

FACULDADE DE CIÊNCIAS GERENCIAIS DE MANHUAÇU

**ESTUDO DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURA MISTA DE AÇO E CONCRETO E
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO CONSIDERANDO O CONFORTO HUMANO**

Lais Ribeiro Lopes

Manhuaçu- MG
2017

LAIS RIBEIRO LOPES

**ESTUDO DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURA MISTA DE AÇO E CONCRETO E
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO CONSIDERANDO O CONFORTO HUMANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Superior de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Me. José Francisco Anunciação Pinto

Manhuaçu- MG
2017

LAIS RIBEIRO LOPES

**ESTUDO DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURA MISTA DE AÇO E CONCRETO E
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO CONSIDERANDO O CONFORTO HUMANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Superior de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas
Orientador: José Francisco Anunciação Pinto

Banca Examinadora

Data da Aprovação: ____ / ____ / ____.

Mestre José Francisco Anunciação Pinto; FACIG

Especialista Carlos Henrique Carvalho Júnior; FACIG

Especialista Leandro José de Lima; FACIG

Manhuaçu- MG
2017

ESTUDO DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURA MISTA DE AÇO E CONCRETO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO CONSIDERANDO O CONFORTO HUMANO

Lais Ribeiro Lopes

José Francisco Anunciação Pinto

Curso: Engenharia Civil Período: 10º Área de Pesquisa: Estruturas

Resumo: Atualmente devido á modernização de técnicas construtivas e o surgimento de novas tendências de mercado, tornou-se necessária a execução de estruturas de piso cada vez mais esbeltas, o que tem permitido vencer grandes vãos livres, com o mínimo de elementos verticais e consequentemente menos rígidas. E para garantir a segurança e o conforto necessário para os usuários das estruturas, tornou-se imprescindível ainda na etapa de projeto analisar a estrutura quanto ao seu desempenho e critério de avaliação quanto ao conforto humano. Devido a esta necessidade o presente artigo tem como finalidade analisar as vibrações, do piso de uma estrutura mista de aço e concreto utilizando o software para análise estrutural SAP2000. Os resultados de aceleração alcançados foram obtidos através da elaboração de um modelo numérico computacional, por meio do Método do Elementos Finitos. Os resultados obtidos foram confrontados e comparados com as principais normas nacionais e internacionais sobre vibrações, visando o conforto necessário para os seres humanos. A análise realizada com o programa computacional SAP2000 foi capaz de simular eficientemente o comportamento da estrutura mista de aço e concreto quanto á vibração, resultando em valores de aceleração que está dentro do limite estabelecido pela *ISO 10137 (1987)* e acima das normas *AISC/CISC DesignGuide 11 (2003)*, *SCI PUBLICATION P354(2009)*, e da *Curva Base- BS 6472(1992)*. Devido estar acima dos limites estabelecidos pela maioria das normas internacionais, a passarela analisada poderá gerar vibrações e causar desconforto para os usuários. Atestando a eficiência e importância de se analisar uma estrutura quanto ao conforto humano através de uma análise computacional durante a etapa de projeto.

Palavras-chave: Vibração. Aceleração. Conforto Humano.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-- Descrição qualitativa da reação humana à oscilação contínua uniforme	8
FIGURA 2- Geometria simplificada de uma passada	9
FIGURA 3 - Força de contato de um passo e reação do piso	9
FIGURA 4- Componentes da série de Fourier da função de força dinâmica típica do caminhar humano sobre uma superfície rígida	10
FIGURA 5- Posição do eixo de acordo com a posição da pessoa	12
FIGURA 6- Representação da carga durante a caminhada	13
FIGURA 7- Função de carregamento proposta por Varela (2004).	13
FIGURA 8- Variação espacial da carga	16
FIGURA 9- Maquete Eletrônica da Passarela de Festas	17
FIGURA 10- Vista Lateral da passarela	17
FIGURA 11-Planta baixa da passarela	18
FIGURA 12- Modelo Geométrico	19
FIGURA 13- Ponto P1 Passarela do Modelo Geométrico	19
FIGURA 14- Ponto P1 Modelo Geométrico.....	20
FIGURA 15- Aceleração de Pico do Ponto Central	20
FIGURA 16 - Espectro da resposta da aceleração no domínio da frequência para o P1	21
FIGURA 17- Resultados de acelerações (r.m.s.) obtidos por meio da análise numérica representados sobre curvas limite de aceleração considerando o conforto humano.	22

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- Características do caminhar humano, AISC/CSIC Design Guide 11 (2003).	15
---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. DESENVOLVIMENTO	7
2.1. Referencial Teórico	7
2.2 Metodologia	12
2.3 Análise Numérica De Vibrações.....	15
2.3.1 Considerações Preliminares	15
2.3.2 Descrição da Estrutura	16
2.3.3 Modelo Numérico.....	19
3. RESULTADOS E CONCLUSÃO	20
3.1 Resultados	20
3.2 Conclusão	22
4. REFERÊNCIAS.....	23

1. INTRODUÇÃO

A modernização de técnicas construtivas e as novas tendências de mercado, viabilizaram a execução de estruturas de piso cada vez mais esbeltas, permitindo vencer grandes vãos livres, com o mínimo de elementos verticais.

Estas novas características dos elementos conduzem a sistemas estruturais com frequências naturais cada vez mais próximas da faixa de frequência de excitações associada às atividades humanas. Assim, os sistemas estruturais de pisos tornam-se 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. (PINTO, 2015, p.2)

“Para acompanhar esta evolução, é necessário que os sistemas estruturais de pisos sejam concebidos levando em consideração esses efeitos”. (PINTO, 2015, p.2) Devido a este fato, é de suma importância que se faça uma análise das vibrações geradas em estruturas mistas de aço e concreto durante a etapa de projeto, de modo a evitar que a estrutura cause desconforto para os usuários.

Este artigo tem como finalidade a análise numérica de vibrações, do piso de uma estrutura mista de aço e concreto utilizando o software para análise estrutural SAP2000. Os resultados de aceleração serão obtidos através da elaboração de um modelo numérico computacional, por meio do Método dos Elementos Finitos. Comparando os resultados gerados com as principais normas nacionais e internacionais vigentes, permitindo assim, a verificação se a estrutura atende aos padrões determinados por norma quanto ao conforto humano.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Referencial Teórico

Segundo Zúñiga (2011), existem dois fatores que têm contribuído com o aperfeiçoamento das novas técnicas construtivas permitindo assim o desenvolvimento de novos métodos de dimensionamento. São eles: o conhecimento da microestrutura, devido ao avanço da tecnologia; e os diferentes processos construtivos devido à versatilidade de equipamentos. Para Zúñiga a junção destes fatores possibilitou o desenvolvimento de estruturas mais esbeltas e flexíveis, e consequentemente mais suscetíveis a solicitações dinâmicas, devido a atividades humanas como andar, dançar ou pular.

