem-se:

$$F(t) = 10(P + C_2) \left( \frac{t}{T_p} + 1 \right) + P \quad \text{se } 0,9 T_p \leq t < 1,00 T_p \quad (3.4.5)$$

onde:

$$F_m = P \left( 1 + \sum_{i=1}^{nh} \alpha_i \right) \quad (3.4.6)$$

$$C_1 = \left( \frac{1}{f_{mi}} - 1 \right) \quad (3.4.7)$$

$$C_2 = \begin{cases} P(1 - \alpha_2) & \text{se } nh = 3 \\ P(1 - \alpha_2 + \alpha_4) & \text{se } nh = 4 \end{cases} \quad (3.4.8)$$

onde:

- $\alpha_i$  coeficientes dinâmicos da série de Fourier;
- $F_m$  valor máximo da série de Fourier, dado pela Expressão (3.4.6);
- $f_{mi}$  fator de majoração do impacto do calcanhar,  $f_{mi} = 1,12$  (Varela (2004));
- $T_p$  período do passo;
- $nh$  número de harmônicos;
- $C_1$  coeficiente dado pela Expressão (3.4.7);
- $C_2$  coeficiente dado pela Expressão (3.4.8);
- $nh$  número de harmônicos.

As expressões 3.4.1 a 3.4.5, são utilizadas para obtenção da força dinâmica devido as caminhar humano sobre os pisos. Foi adotado como fator de amplificação do impacto do calcanhar humano um valor de ( $f = 1,12$ ). Este valor para cada pessoa.

## 2.4 Tipo da pesquisa

A pesquisa em questão é uma análise numérica, uma vez que os resultados foram obtidos a partir de modelos computacionais criados em um software de análises numéricas e seus resultados comparados com normas e guias de projetos nacionais e internacionais. Assim sendo classificada como qualitativa e quantitativa, considerando que os dados obtidos foram validados, verificados e comparados com outros modelos numéricos consolidados.

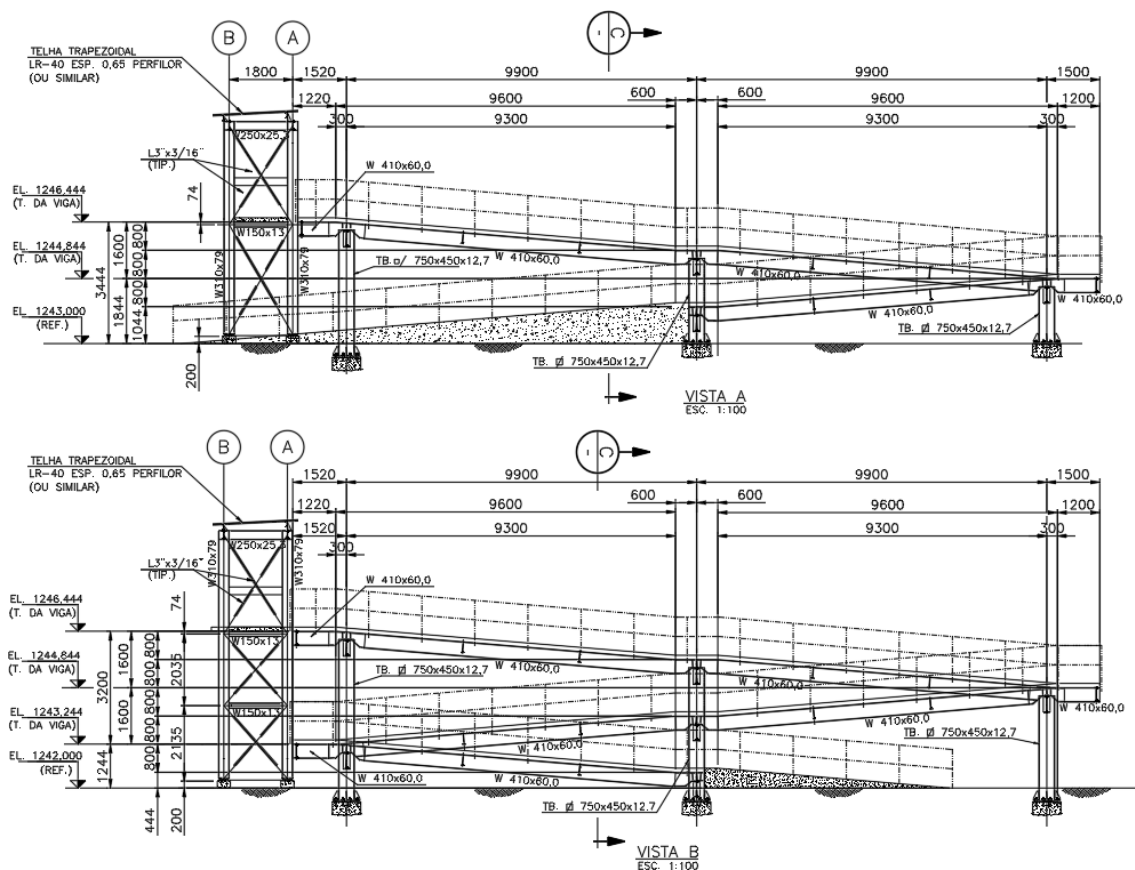
## 2.5 Descrição da estrutura estudada

A estrutura estuda neste trabalho se refere a uma passarela de pedestres rodoviária, no qual o modelo numérico foi desenvolvido com base no projeto passarela DE.4-80.7G-H6.001-0 EST. 2996, Distrito Federal, DF, Brasil. A passarela é composta por uma rampa de acesso e uma passarela que tem a função de vencer o vão total da Rodovia, conforme apresentado na Figura 1

