

## ANÁLISE DA CONDIÇÃO DE CONFORTO EM RELAÇÃO À VIBRAÇÃO PARA OS PISOS USADOS NA CONSTRUÇÃO EM AÇO

**Henor Artur de Souza (1); Cristiano Caria Guimarães Pereira (2); Francisco de Assis das Neves(3); Urânia Costa S. (4)**

(1) Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas - Depto de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais – Campus Universitário, Morro do Cruzeiro, Ouro Preto/MG 35400-000 ; Tel/fax: 31- 3559.1533

e-mail:henor@em.ufop.br

(2) Engenheiro Civil – UFOP

(3) Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas - Departamento de Engenharia Civil – Campus Universitário, Morro do Cruzeiro, Ouro Preto/MG – 35400-000

e-mail: fassis@em.ufop.br

(4) Arquiteta – Mestre em Engenharia Civil – e-mail: urania@uai.com.br

### RESUMO

A ocorrência de vibrações em pisos não é um fenômeno novo, entretanto, os novos conceitos e técnicas construtivas têm tornado as edificações mais leves e esbeltas, o que leva a frequências naturais e taxas de amortecimento efetivos mais baixos, principalmente no caso de estruturas metálicas. Tal fato deixa as construções em condições de maior suscetibilidade em relação às vibrações provocadas por carregamentos dinâmicos induzidos por atividades humanas, sendo importante o cálculo das respostas em termos de amplitude de aceleração para se fazer a verificação quanto ao conforto. A reação humana aos níveis de vibração é substancialmente psicológica, dependendo parcialmente da atividade que está sendo desempenhada. Essa reação é geralmente afetada por outros estímulos, como o som. Embora o nível de vibração em pisos possa induzir algumas pessoas a uma sensação de insegurança, na maior parte dos casos, isso não significa que exista algum risco de colapso estrutural. Neste trabalho apresenta-se a avaliação de pisos industrializados quanto ao critério de desempenho vibratório por meio de simulação numérica onde os pisos são discretizados via elementos finitos utilizando o software Ansys. Os resultados obtidos são comparados com aqueles apresentados no *Design Guide on the Vibration Floors*. Com este estudo é possível se verificar se o piso atende à condição de conforto em relação à vibração.

### ABSTRACT

The occurrence of vibrations in floors is not a new phenomenon, however, the new concepts and constructive techniques have become the constructions lighter and slender, resulting in both lower natural frequencies and effective damping rates, mainly in the case of steel structures. Due to the aforementioned facts, the constructions are more susceptible to vibrations induced by human activities dynamic loads. In these situations, it is important to verify discomfort conditions by means the calculation of structural response in terms of acceleration level. The human reaction at vibration levels is substantially psychological, depending partially on the activity that is being carried out. That reaction is usually affected by other stimulus, as the sound. Although the floor vibration level induces some people to an unsafe sensation, in most of the cases, it doesn't mean that there is some risk of structural collapse. In this work, the evaluation of industrialized floors concerning to vibration criterion is presented. In the numerical simulation, the floors were modeling by finite elements using the software Ansys. The results of the computational simulation were compared with those presented in the Design Guide on the Vibration Floors. Through this study it was possible to verify the floors relating to human comfort due to vibration effects.

## 1. INTRODUÇÃO

As características dos elementos constituintes de um piso sujeito a vibrações são de grande importância no estudo da suscetibilidade dos pisos à ação de cargas de excitação. Esses elementos são os painéis de piso ou lajes, as vigas principais e as vigas intermediárias, e suas características são definidas pelas dimensões e pelo material constituinte (Figura 1).

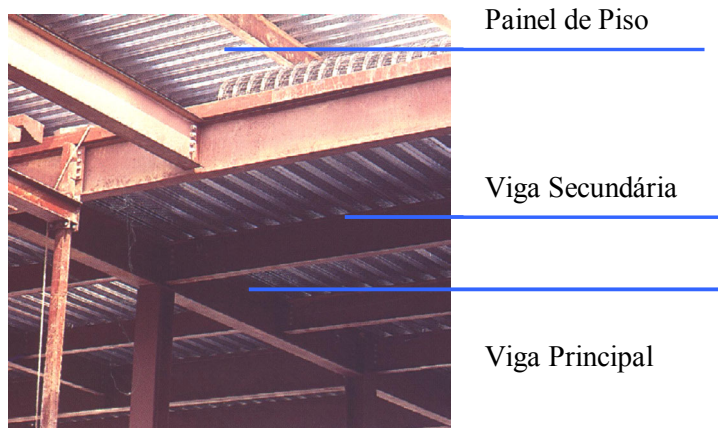


Figura 1- Elementos constituintes dos pisos. FONTE -SALES, 2001

A maior parte das estruturas é projetada adequadamente para cargas estáticas, mas existem casos onde se faz necessário levar em conta os efeitos das cargas dinâmicas. As cargas dinâmicas podem produzir níveis de vibração elevados, os quais podem tanto comprometer a segurança estrutural como causar desconforto humano. Além disso, existe uma tendência em se projetar estruturas cada vez mais esbeltas, inclusive utilizando novos materiais na construção civil. Esta tendência faz com que haja uma redução das frequências naturais das estruturas deixando-as mais suscetíveis a uma série de carregamentos dinâmicos, já que suas frequências naturais passam a ficar cada vez mais próximas das de excitação. Portanto, torna-se cada vez mais importante verificar o comportamento dinâmico das estruturas e descrever com detalhe as cargas dinâmicas que podem atuar. Desse modo é imperativo o estudo do desempenho quanto à vibração dos pisos industrializados utilizados na construção civil.