“A resposta humana ao movimento do piso é um fenômeno muito complexo, envolvendo a magnitude do movimento, o ambiente em questão e a sensibilidade humana.” (MOREIRA, 2004, p.38)

As vibrações afetam as pessoas de muitas formas causando desconforto, problemas de saúde, diminuição da capacidade de concentração e eficiência no trabalho, ou enjôo, no caso de vibrações de baixa frequência. A forma pela qual a vibração estrutural de prédios influencia o conforto dos ocupantes depende da frequência, da direção que atinge o corpo humano e de seu comportamento ao longo do

tempo, se contínua, intermitente ou transitória. Além disso, a percepção e tolerância à vibração dependem do local, do tipo de atividade, do horário, e da expectativa de conforto e privacidade das pessoas. (MOREIRA, 2004, p.2)

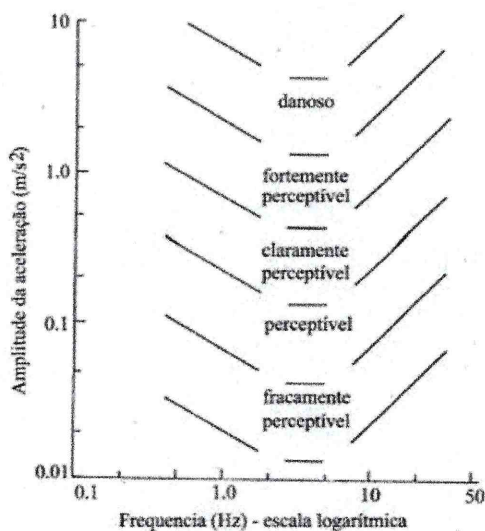
Segundo Pinto (2015), com o passar do tempo foram desenvolvidos novos métodos de se avaliar o conforto humano frente às vibrações produzidas pelas atividades humanas. Esses métodos levam em consideração o cálculo da frequência natural do sistema de pisos e a máxima amplitude da aceleração, velocidade ou deslocamento para uma excitação de referência.

De acordo com Margarido (2013), durante a análise de vibrações nas estruturas, deve-se pressupor que todo o corpo humano está submetido à vibração de baixa frequência, e esta é transmitida para o corpo humano através da superfície em que ele está apoiado, e considera-se que o todo o ambiente está caracterizado do mesmo movimento.

Moreira(2004), afirma que para verificar se a estrutura está dentro dos limites de vibrações permitidos que garantam o conforto e segurança para os usuários, é preciso confrontar as acelerações obtidas através da análise da estrutura, com as acelerações estabelecidas pelas normas vigentes.

“As normas apresentam os resultados em curvas, que são em função da frequência da vibração, por isso é importante conhecer qual a frequência predominante na estrutura, seja experimental ou numericamente”. (MOREIRA, 2004, p.39) como demonstra a Figura 1.

FIGURA 1-- Descrição qualitativa da reação humana à oscilação contínua uniforme



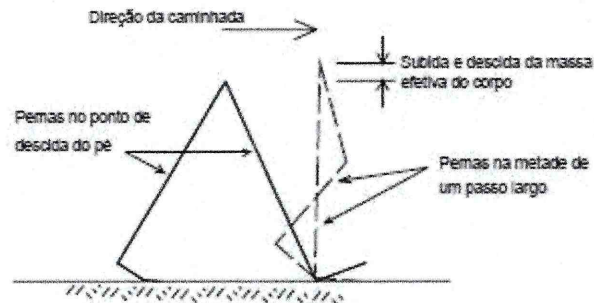
Fonte: Ohlsson (1982) apud Pinto (2015)

O mecanismo do caminhar, é condicionado ao indivíduo que realiza sua própria propulsão para frente, mediante impulsos alternados e rítmicos das pernas. O corpo se inclina para frente e logo depois a

perna propulsora ou de sustentação se estende, empurrando o tronco para frente. Quando o movimento do tronco para frente leva seu centro de gravidade além da borda anterior da base de sustentação (artelhos do pé propulsor), a gravidade tende a fazer com que o corpo caia para frente e para baixo. Simultaneamente, a outra perna descreve uma oscilação para frente, apoiando-se no solo. Isso proporciona uma base de sustentação muito mais ampla e evita a queda do corpo. (MELLO, 2005, p.38)

De acordo com Mello (2005), durante o movimento das pernas, a subida e a descida da massa efetiva do corpo, ocorrem em uma faixa em torno de 50mm, de pico a pico, podendo sofrer variações de acordo com o ângulo formado entre as pernas. Como demonstra a Figura 2.

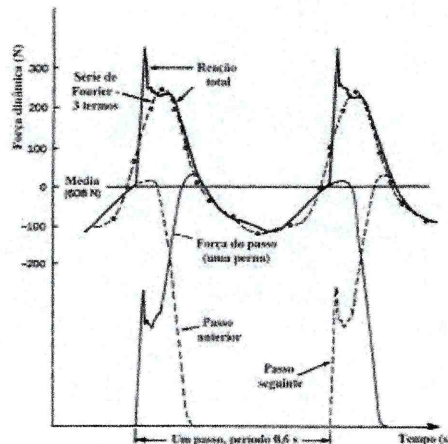
FIGURA 2- Geometria simplificada de uma passada



Fonte: Mello (2005)

De acordo com Varela (2004), um passo pode ser definido como o intervalo entre os contatos subsequentes dos pés no piso. Considerando que a distância entre os pés durante o passo é bem pequena em relação ao tamanho da laje de piso, pode-se dizer que a força de reação do piso, que é a soma das forças aplicadas pelos pés durante o passo, é bem próxima da força que um passo exerce sobre o piso. Como demonstra a Figura 3.

FIGURA 3 - Força de contato de um passo e reação do piso



Fonte: Varela (2004)

Esta Figura 3 também apresenta uma função matemática da reação do piso, aproximada pela série de Fourier com três termos como demonstra a equação 2.1. A função matemática considera a parcela estática associada ao peso da pessoa e três ou quatro componentes harmônicas da excitação. Esses harmônicos surgem devido à interação entre a carga crescente representada por um pé e pelo simultâneo descarregamento do outro pé. (MELLO, 2005, p.39).

$$F(t) = P \left[1 + \sum \alpha_i \cos(2\pi i f_p t + \Phi_i) \right] \quad (\text{Equação 2.1})$$

onde:

$F(t)$ função de carregamento dinâmico;

P peso de uma pessoa;

α_i coeficiente dinâmico para a força harmônica (fator de carga dinâmica)

i múltiplo do harmônico (1,2,3, etc.);

f_p frequência do passo humano;