Figura 6 e Figura 7

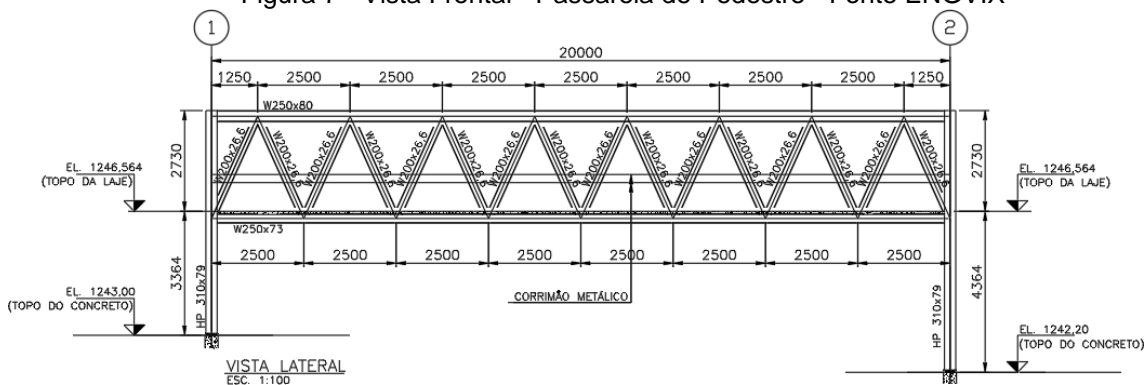


Figura 6 - Vistas laterais - Rampas de Acesso



Fonte: Fonte ENGVIX

Figura 7 - Vista Frontal - Passarela de Pedestre - Fonte ENGVIX



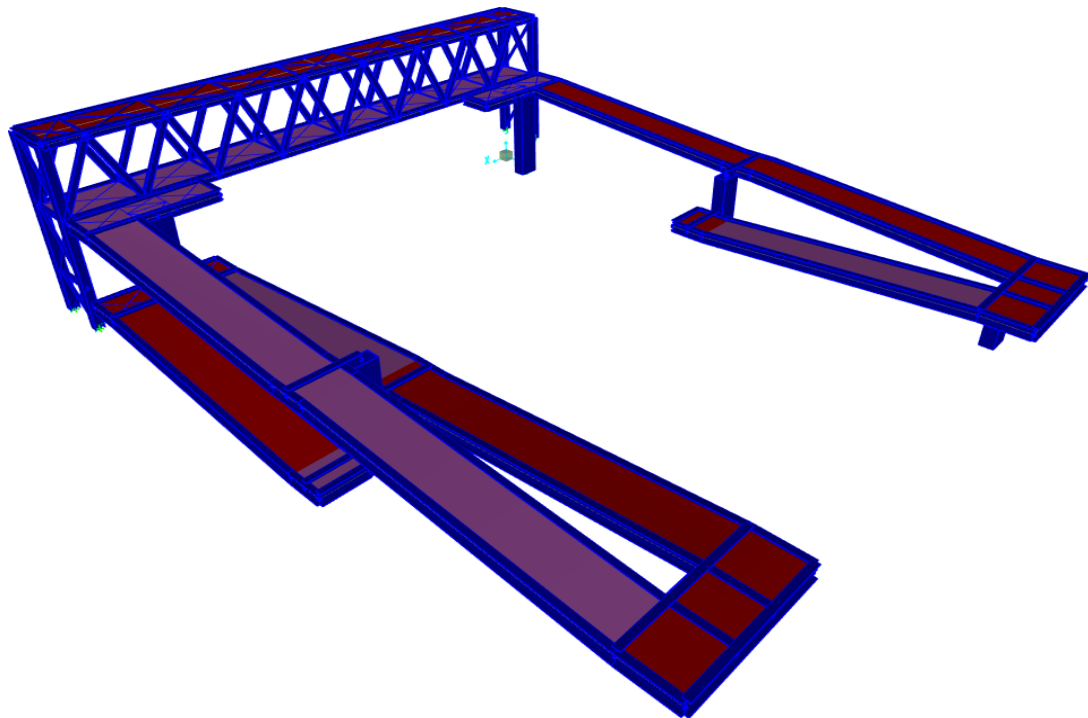
Fonte: Fonte ENGVIX

## 2.6 Modelo numérico

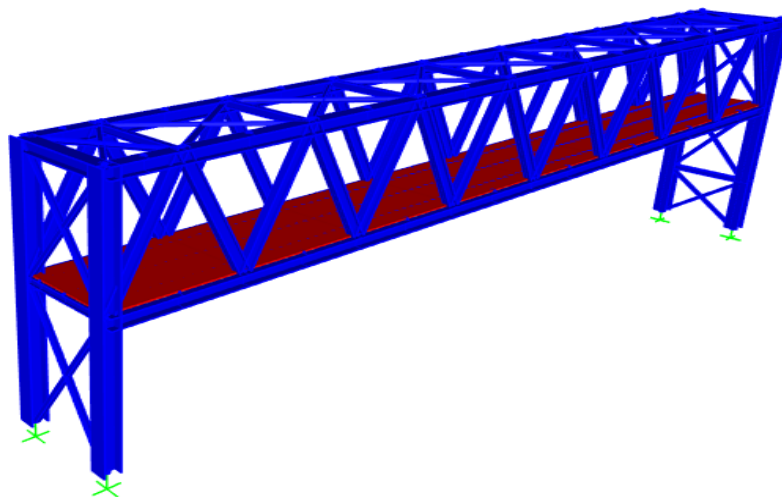
Para simulação do comportamento estrutural da passarela de acesso, optou-se pela criação de um modelo de elementos finitos tridimensional, com auxílio do programa computacional SAP 2000. Na

Figura 8 apresenta-se um esquema geral do modelo geométrico tridimensional completo da estrutura.

Figura 8 - Modelo Geométrico Completo da estrutura estudada



Fonte:  
De  
otimizar a  
numérica e  
esforço



O Autor  
modo da  
análise  
diminuir o

computacional, optou-se em restringir o modelo geométrico apenas a passarela eliminando as estruturas das rampas de acesso laterais a passarela, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Modelo Geométrico Analisado

Fonte: O Autor

No modelo geométrico da estrutura (Figura 99), as lajes foram definidas como elementos de área ligados aos elementos de barra que representam as vigas e foi considerada a continuidade entre os painéis, com uso do recurso *Assign Edge Constrains* do SAP2000. A continuidade entre os painéis de laje foi admitida em função das recomendações de Smith *et al.* (2009). Tendo em vista que as vigas de bordo são vigas mistas, admitiu-se a existência de interação completa entre aço e concreto (PINTO, 2015).

As colunas também são representadas por elementos de barra e foram modeladas segundo metade dos seus comprimentos informados no projeto estrutural, seguindo as recomendações de Smith *et al.* (2009). Na Figura 9 exibe-se a ligação das bases das colunas onde foram considerados o engaste nas extremidades.

A malha de elementos finitos deve ser adotada em função da distância do passo do caminhar humano tomada no modelo de excitação dinâmica aplicada a estrutura. Para a rampa de acesso, foi calculada essa distância em função da frequência e velocidade de caminhada, que para este caso foi de 200 mm. Dessa forma, a malha adotada deveria ser, pelo menos, menor ou igual a este valor e que também atendessem os critérios de convergência de malha (descritos posteriormente), desta forma foi adotada uma malha quadrada com 100 mm.

No modelo geométrico não foram consideradas as lajes dos pisos adjacentes à passarela (rampas de acesso) que não estavam ligadas diretamente aos bordos da passarela.

Na ligação das vigas com as colunas foram restringidas as translações no plano horizontal nos eixos x e y, de forma que pudesse ser apenas avaliadas as acelerações no eixo z, que para esse caso foi a componente mais relevante.

## **2.7 Estratégias de modelagem da passarela**

Para o desenvolvimento deste trabalho foram adotadas algumas estratégias para análise numérica de vibrações, por meio do Método dos Elementos Finitos, que foram empregados nos modelos computacionais desenvolvidos neste trabalho de pesquisa, com auxílio do programa computacional SAP 2000.

No presente estudo, as vigas são simuladas por elementos finitos unidimensionais, em que são considerados os efeitos de flexão e de torção; a laje de concreto é simulada por meio de elementos finitos de placa. Os modelos computacionais desenvolvidos consideram que as seções permanecem planas no estado deformado (PINTO, 2015).

O comportamento estrutural misto entre as lajes e vigas foi simulado deslocando as lajes do eixo das vigas e considerando uma rigidez efetiva de acordo com as premissas utilizadas em Smith *et al.* (2009).

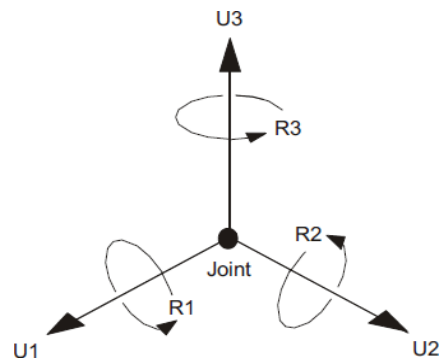
### **2.7.1 Tipos de elementos utilizados nos modelos de elementos finitos**

Segundo Pinto (2015) as técnicas de discretização objetivam modelar o mais fielmente possível os pisos compostos de laje de concreto com forma de aço incorporada apoiados sobre vigas de aço. Os elementos finitos empregados para representar as vigas dos modelos computacionais desenvolvidos são denominados *Frame*. Já para representar a laje de concreto, utilizam-se elementos denominados *Shell*. A seguir, descrevem-se as características dos elementos finitos empregados neste trabalho

O elemento *Frame* é definido por dois nós, cada um com seis graus de liberdade por nó, sendo, três à translação e três à rotação segundo os eixos x, y e z, de acordo com a Figura 10.

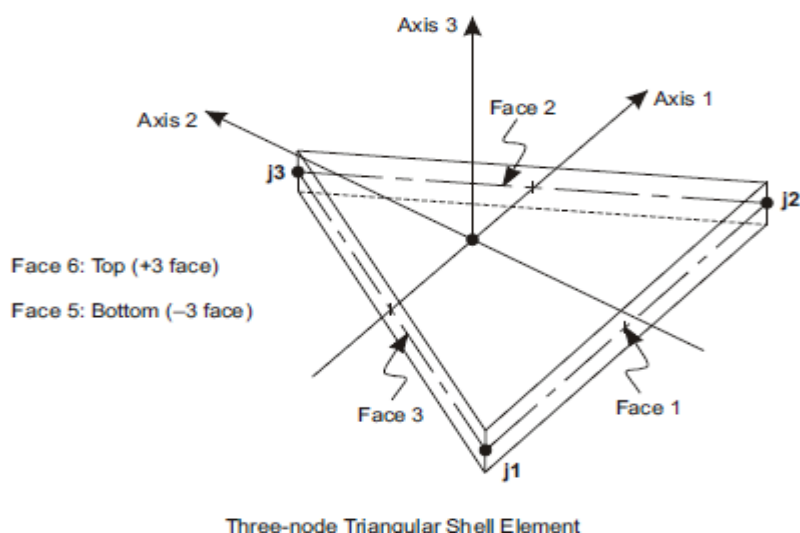
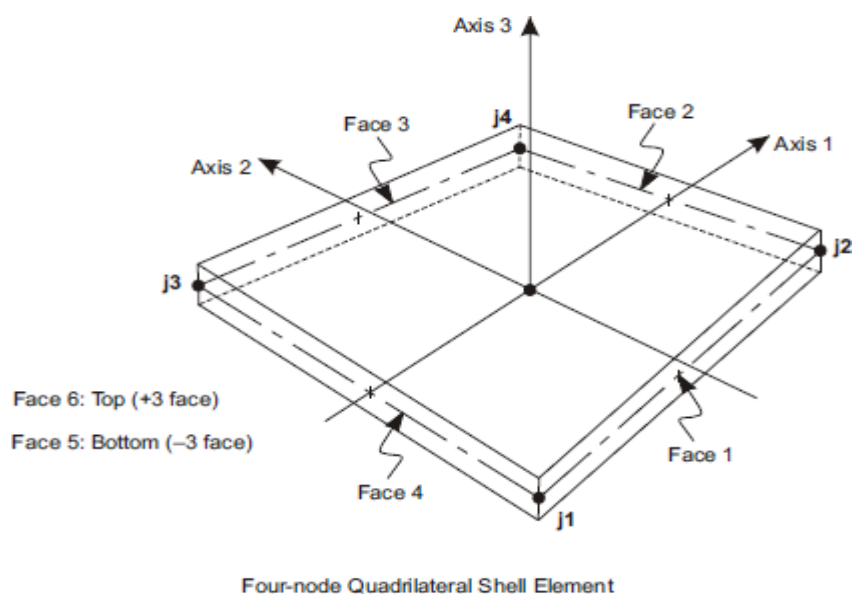
O elemento *Frame* pode ser usado de forma geral em colunas e vigas tridimensionais a formulação inclui os efeitos de flexão biaxial, torção, deformação axial, e deformações biaxiais por cisalhamentos.

Figura 10 - Os seis graus de liberdade livres para a translação e rotação para cada nó do sistema de coordenadas local



Fonte: (SAP2000, 2012).

Figura 11 - Conectividade dos elementos de área e conectividade de conexão

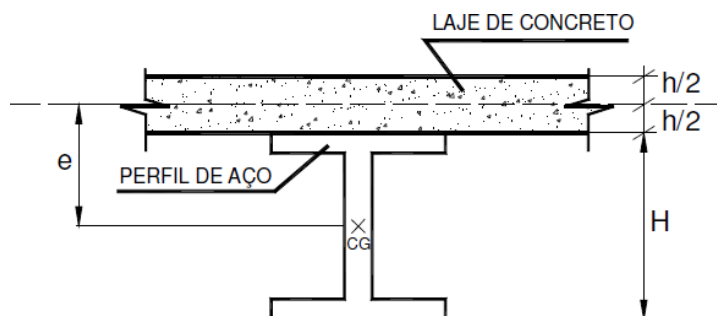


Fonte: (SAP2000 NONLINEAR VERSION 15.2, 2012).

A grande vantagem desse elemento é a possibilidade de permitir que seus nós sejam distanciados do eixo do centroide das vigas, visto que a laje e a viga não estão posicionadas no mesmo eixo, como apresentado na Figura 12. Esse cisalhamento causado pela excentricidade deve ser considerado na modelagem, pois afeta diretamente os valores das frequências naturais dos pisos.

O elemento *Shell* é definido por três ou quatro nós e sempre ativa todos os seis graus de liberdade em cada um dos seus nós (Figura 11). O elemento *Shell* é um tipo de objeto de área que é usado para modelar o comportamento estrutural de membrana e placas planas ou tridimensionais. O material do elemento tipo *Shell* pode ser homogêneo ou em camadas ao longo da espessura. Não-linearidade material pode ser considerada quando se utiliza o *Shell* em camadas. Elementos de *Shell*, de três ou quatro nós, têm formulação que combina o comportamento de membrana e de placa à flexão.

Figura 12 - Visualização da excentricidade entre a laje e a viga



Fonte: (MELLO, 2009).

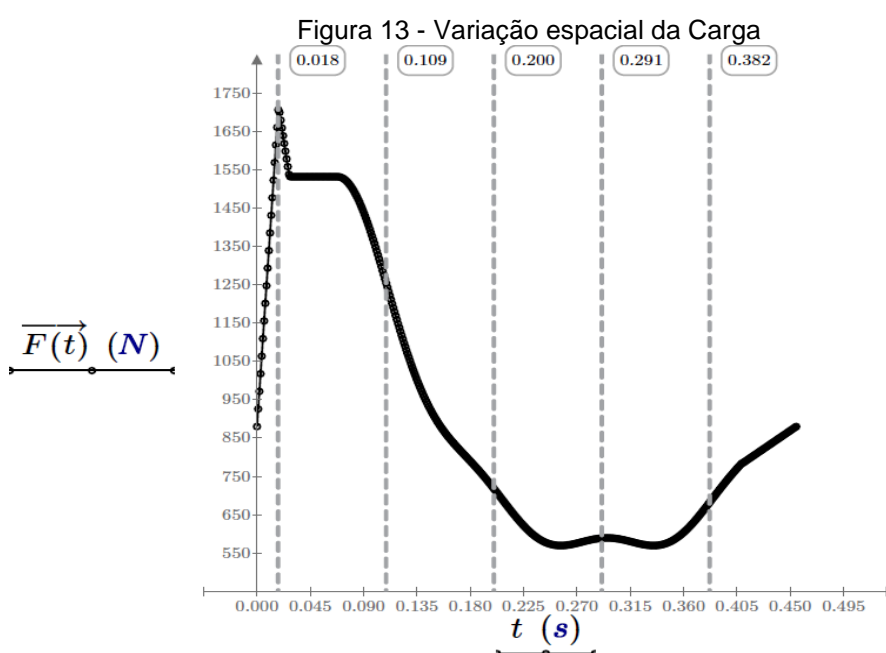
Os elementos de área que representam a laje foram considerados trabalhando solidariamente entre si, de forma que se utilizou o recurso do SAP2000 *Assign Edge Constraints*, de forma que trabalhassem em conjunto e transmitissem os esforços e deslocamentos as lajes adjacentes.

## 2.7.2 Aplicação da ação dinâmica

Para cálculo da resposta dinâmica, a malha de elementos finitos deve ser suficientemente refinada, de forma que o carregamento dinâmico devido ao caminhar humano seja adequadamente alocado nos respectivos nós do modelo numérico. De forma a simplificar a aplicação da carga dinâmica sobre a estrutura adotou-se que a carga seria dividida em 5 partes segundo as Expressões (3.4.1) a (3.4.5) ao longo do passo a uma distância  $d$  entre si e aplicadas durante um tempo  $t$  de contato na estrutura. O tempo de contato de aplicação da carga com a estrutura depende da distância e frequência do passo no qual foi feito o ensaio de carregamento dinâmico na estrutura.

Neste trabalho foi adotada uma frequência de 2,2 Hz, que corresponde a uma distância de passo de 1,0 m. O período do passo é igual a  $1/f = 0,4545$  s. Esse período corresponde a uma distância de 1,0 m, portanto, dividindo o período a distância do passo por 5, o tempo de contato da carga seria de  $0,4545/5 = 0,09090$  s e a carga seria aplicada a uma distância de 0,2 m. Logo, cada uma das cargas P1, P2, P3, P4 e P5 ficaria aplicada na estrutura durante 0,09090 s.. Entretanto as cargas não seriam aplicadas simultaneamente. A primeira carga aplicada seria a P1 por 0,09090 s. Ao final desse tempo, a carga P1 passa a ser 0 e a carga P2 entra em ação por 0,09090 s. Assim sucessivamente até todas as cargas seriam aplicadas varrendo toda estrutura pela linha de excitação, como mostra a Figura 13 e a Fonte: .