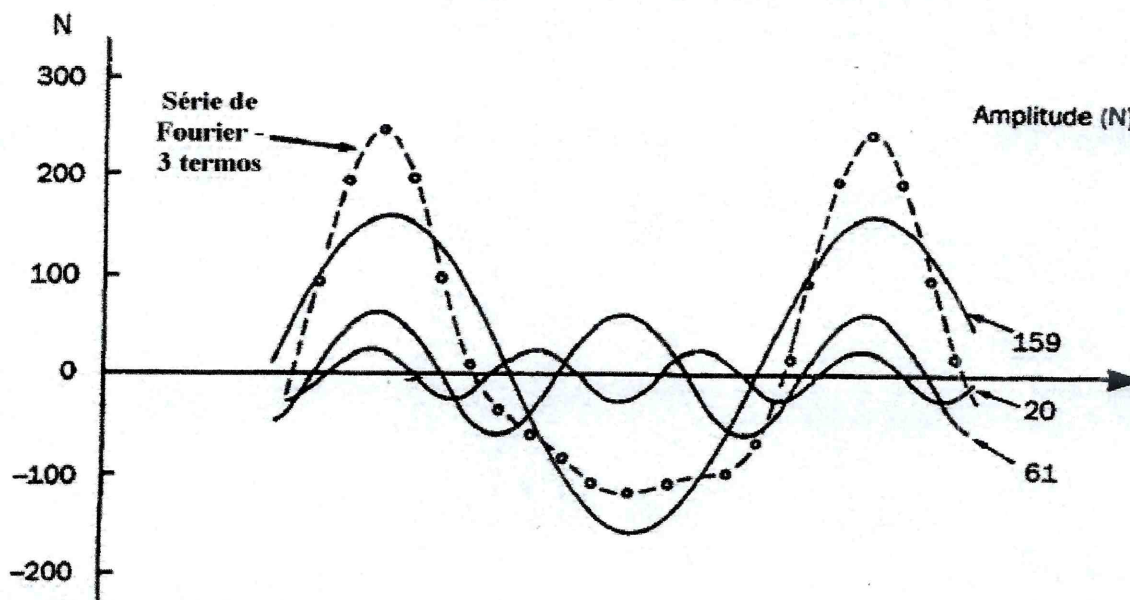
Φ_i ângulo de fase para o harmônico i ;

t tempo;

Φ é a defasagem entre o i -ésimo e o primeiro harmônico;

A Figura 4 representa a série de Fourier:

FIGURA 4- Componentes da série de Fourier da função de força dinâmica típica do caminhar humano sobre uma superfície rígida



Fonte: Ohlsson (1982) apud Wyatt (1989).

Existem várias normas, guias práticos e critérios de projeto, que foram desenvolvidos ao longo do tempo para auxiliar os projetistas e construtores a fim de reduzir os efeitos nocivos das vibrações.

NBR 8800-2008:

De acordo com a ABNT NBR 8800/2008, existem duas avaliações que devem ser verificadas quanto às vibrações nas estruturas: a precisa e a simplificada.

Na avaliação precisa, “o problema da vibração em pisos deve ser considerado no projeto da estrutura por meio de análise dinâmica”. (ABNT NBR 8800, 2008, p.161)

Devido a isso, alguns fatores devem ser levados em consideração como por exemplo:

“As características e a natureza das excitações dinâmicas; os critérios de aceitação para conforto humano em função do uso e ocupação; a frequência natural da estrutura do piso; a taxa de amortecimento modal; os pesos efetivos do piso” (ABNT NBR 8800, 2008, p.161)

Na avaliação simplificada para atividades humanas normais, essa norma faz a seguinte descrição:

Nos pisos em que as pessoas caminham regularmente, como os de residências e escritórios, a menor frequência natural não pode ser inferior a 4 Hz. Essa condição fica satisfeita se o deslocamento vertical total do piso causado pelas ações permanentes, excluindo a parcela dependente do tempo, e pelas ações variáveis, calculado considerando-se as vigas como bi apoiadas e usando-se as combinações frequentes de serviço, não for superior a 20mm respectivamente. Nos pisos em que as pessoas saltam ou dançam de forma rítmica, como os de academia de ginástica, salões de dança, ginásios e estádios de esporte, a menor frequência natural não pode ser inferior a 6 Hz, devendo ser aumentada para 8 Hz caso a atividade seja muito repetitiva, como ginástica aeróbica. Essas condições ficam satisfeitas, respectivamente, se o deslocamento vertical total do piso causado pelas ações permanentes, excluindo a parcela dependente do tempo, e pelas ações variáveis, calculado considerando-se as vigas como bi apoiadas e usando-se as combinações frequentes de serviço, não superar 9 mm e 5mm. (ABNT NBR 8800, 2008, p.161)

ABNT NBR 6118/2014

De acordo com a norma ABNT NBR 6118 (2014), a análise das vibrações pode ser feita em regime linear elástico, em estruturas usuais. E para assegurar um comportamento satisfatório destas estruturas, deve-se afastar o máximo possível a frequência natural da estrutura, da frequência crítica, esta depende da destinação da respectiva edificação.

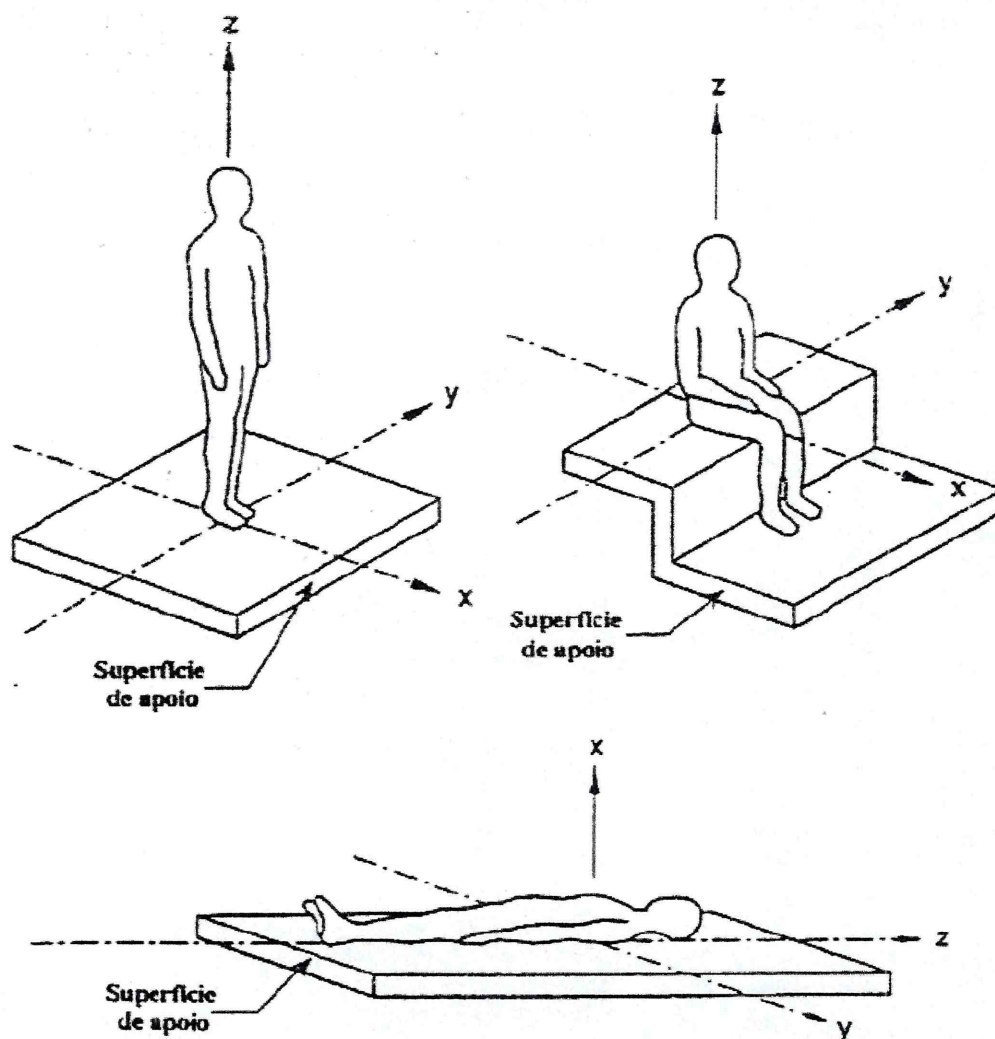
ISO 2631/1 (1985)

De acordo com a ISO 2631/1 (1985), foram definidos métodos de medida da vibração do corpo inteiro, e foram indicados os principais fatores que se combinam para determinarem o nível de aceitabilidade do corpo humano a vibração. Apresentando três níveis de sensibilidade humana às vibrações: limite da redução do conforto, queda da eficiência e limite do tempo de exposição.

ISO 2631/2 (1989)

De acordo com a ISO 2631/2 (1989), é possível avaliar o efeito das vibrações sobre o conforto das pessoas usando o valor quadrático médio (eficaz) da aceleração medida num período representativo. Apresentando um guia para aplicação as ISO 2631-1(1985), incluindo curvas em função da frequência. Estas curvas são estabelecidas conforme o eixo em que a vibração atinge o corpo humano (x-frontal, y-lateral ou z-longitudinal) em pé, sentado ou recostado, conforme mostra a Figura 5.

FIGURA 5- Posição do eixo de acordo com a posição da pessoa

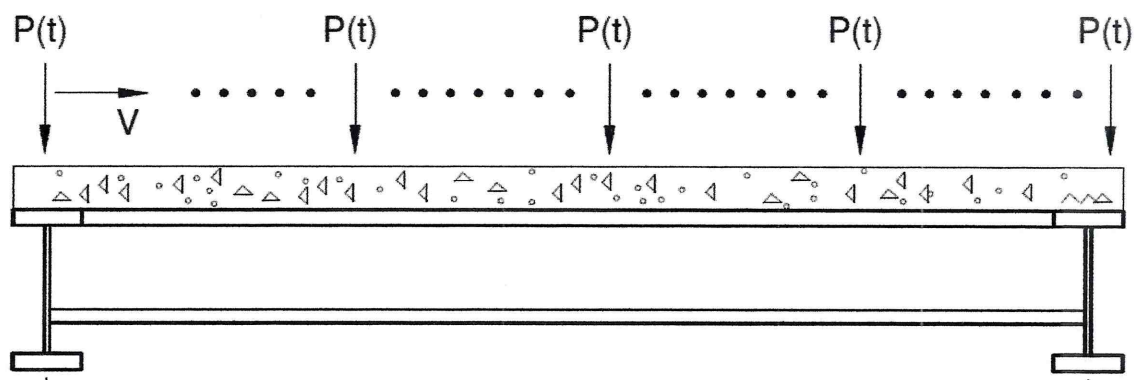


Fonte: ISO 2631/1 (1985)

2.2 METODOLOGIA

Neste trabalho iremos utilizar o modelo de carregamento dinâmico proposto por Varela (2004). Segundo ele, 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 pela Figura 6, em que a carga é aplicada constantemente na estrutura a uma certa velocidade.

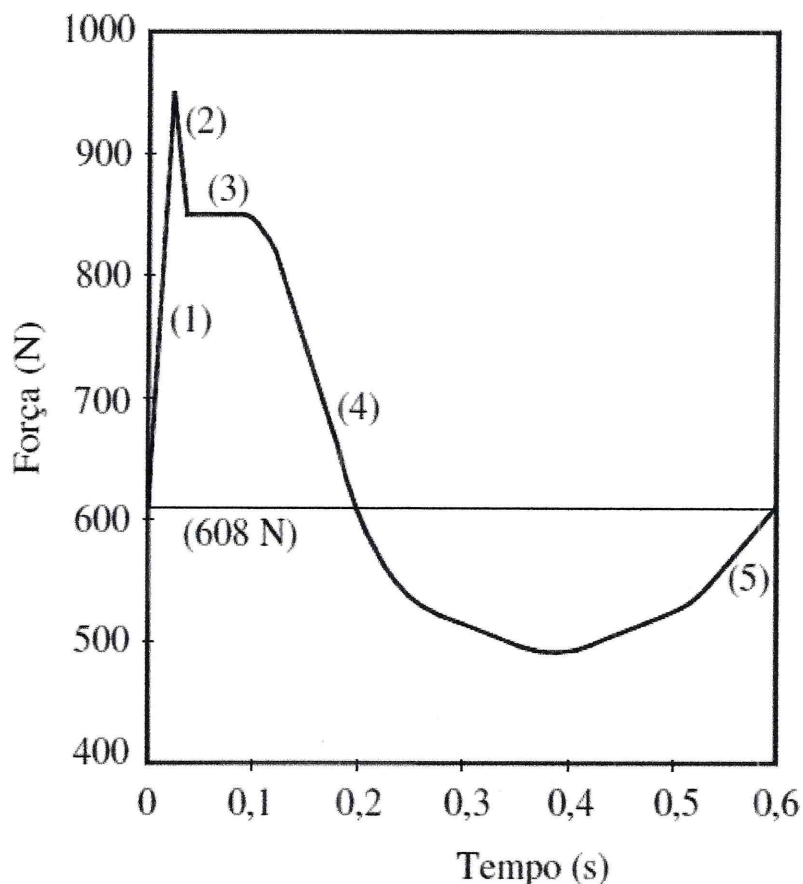
FIGURA 6- Representação da carga durante a caminhada



Fonte: Mello (2009) apud Pinto (2015)

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 também 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 7, e nas equações 2.2.1 a 2.2.5.

FIGURA 7- Função de carregamento proposta por Varela (2004).



Fonte: Varela (2004)

Para o trecho "1", tem-se:

$$F(t) = \left(\frac{f_{mi} F_m - P}{0,04 T_p} \right) t + P \quad \text{se } 0 \leq t < 0,04 T_p \quad (2.2.1)$$

Para o trecho "2", tem-se:

$$F(t) = f_{mi} F_m \left[\frac{C_1 (t - 0,04 T_p)}{0,02 T_p} \right] + 1 \quad \text{se } 0,04 \leq t < 0,06 T_p \quad (2.2.2)$$

Para o trecho "3", tem-se:

$$F(t) = F_m \quad \text{se } 0,006 \leq t < 0,15 T_p \quad (2.2.3)$$

Para o trecho "4", tem-se:

$$F(t) = P \left[1 + \sum_i^n \alpha_i \sin(2 \pi i f_p (t + 0,1 T_p) + \phi_i) \right] \quad \text{se } 0,15 T_p \leq t < 0,9 T_p \quad (2.2.4)$$

Para o trecho "5", tem-se:

$$F(t) = 10(P + C_2) \left(\frac{t}{T_p} + 1 \right) + P \quad \text{se } 0,9 T_p \leq t < 1,00 T_p \quad (2.2.5)$$

onde:

$$F_m = P \left(1 + \sum_{i=1}^{nh} \alpha_i \right) \quad (2.2.6)$$

$$C_1 = \left(\frac{1}{f_{mi}} - 1 \right) \quad (2.2.7)$$

$$C_2 = \begin{cases} P(1 - \alpha_2) & \text{se } nh = 3 \\ P(1 - \alpha_2 + \alpha_4) & \text{se } nh = 4 \end{cases} \quad (2.2.8)$$

onde:

- α_i coeficientes dinâmicos da série de Fourier;
- F_m valor máximo da série de Fourier, dado pela Expressão (2.2.6);
- 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 (2.2.7);
- C_2 coeficiente dado pela Expressão (2.2.8);
- nh número de harmônicos.