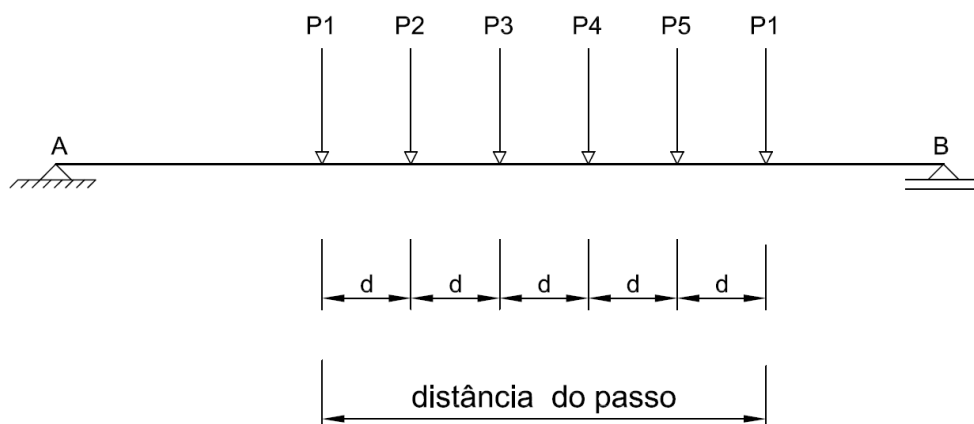
Figura 14.





Fonte: (PINTO, 2015).

Figura 14 - Aplicação da ação dinâmica sobre a estrutura

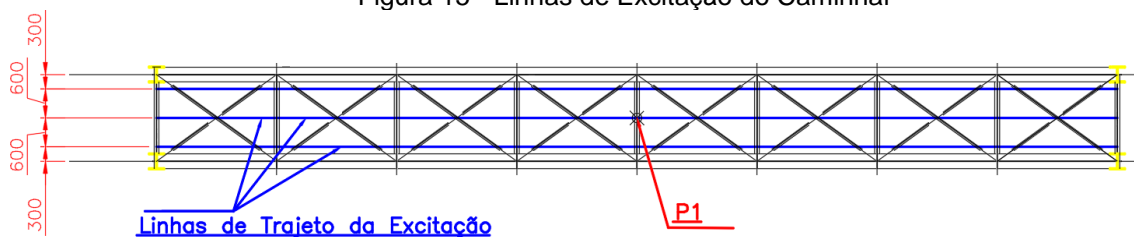


Fonte: (PINTO, 2015).

## 2.8 Modelos de excitação do caminhar humano

Levando em conta a simetria da estrutura, foram considerados seis modelos de excitação para a estrutura estudada. Para os modelos com três fontes de excitação, a simulação do caminhar foi espaçada em 60 cm entre si e a 30 cm das bordas da passarela, como observado na Figura 15. Para os modelos com duas fontes de excitação, a simulação foi espaçada com 50 cm das bordas da passarela e 80 cm de espaçamento entre si. Dessa forma, foi definido que o ponto de coleta de dados, para todos os modelos de Excitação Dinâmica seria determinado no ponto central da passarela (P1) (Figura 15).

Figura 15 - Linhas de Excitação do Caminhar

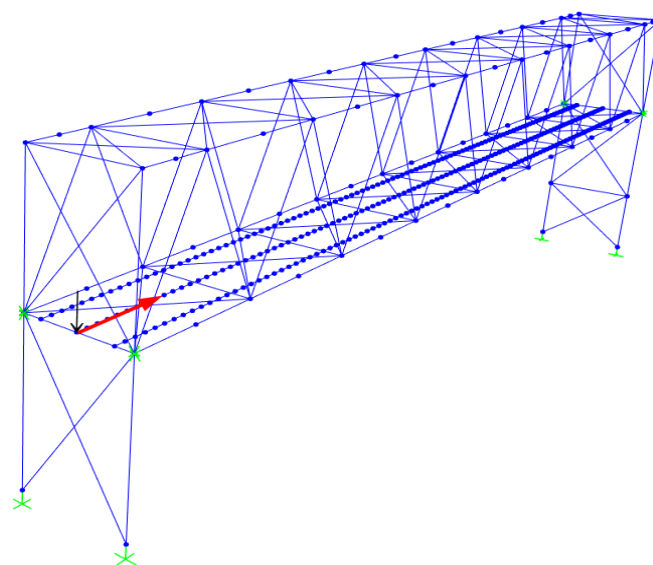


Fonte: O Autor

### 2.8.1 Modelo de excitação 1.0 (ME-1.0)

No primeiro modelo analisado, a estrutura foi excitada por apenas uma fonte de caminhar situado na linha central, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – ME-1.0 - Linhas e Direção de Excitação



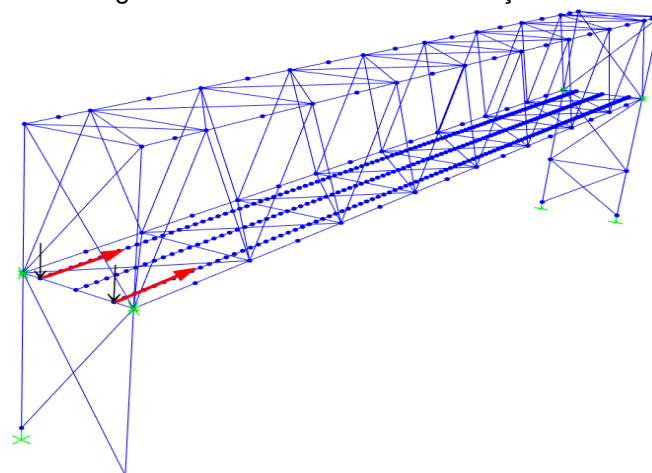
Fonte: O Autor

### 2.8.2 Modelo de excitação 2.0 (ME-2.0)

Neste modelo numérico analisado, a estrutura foi excitada por duas fontes de caminhar ambas na mesma direção, como mostrado na

Figura 17.

Figura 17 – ME-2.0 - Linhas e Direção de Excitação

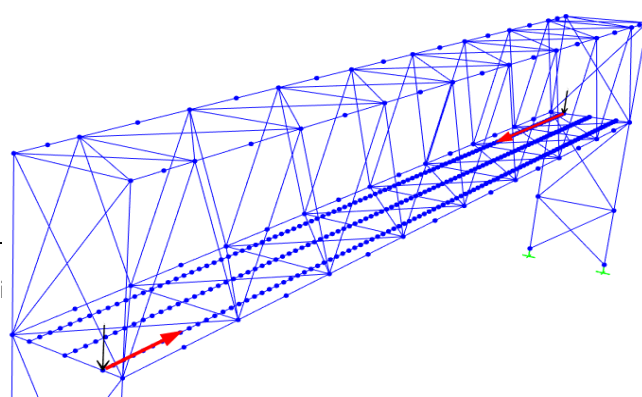


Fonte: O Autor

### 2.8.3 Modelo de excitação 2.1 (ME-2.1)

Neste modelo a estrutura foi excitada por duas fontes de excitação: uma adjacente a uma das laterais e a outra na lateral oposta, na direção contrária a da primeira, como pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 - ME-2.1 - Linhas e Direção de Excitação

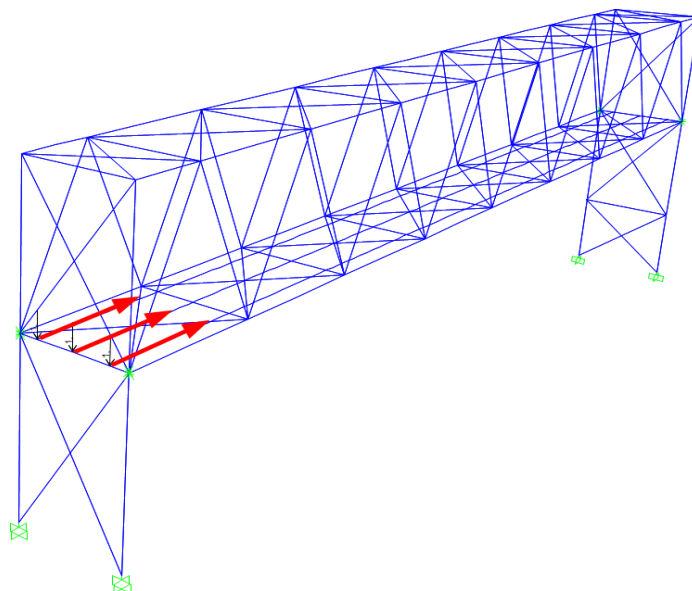


Fonte: O Autor

#### 2.8.4 Modelo de excitação 3.0 (ME-3.0)

Neste modelo numérico analisado, a estrutura foi excitada por três fontes de caminhar todas em uma direção como mostrado na Figura 19.