As expressões 2.2.1 a 2.2.5, 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.

2.3 Análise Numérica De Vibrações

2.3.1 Considerações Preliminares

Durante a análise realizada no programa SAP 2000, foram adotados elementos finitos unidimensionais para simularem as vigas, denominados *Frame*, que levam em consideração os efeitos de torção e flexão. Já a laje de concreto da estrutura foi simulada por meio de placas, utilizando-se de elementos finitos denominados *Shell*.

Pinto (2015, p.59) afirma que “Durante o caminhar, o movimento de pernas do ser humano causa a subida e descida da massa efetiva do corpo em cada passo causando variação da força dinâmica gerada.” Tornando assim, a ação dinâmica devido ao caminhar humano, um evento complexo. E para que o modelo numérico computacional fosse o mais realista possível, foram adotadas variações espaciais e temporais de acordo com os passos realizados pelo ser humano durante uma caminhada normal.

Na análise numérica devem ser considerados alguns critérios significativos do caminhar humano, como por exemplo: a frequência do passo em (Hz), a distância do passo em (m), e a velocidade do passo em (m/s). Como base para adquirir estes parâmetros, foi usado o *AISC/CISC Design Guide 11*(2003) como mostra a Tabela1 a seguir:

TABELA 1- Características do caminhar humano, AISC/CSIC Design Guide 11 (2003).

Atividade	Velocidade (m/s)	Distância do Passo (m)	Frequência do Passo (Hz)
Caminhada lenta	1,1	0,60	1,70
Caminhada normal	1,5	0,75	2,00
Caminhada rápida	2,2	1,00	2,30

Fonte: *AISC/CSIC Design Guide 11* (2003).

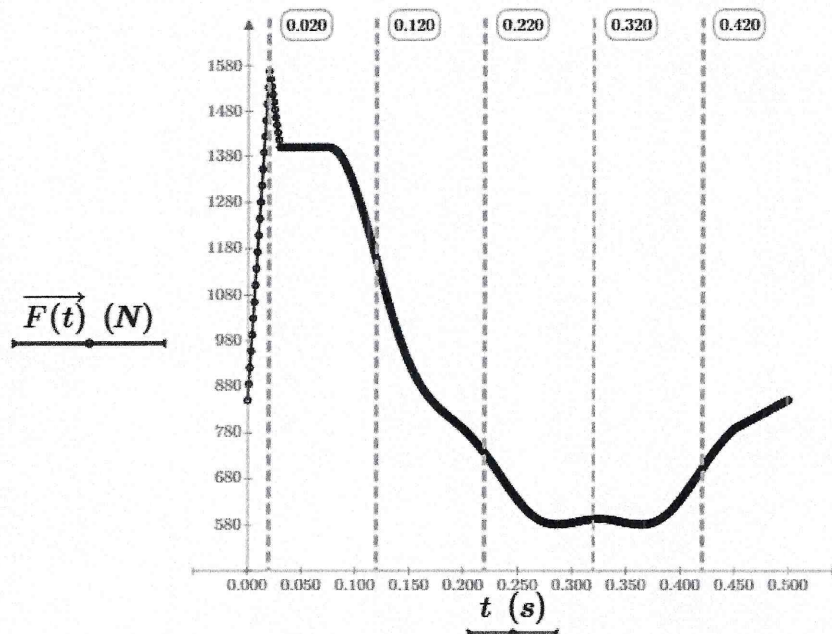
Segundo Pinto (2015), para que se possa calcular corretamente a resposta dinâmica da estrutura, a malha de elementos finitos deve ser aperfeiçoada, de maneira tal, que o carregamento devido ao caminhar humano seja devidamente designado nos respectivos nós do modelo computacional. Para facilitar a aplicação desta carga sobre a estrutura, considerou-se que a carga seria dividida em 5 partes, conforme mostra as expressões (2.2.1) á (2.2.5) e a figura (6).

No modelo computacional, foi adotada como atividade uma caminhada normal, onde a frequência do passo equivale a 2,0 Hz, a distância do passo é de 0,75 m e a velocidade do passo é de 1,5m/s. Conforme especifica o *AISC/CISC Design Guide 11*(2003) na Tabela1.

Para o cálculo do período do passo, fui usada a seguinte equação: $1/f = 0,5$ s, onde f é o valor da frequência, que neste caso foi considerado de 2 Hz. Esse período corresponde a distância do passo de 0,75 m, para cálculo do tempo de contato é necessário dividir a distância do passo por 5, que seria $0,5/5=0,1$ s, e a carga estaria sendo aplicada a uma distância de 0,15 m. Ou seja, as cargas P1, P2,P3,P4 e P5, são aplicadas na estrutura durante um período de 0,1 s. Porém, as

cargas não são aplicadas ao mesmo tempo, a carga P1 seria aplicada por 0,1 s. Ao fim deste período de 0,1 s, a carga P1 passa a ser 0 e a carga posterior, ou seja, a carga P2 entra em ação por 0,1 s, conforme mostra a Figura 8.

FIGURA 8- Variação espacial da carga



Fonte: Autoria Própria(2017)

Para o modelo numérico analisado no presente artigo, foram realizadas análises de vibrações com o auxílio do programa computacional SAP2000. Os resultados desta análise foram adquiridos em termos de deslocamentos translacionais e verticais, e por meio de acelerações em r.m.s (*root meansquare*). Estes resultados foram aferidos e confrontados com valores limites fornecidos por normas e guias de projetos internacionais (Bachmann *et al.* (1987), ISO/DIS 10137 (2007), AISC/CISC Design Guide 11 (MURRAY *et al.* 2003), SCIPublication P354 (Smith *et al.* (2009)) e BS 6472 (1992)) e são expressos em função de uma porcentagem da aceleração da gravidade (% g); conforme afirma e recomenda Pinto (2015).

2.3.2 Descrição da Estrutura

Para o estudo a ser realizado, foi utilizado como modelo um projeto arquitetônico de uma passarela em estrutura metálica de um salão de festas, feito pelo escritório de arquitetura ArqPapa.

A estrutura é composta por uma caixa de elevador, e uma passarela, que leva os convidados até o salão de festas. Conforme demonstra a Figura 9, a Figura 10 e a Figura 11.

A estrutura é mista, composta por perfis metálicos laminados em I, aço ASTM A-572 grau 50 e a laje é de concreto Classe C-30. Perfis adotados e dimensões utilizadas para análise numérica:

Vigas: W410x53 e W310x21
Pilares: W360x39

Contraventamentos: L102x76x6.4 e W410x53

Dimensão da passarela: 22,4 m

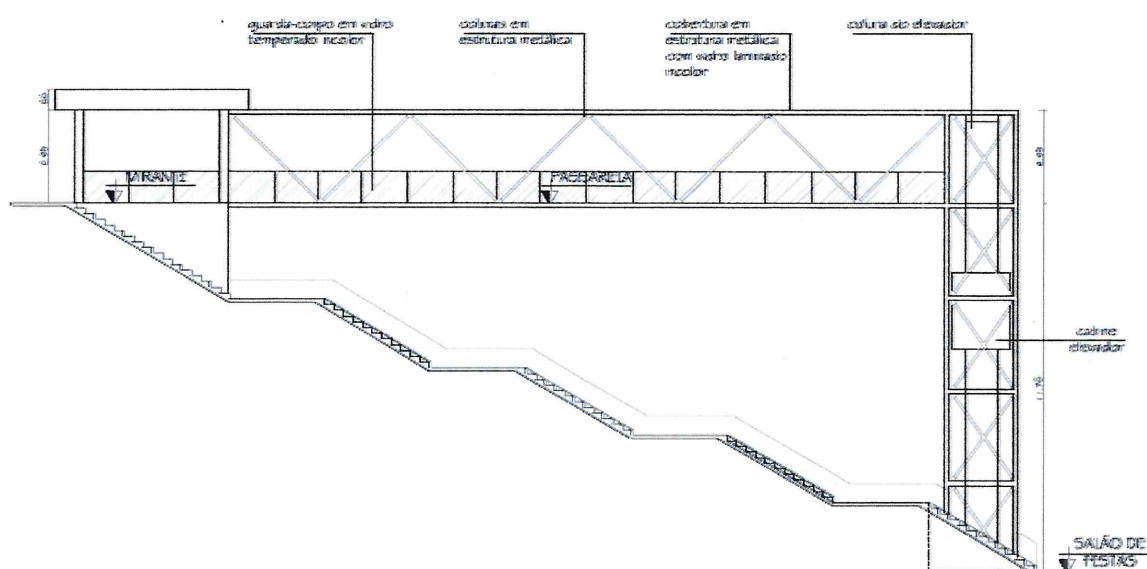
Dimensão da estrutura: 24,7 m

FIGURA 9- Maquete Eletrônica da Passarela de Festas



Fonte: Projeto Arquitetônico- ArqPaPa (2015)

FIGURA 10- Vista Lateral da passarela



Fonte: Projeto Arquitetônico- ArqPaPa(2015)

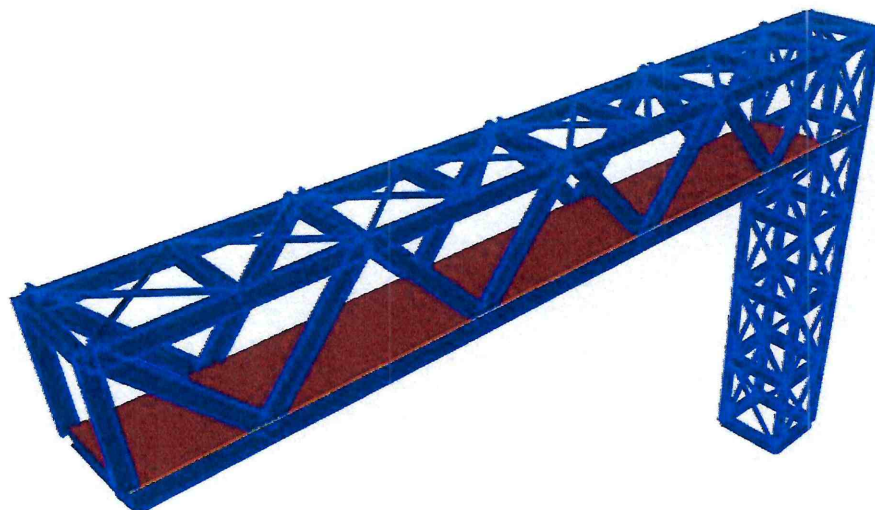


Fonte: Projeto Arquitetônico- ArqPaPa (2015)

2.3.3 Modelo Numérico

Para análise da estrutura, foi criado um modelo numérico no Programa Computacional SAP 2000, por meio de elementos finitos tridimensional como demonstra a Figura 12.

FIGURA 12- Modelo Geométrico

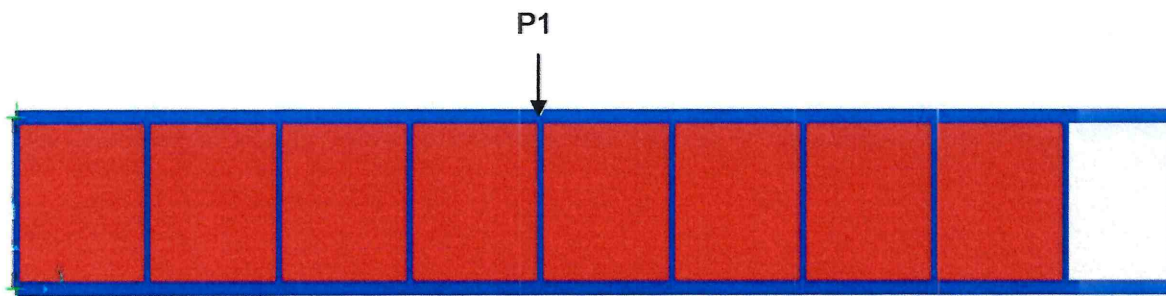


Fonte: Autoria Própria(2017)

Segundo Silva Junior (2015) a aceleração deve ser medida nos locais onde as amplitudes de deslocamento do sistema de piso são as maiores (no centro do piso). Fazendo com que se obtenha valores máximos de acelerações induzidas pelo caminhar humano.

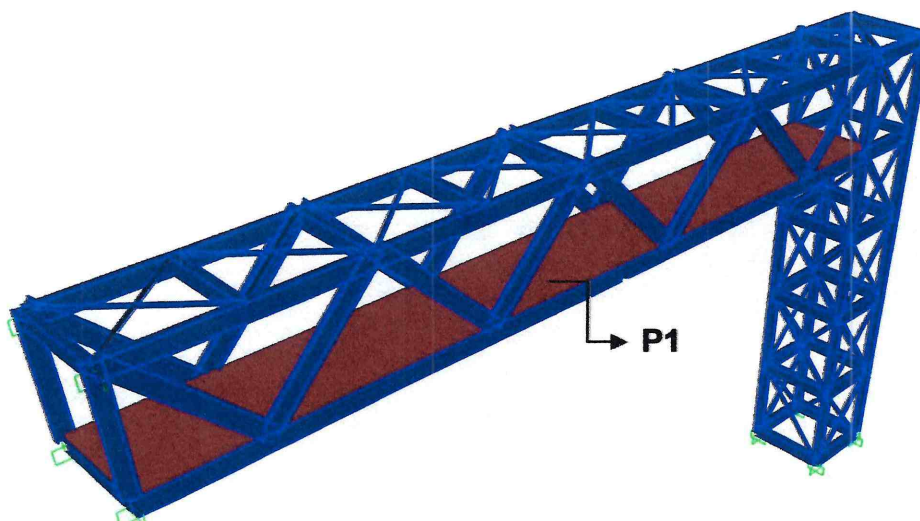
A Figura 13 e a Figura 14 demonstram o ponto escolhido para obtenção dos resultados.