Figura 19 – ME-3.0 - Linhas e Direção de Excitação

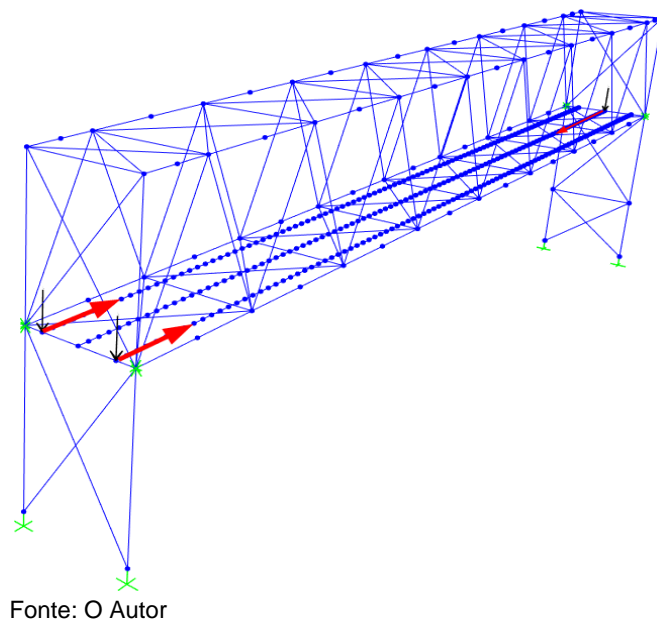


Fonte: O Autor

#### 2.8.5 Modelo de excitação 3.1 (ME-3.1)

Neste modelo a estrutura foi excitada por três fontes de excitação: duas laterais na mesma direção e outra central na direção contrária as duas primeiras como pode ser observado na Figura 20.

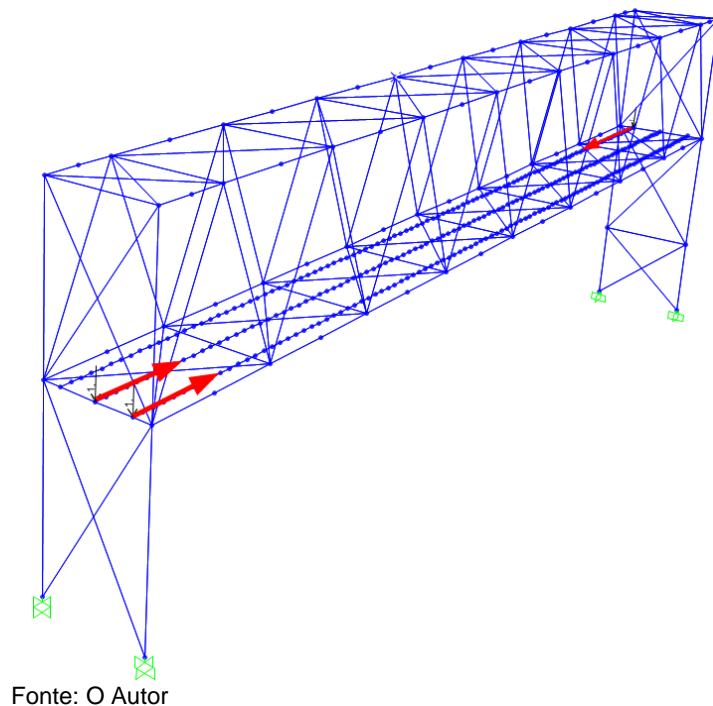
Figura 20 – ME-3.1 - Linhas e Direção de Excitação – Fonte Autor.



### 2.8.6 Modelo de excitação 3.2 (ME-3.2)

Neste modelo a estrutura foi excitada com três fontes de excitação: duas adjacentes a uma das laterais na mesma direção e outra na Lateral oposta na direção contrária às duas primeiras como pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 – ME-3.2 - Linhas e Direção de Excitação



### 2.8.7 Método comparativo

Para os modelos numéricos analisados no presente trabalho, foram realizadas análises de vibrações com o auxílio do programa computacional SAP2000. Os resultados destas análises foram adquiridos em termos de deslocamentos translacionais e verticais, e por meio de acelerações em r.m.s (*root mean square*). Estes resultados foram aferidos e confrontados com valores limites fornecidos por normas e guias de projetos internacionais (Bachmann et al. (1995),

ISO/DIS 10137 ( (INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION ISO 10137, 2007)), AISC/CISC Design Guide 11 ( (MURRAY, ALLEN e UNGAR, 2003)), SCI Publication P354 ( (SMITH, HICKS e DEVINE, 2009)) e BS 6472 (1992) e são expressos em função de uma porcentagem da aceleração da gravidade (% g).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise de vibrações induzidas pelo caminhar humano, foram obtidas acelerações ao longo do tempo. O ponto obtido como referência para obtenção dos resultados, foi o ponto central, como demonstrado na Figura 15.

Da Figura 22 à

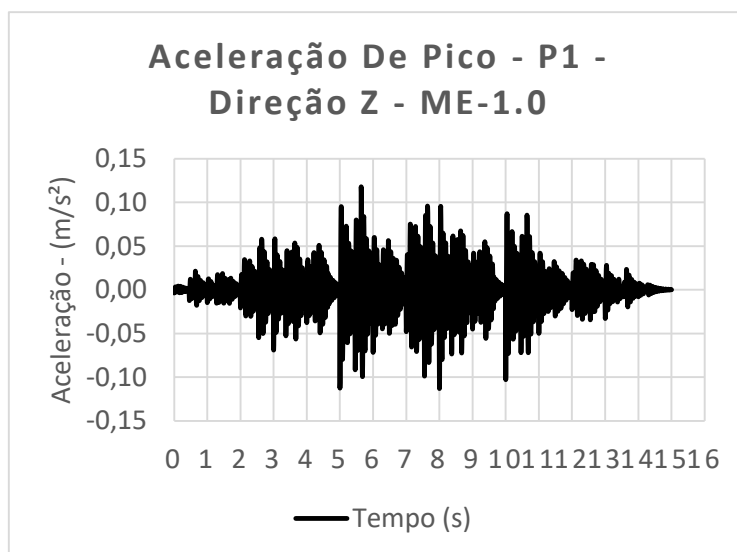
Figura 27 e Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos para a aceleração do ponto central dos modelos numéricos estudados.

Tabela 4 - Acelerações de Pico

| Modelo Numérico | Aceleração Máxima (m/s <sup>2</sup> ) |
|-----------------|---------------------------------------|
| ME-1.0          | 0,118                                 |
| ME-2.0          | 0,231                                 |
| ME-2.1          | 0,238                                 |
| ME-3.0          | 0,349                                 |
| ME-3.1          | 0,349                                 |
| ME-3.2          | 0,359                                 |

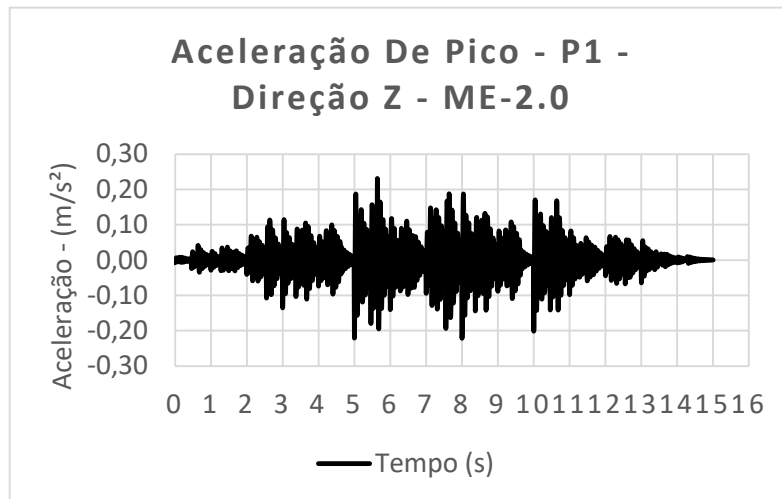
Fonte: O Autor

Figura 22 - Aceleração de Pico Ponto Central P1 – Modelo ME-1.0 – Direção Z Vertical