FIGURA 13- Ponto P1 Passarela do Modelo Geométrico



Fonte: Autoria Própria(2017)

FIGURA 14- Ponto P1 Modelo Geométrico



Fonte: Autoria Própria (2017)

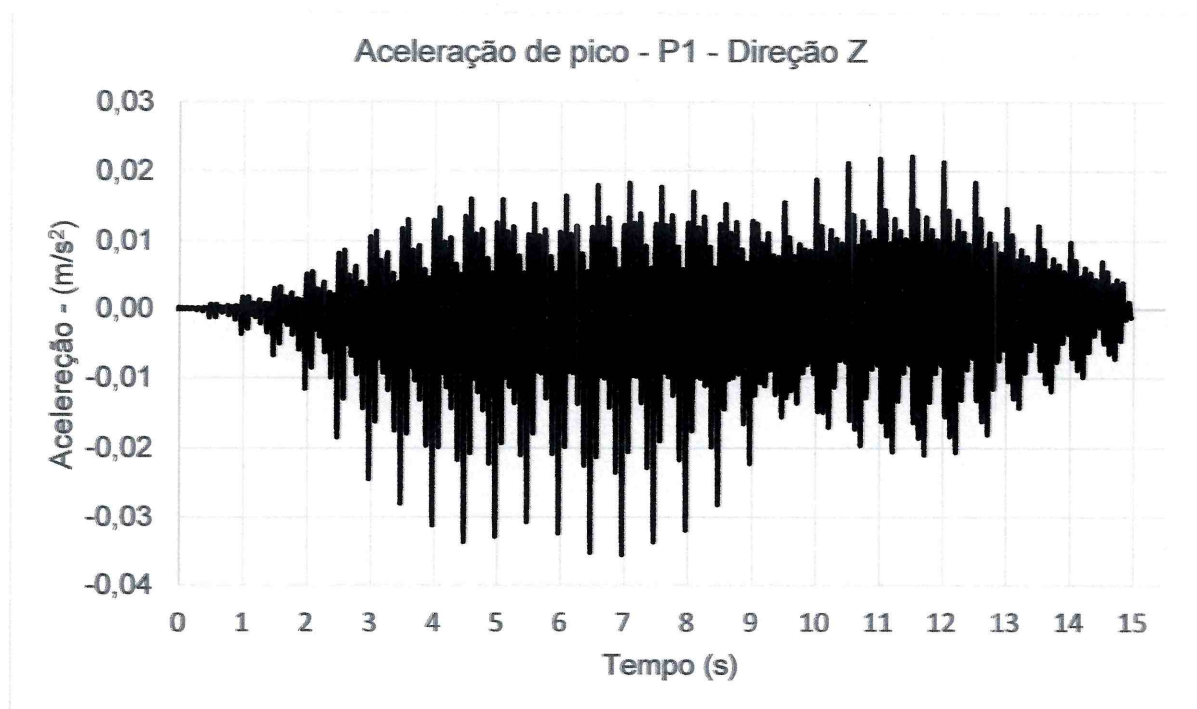
3. RESULTADOS E CONCLUSÃO

3.1 Resultados

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 demonstram a Figura 13 e a Figura 14.

A Figura 15 demonstra os resultados obtidos para a aceleração do ponto central.

FIGURA 15- Aceleração de Pico do Ponto Central

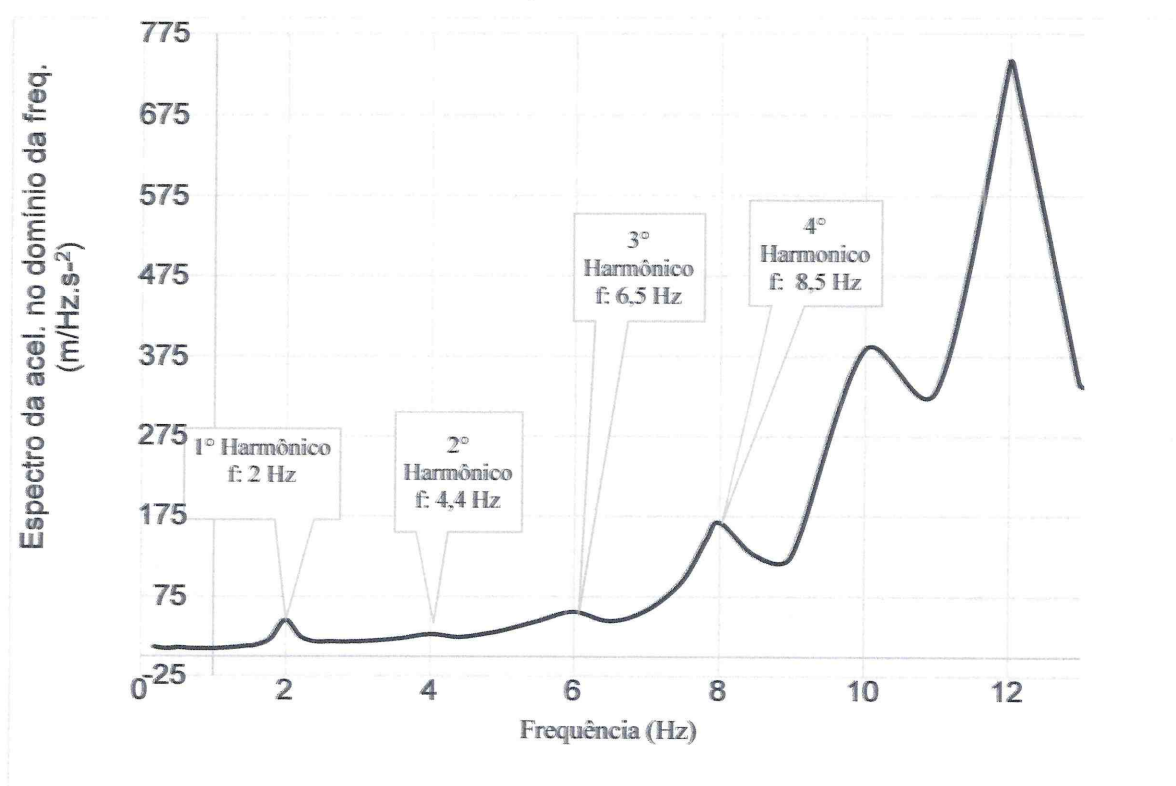


Fonte: Autoria Própria (2017)

A Figura 15 representa o caminhar humano na estrutura e a excitação que o caminhar humano apresentou na passarela, obtendo assim os picos de acelerações máximas da estrutura.

A Figura 16 apresenta o espectro da resposta da aceleração no domínio da frequência para o ponto P1. Nesta Figura 16, podemos observar que o quarto pico corresponde ao quarto harmônico da excitação produzida na estrutura pelo caminhar humano. E o seu valor de 8,5 Hz é acima do valor da frequência fundamental do sistema de piso da estrutura analisada ($f = 7,82$ Hz). O que poderá gerar vibrações e causar desconforto para os usuários.