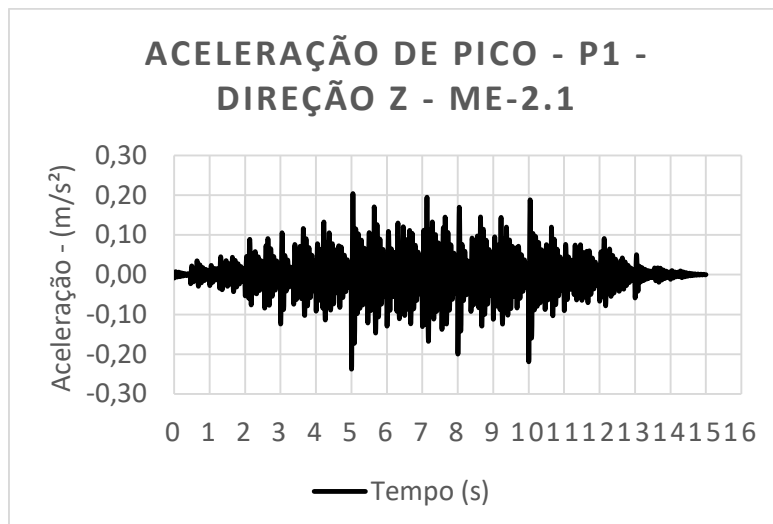
Fonte: O Autor

Figura 23 - Aceleração de Pico Ponto Central P1 – Modelo ME-2.0 – Direção Z Vertical



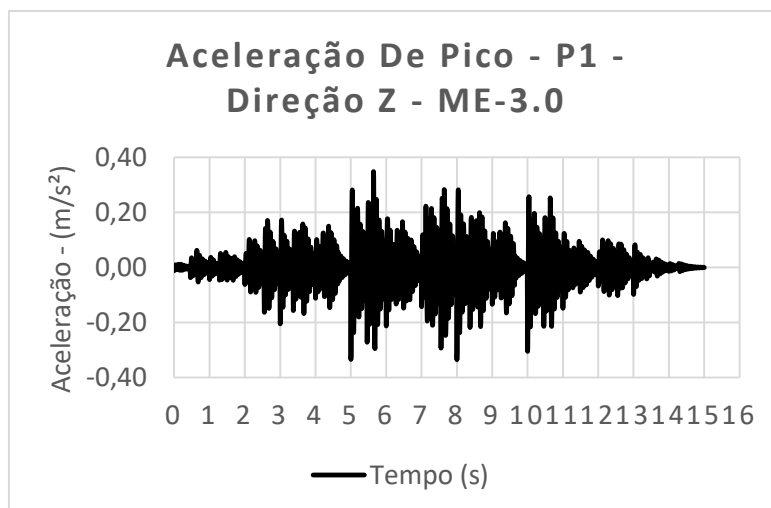
Fonte: O Autor

Figura 24 - Aceleração de Pico Ponto Central P1 – Modelo ME-2.1 – Direção Z Vertical



Fonte: O Autor

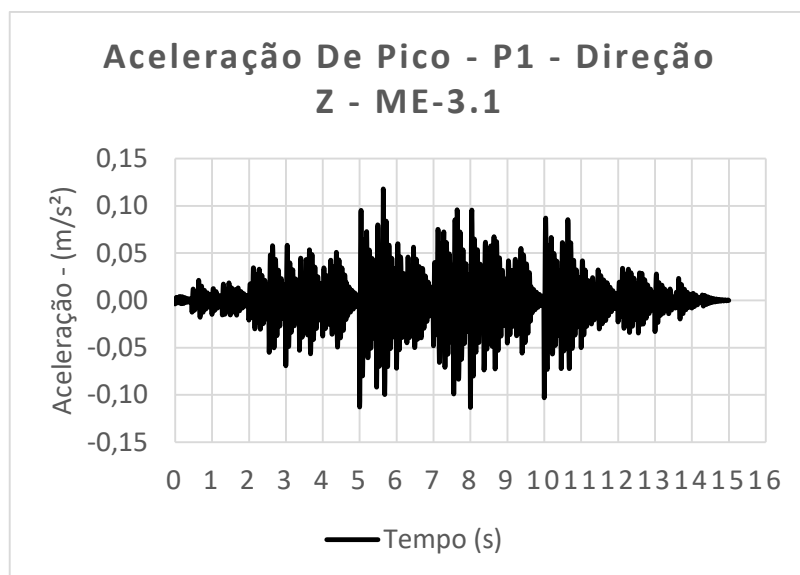
Figura 25 - Aceleração de Pico Ponto Central P1 – Modelo ME-3.0 – Direção Z Vertical



Fonte: O Autor

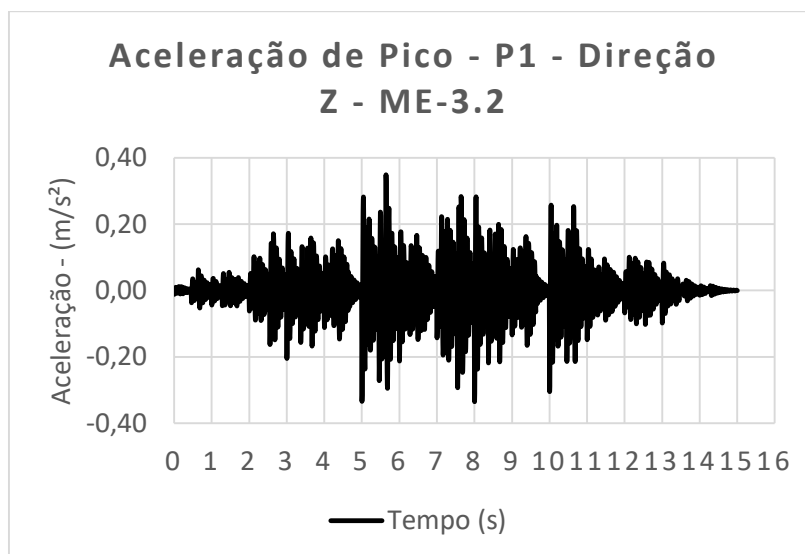


Figura 26 - Aceleração de Pico Ponto Central P1 – Modelo ME-3.1 – Direção Z Vertical



Fonte: O Autor

Figura 27 - Aceleração de Pico Ponto Central P1 – Modelo ME-3.2 – Direção Z Vertical



Fonte: O Autor

Com base nos resultados apresentados anteriormente, os modelos com 2 linhas de caminhar apresentaram uma diferença média de 1,987 vezes com relação ao modelo com apenas uma linha de caminhar e uma diferença entre si de apenas 3,03%. De outra forma os modelos com 3 linhas de caminhar apresentaram em média uma diferença de 2,986 vezes com relação ao modelo com apenas uma linha de caminhar e uma diferença máxima entre si de 2,87%.

Da Figura 28 à

Fonte: O Autor

Figura 33 e

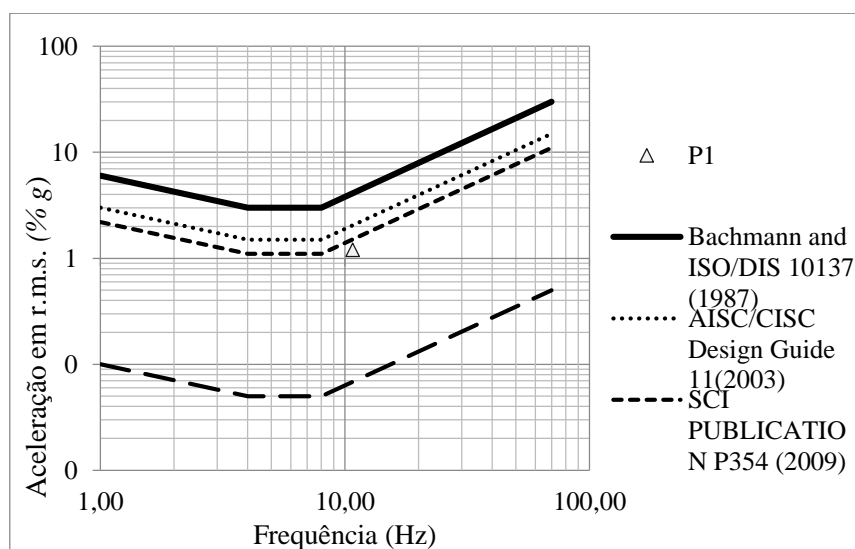
Tabela 5 são apresentados os resultados da aceleração (*r.m.s*) no ponto P1, obtidos por meio da análise numérica para os modelos numéricos estudados. Os resultados são representados sobre curvas limites de aceleração considerando o conforto humano.