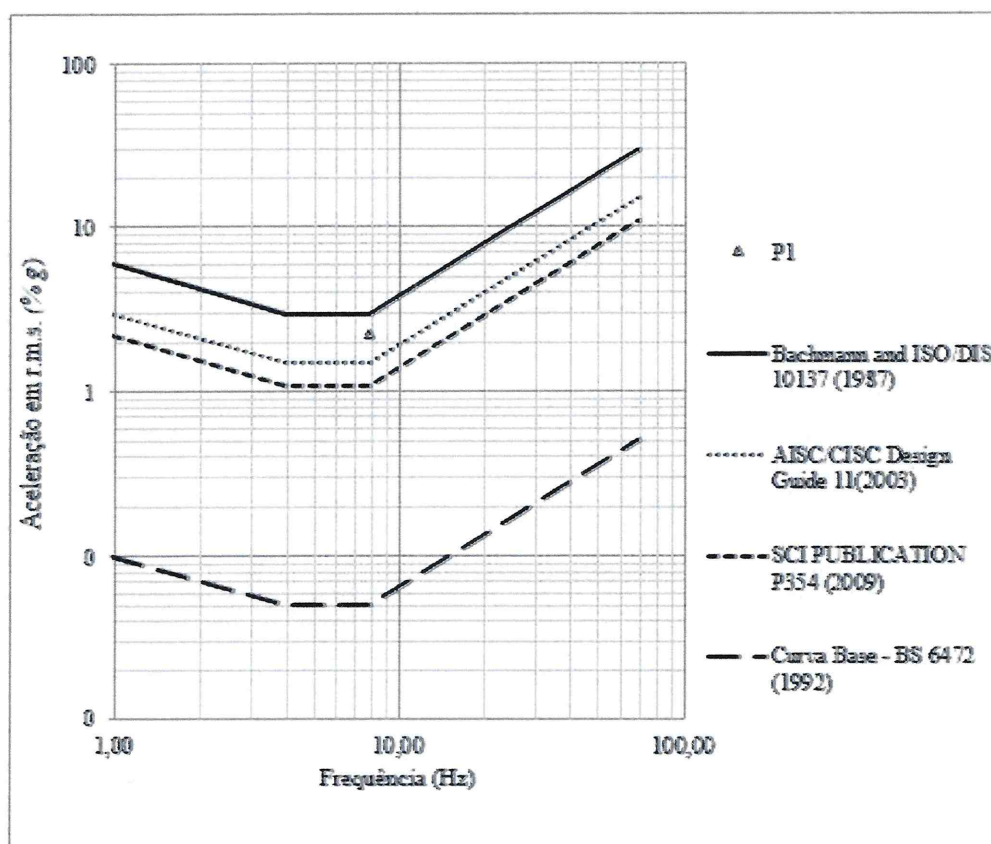
FIGURA 16 - Espectro da resposta da aceleração no domínio da frequência para o P1



Fonte: Autoria Própria (2017)

A Figura 17 demonstra os resultados da aceleração (*r.m.s*) no ponto P1, obtidos por meio da análise numérica, representados sobre curvas limites de aceleração considerando o conforto humano. Pode-se observar que a aceleração obtida está entre o limite estabelecido por Bachmanne ISO/DIS 10137, que é a curva que representa a maior tolerância às vibrações. E está acima das normas AISC/CISC DesignGuide 11 (2003), SCI PUBLICATION P354(2009), e da Curva Base- BS 6472(1992).

FIGURA 17- Resultados de acelerações (r.m.s.) obtidos por meio da análise numérica representados sobre curvas limite de aceleração considerando o conforto humano.



Fonte: Autoria Própria (2017)

3.2 Conclusão

O artigo teve por finalidade realizar a análise numérica de vibrações em uma estrutura mista de aço e concreto, avaliando o desempenho da estrutura levando-se em conta os critérios de conforto humano.

Os resultados gerados pela análise numérica foram satisfatórios, dentro do limite estabelecido pela *ISO 10137 (1987)* e acima das normas *AISC/CISC Design Guide 11 (2003)*, *SCI PUBLICATION P354 (2009)*, e da *Curva Base- BS 6472 (1992)*. Devido estar acima dos limites estabelecidos pela maioria das normas internacionais, a passarela analisada poderá gerar vibrações e causar desconforto para os usuários. Desta forma como medida de controle de vibrações excessivas sugere-se o redimensionamento da estrutura estudada utilizando-se de perfis com maior rigidez ou a utilização de sistemas de enrijecimento da estrutura.

Os resultados obtidos com o estudo das vibrações atestam a importância de se realizar o estudo de vibrações em estruturas mistas de aço e concreto durante a etapa de projeto, a fim de evitar vibrações indesejadas nas estruturas.

A análise realizada neste artigo, levou em consideração a análise numérica do caminhar normal de uma pessoa sobre a passarela, deixando como sugestão para trabalhos futuros, analisarem o caminhar de várias pessoas ao mesmo tempo sobre a passarela, ou até mesmo por se tratar de uma passarela que leva até um salão de festas, analisarem a estrutura para danças rítmicas.

4. REFERÊNCIAS

- ANUNCIAÇÃO PINTO, J.F. **Análise numérica de vibrações em sistemas de piso misto de aço e concreto e avaliação de desempenho considerando o conforto humano**. Dissertação de Mestrado. Pós Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil,,Universidade Federal de Viçosa, UFV. Viçosa, MG, Brasil. 2015.
- ARQ PAPA ARQUITETURA E URBANISMO. **Projeto Arquitetônico Residencial**. Manhuaçu. 2015.
- 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto De Estruturas De Concreto**. Rio de Janeiro. 2014.
- BACHMANN, H.; AMMANN, W. **Vibrations in Structures. Induced by Man and Machines**. Zürich: International Association for Bridge and Structural Engineering - IABSE. 1987.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 6472: Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)**. . 1992.
- 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.
- MARGARIDO, D. R. **Metodologias para a avaliação dos níveis de vibração em estruturas do ponto de vista do conforto humano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Especialização em Estruturas). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, FEUP. Porto, Portugal. 2013.
- MELLO, A. V. A. **Vibrações em Pisos de Edificações Induzidas por Atividades Humanas**. 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. 2005.
- 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

MOREIRA, B. C. **Avaliação Comparativa de Pisos de Edificações em Estrutura Metálica Quanto aos Critérios de Vibração**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, UFOP. Ouro Preto, MG, Brasil. 2004.

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.

OHLSSON, S. V. **Floor Vibration and Human Discomfort**. PhD Thesis. Chalmers University of Technology. Go'teborg, Sweden. 1982.

SAP2000 NONLINEAR VERSION 15.2. **User's Manual, version 15.2**. Inc., Berkeley, CA. 2012.

SCI PUBLICATION P354. **Design of Floors for Vibration: A New Approach**. 2009.

SILVA JUNIOR, L. A. **Análise experimental de vibrações em sistemas de piso misto de aço e concreto e avaliação de desempenho considerando o conforto humano**. Dissertação de Mestrado. Pós Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, UFV. Viçosa, MG, Brasil. 2015.

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.

VARELA, W. D. **Modelo Teórico-Experimental para análise de vibrações induzidas por pessoas caminhando sobre lajes de edificios**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2004.

ZÚÑIGA, J. E. V. **Análise da resposta dinâmica experimental de uma passarela tubular mista, aço-concreto, submetida ao caminhar humano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Engenharia, Univeridade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. Rio de Janeiro - RJ. 2011.

WYATT, T. A. **Design Guide on the Vibration of Floors, SCI Publication 076, The Steel Construction Institute and Construction Industry Research and Information Association**. London. 1989