Tabela 5 - Amplitude da Aceleração (R.M.S.)

| Modelo Numérico | Amplitude da Aceleração Máxima (R.M.S.) (% g) |
|-----------------|---|
| ME-1.0          | 1,203   |
| ME-2.0          | 2,355   |
| ME-2.1          | 2,426   |
| ME-3.0          | 3,558   |
| ME-3.1          | 3,568   |
| ME-3.2          | 3,670   |

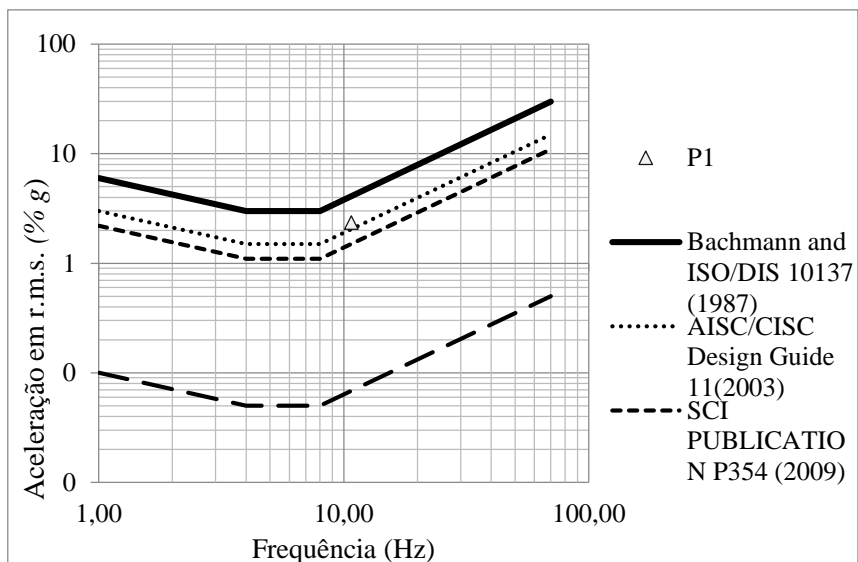
Fonte: O Autor

Figura 28 - Resultados de acelerações (*r.m.s*.) obtidos por meio da análise numérica representados sobre curvas limite de aceleração considerando o conforto – ME-1.0



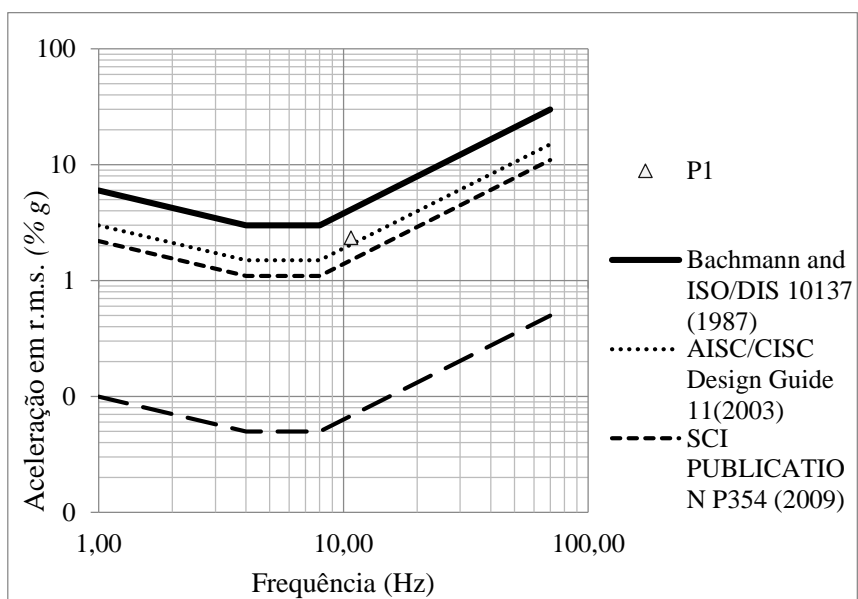
Fonte: O Autor

Figura 29 - Resultados de acelerações (*r.m.s*.) obtidos por meio da análise numérica representados sobre curvas limite de aceleração considerando o conforto – ME-2.0



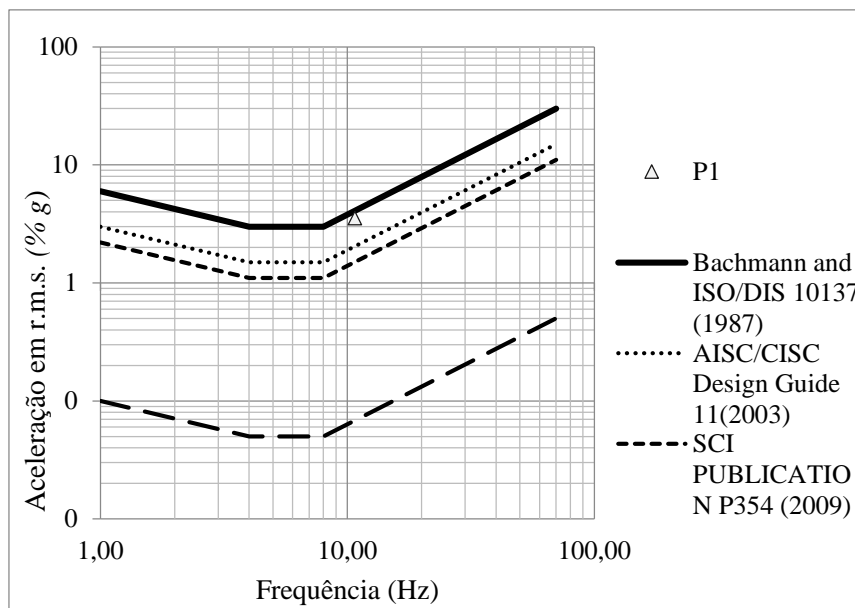
Fonte: O Autor

Figura 30 - Resultados de acelerações (r.m.s.) obtidos por meio da análise numérica representados sobre curvas limite de aceleração considerando o conforto – ME-2.1



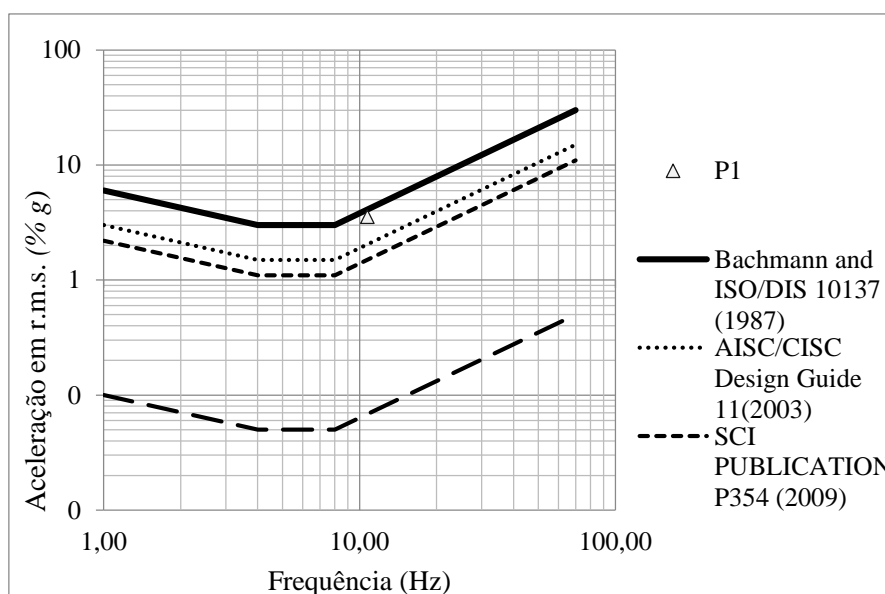
Fonte: O Autor

Figura 31 - Resultados de acelerações (r.m.s.) obtidos por meio da análise numérica representados sobre curvas limite de aceleração considerando o conforto – ME-3.1



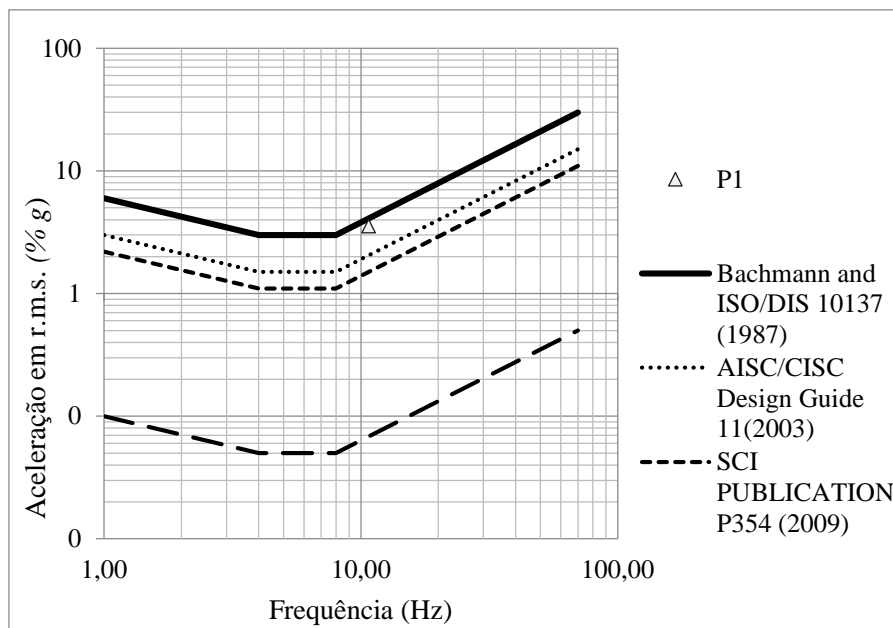
Fonte: O Autor

Figura 32 - Resultados de acelerações (r.m.s.) obtidos por meio da análise numérica representados sobre curvas limite de aceleração considerando o conforto – ME2



Fonte: O Autor

Figura 33 - Resultados de acelerações (r.m.s.) obtidos por meio da análise numérica representados sobre curvas limite de aceleração considerando o conforto – ME3



Fonte: O Autor

Pode-se observar que em relação a amplitude da aceleração em r.m.s, obtida nos modelos ME-2.0, ME-2.1, ME-3.0, ME-3.1 e ME-3.2 apresentaram resultados de aceleração abaixo apenas dos limites estabelecido por Bachmann, que é a curva que representa a maior tolerância às vibrações. E está acima das normas *ISO/DIS 10137*, *AISC/CISC Design Guide 11 (2003)*, *SCI PUBLICATION P354(2009)*, e da *Curva Base BS 6472 (1992)*. Enquanto somente o modelo ME-1.0 apresentou resultados abaixo de Bachmann e *ISO/DIS 10137*.

#### 4 CONCLUSÕES

Os estudos do comportamento de uma estrutura e da natureza das cargas atuantes sobre ela têm um papel crucial quando se trata de lajes e pisos com menor rigidez, o que ocasiona baixas frequências que se aproximam das frequências geradas pela vibração humana, gerando vibrações excessivas. Os parâmetros de análise modais bem como a frequência, modos de vibração e amortecimento são de total importância para a análise do comportamento dinâmico.

O sistema de piso misto de aço e concreto analisado, que em relação a amplitude da aceleração em r.m.s, obtida nos modelos ME-2.0, ME-2.1, ME-3.0, ME-3.1 e ME-3.2 atenderam apenas aos limites de aceleração estabelecido por Bachmann, o qual apresenta maior tolerância aos efeitos das vibrações, não atendendo as especificações da *ISO/DIS 10137*, *AISC/CISC Design Guide 11 (2003)*, *SCI PUBLICATION P354(2009)*, e da *Curva Base BS 6472 (1992)*. O modelo ME-1.0 apresentou resultados satisfatórios para a *ISO/DIS 10137* e Bachmann, porém não atendeu a s especificações da *AISC/CISC Design Guide 11 (2003)*, *SCI PUBLICATION P354(2009)*, e da *Curva Base BS 6472 (1992)*. Desta forma, observou-se que a estrutura estudada no presente trabalho não apresenta um bom desempenho quanto aos critérios de conforto humano.

De outra forma, foi possível constatar que a direção do caminhar não proporcionou grandes alterações nas amplitudes de aceleração, em cada tipo de orientação da excitação do caminhar nos modelos ME-2 e ME-3. Tais resultados podem ser justificados pelo fato de a estrutura apresentar dupla simetria e as fontes de excitação serem aplicadas sincronicamente entre si. No entanto, pode se constatar que a amplitude da aceleração é diretamente proporcional a quantidade de fontes excitadoras onde foi possível observar uma diferença quase 2 vezes maior do ME-2 com relação ao ME-1 e de quase 3 vezes do modelo ME-3 com relação ao ME-1.

## 5 BIBLIOGRAFIA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800 - Projeto De Estruturas De Aço e De Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios**. Rio de Janeiro. 2008.
- BACHMANN, H.; AMMANN, W. **Vibrations in structures induced by man and machines**. IABSE Structural Engineering Documents 3edt. Switzerland. 1987.
- BACHMANN, H.; AMMANN, W. J.; DEISCHL, F.; EISENMANN, J.; FLOEGL, I.; HIRSCH, G. H.; KLEIN, G. H.; LANDE, G. J.; MAHRENHOLTZ, O.; NATKE, H. G.; NUSSBAUMER, H.; PRETLOVE, A.; RAINER, J. H.; SAEMANN, E.; STEINBISSER, H.. **Vibration problems in structures. Practical guidelines**. Birkhauser. 1995.
- BATISTA, R. C.; VARELA, W. D. **Medidas corretivas para vibrações de painéis contínuos de lajes de edifícios**. XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, TRB0282. Brasília, DF, Brasil. 2002.
- BBC NEWS. **Scores hurt as US bridge collapses**. Publicado em 21 de Maio de 2000. [S.l.]. 2000.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 6472: Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)**. . 1992.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 5400-2: Steel, concrete and composite bridge - Part 2: Specification for loads, Annex B (normative) Vibration serviceability requirements for foot and cycle track bridges**. London UK. 2006.
- EN 1990: 2002 - CEN (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMILISATION): 1992.
- Eurocode 0 - Basis of structural Design**. . 2002.
- HOLMLUND, P.; LUNNSTROM, R. Mechanical impedance of the human body in the horizontal direction. **Journal of Sound and Vibration**, 1998.
- INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION ISO 10137. **Bases for design of structures – Serviceability of buildings against vibration**. . 2007.
- INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION ISO 2631-1. **Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: Human exposure to continuous and shock- induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz)**. . 1985.
- INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION ISO 2631-2. **Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 2: Human exposure to continuous and shock- induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz)**. . 1989.
- MELLO, A. V. A. **Análise do Efeito da Interação Aço-Concreto sobre a Resposta Dinâmica de Pisos Mistos**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2009.
- MENDES, J. P. **Análise dinâmica e controle de vibrações de passarelas de pedestres submetidas ao caminhar humano**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, UERJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2014.
- MURRAY, T. M. Acceptability Criterion for Occupant-Induced Floor Vibrations. **Engineering Journal**, v. 19, n. 2, p. 62-70, 1981.
- MURRAY, T. M.; ALLEN, D. E.; UNGAR, E. E. **Floor vibrations due to human activity**. Chicago, USA, Steel design guide series nº 11, American Institute of Steel Construction, AISC. 2003.
- NEWLAND, D. E. Vibration of the London Millennium Footbridge: Cause and Cure. **International Journal of Acoustics and Vibration**, p. 9-14, 2003.
- ONT83. **Ontario Highway Bridge Design Code 1983 and Commentary**. Ministry of Transportation and Communication, Highway Engineering Division, Toronto. 1983.
- PINTO, J. F. A. **Análise numérica de vibrações em sistemas de piso misto de aço e concreto e avaliação de desempenho considerando o conforto humano**. ssertação de Mestrado. Pós Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, UFV. Viçosa, MG, Brasil. 2015.
- SAP2000 NONLINEAR VERSION 15.2. **User's Manual, version 15.2**. Inc., Berkeley, CA. 2012.



- SILVA, J. M. M. F. **Análise de Vibrações sob Ação Humana na Ponte Pendonal sobre a Linha Vermelha**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto. Porto, Portugal. 2010.
- SMITH, A. L.; HICKS, S. J.; DEVINE, P. J. **Design of floors for vibration: A new approach; Volume 354. The SCI publication. p 114. Steel Construction Institute**. Silwood Park, Ascot, Berkshire. 2009.
- SMITH, J. W. **The Vibration of Highway Bridges and the Effect on human comfort**. PhD Thesis, University of Bristol. Bristol, UK. 1969.
- THE STATIONERY OFFICE. **Health Technical Memorandum 08-01: Acoustics**. . 2008.
- VARELA, W. D. **Modelo Teórico-Experimental para análise de vibrações induzidas por pessoas caminhando sobre lajes de edifícios**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2004.