As causas de vibração em pisos são classificadas em externas e internas. Há grande diversidade de possíveis causas de excitação dinâmicas em pisos. De uma fonte para outra, ocorre variações das características importantes das excitações, de forma que processos distintos de avaliação podem ser válidos de acordo com a causa potencial mais importante. Como exemplos de fontes externas de vibração, podem ser citados o tráfego rodoviário e o ferroviário, que dependendo das condições do entorno da edificação, provocam vibrações na estrutura desta. Tal problema é geralmente tratado através do isolamento entre a fonte e o edifício, já que o objetivo é barrar a transmissão da onda vibratória.

Em relação a fontes internas de vibração, a que ocorre em maior número e também a mais importante é o tráfego de pedestres. Um pedestre caminhando regularmente aplica uma força repetida periodicamente ao piso, podendo provocar um pico em sua resposta estrutural. No dia a dia são encontradas outras tipos de excitações internas, como por exemplo um grupo de pessoas praticando ginásticas rítmicas em academias. O feito da caminhada é a forma de excitação mais comum. De uma forma aproximada, a geometria do corpo humano caminhando é um movimento organizado de pernas que provoca uma subida e uma descida da massa efetiva do corpo para cada passada (Figura 2). Esse movimento de subida e descida é de aproximadamente 50 mm, de pico a pico, mas é dependente do ângulo entre uma perna e outra completamente esticada, ou seja, ao comprimento das passadas que o pedestre está realizando em sua caminhada.

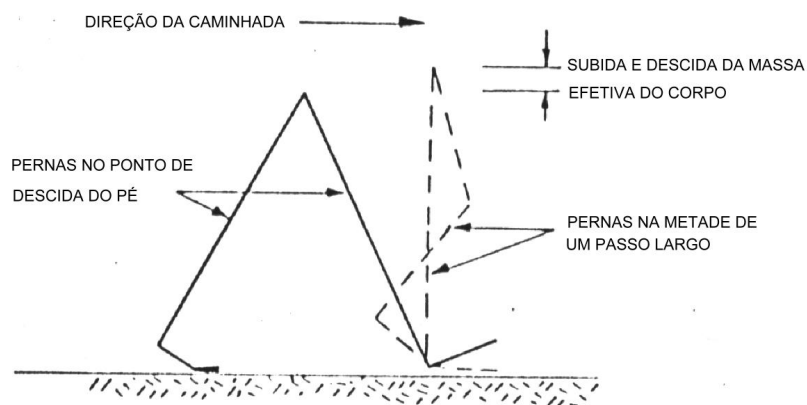


Figura 2– Geometria Simplificada de uma Passada. Fonte – OHLSSON, 1982

Segundo RAINER (1980), a aceitabilidade de pisos do ponto de vista da vibração depende de três fatores: características do piso, tipo de ação de excitação no piso e limites aceitáveis de vibração. Dessa forma, o estudo aqui realizado propõe uma avaliação vibratória através de simulação numérica. Tal avaliação leva em conta o caminhar de pedestres como fonte de excitação, as características de algumas configurações de pisos estruturados em aço e os critérios de conforto mínimo previstos em norma, para três situações estruturais hipotéticas.

## 2. REAÇÃO HUMANA À VIBRAÇÃO

A percepção humana das vibrações é de difícil caracterização, podendo ser muito sensível para baixos níveis de vibração do piso, e por outro lado, quase insensível, quando ocorrem mudanças quantitativas de forma substancial na amplitude de vibração. As grandes amplitudes de oscilação para frequências na faixa de 2 Hz a 20 Hz podem provocar deformações significativas no corpo humano, incluindo ressonância de órgãos específicos, aumentando a sensação de desconforto, prejudicando a habilidade para desenvolver tarefas mecânicas e até mesmo provocando lesões. Há também o fator subjetivo, já que as pessoas possuem percepções diferenciadas umas das outras. A reação humana aos níveis de vibração é substancialmente psicológica, dependendo parcialmente da atividade que está sendo desempenhada. Essa reação é geralmente afetada por outros estímulos, como o som. Embora o nível de vibração em pisos possa induzir algumas pessoas a uma sensação de insegurança, na maior parte dos casos, isso não significa que exista algum risco de colapso estrutural (SCI, 1989).

Os critérios apropriados para ambientes de residências e de escritórios são associados a níveis intermediários de vibração, para os quais os efeitos fisiológicos ficam em segundo plano em relação aos fatores psicológicos. A importância dos fatores psicológicos faz com que seja difícil quantificar a reação humana para estes níveis de vibração. As reações a esses níveis de vibração podem ser influenciadas por vários fatores. No limite inferior da faixa de frequência intermediária, dentro do intervalo de 2 a 20 Hz (Figura 3), a reação é fortemente ligada ao sentimento de insegurança, baseado na associação instintiva dos movimentos perceptíveis em uma estrutura sólida com uma expectativa de inadequação estrutural ou falha. Para o limite superior da faixa de frequência, a reação é fortemente ligada aos níveis de barulho associados. Dessa forma, foram realizados estudos estatísticos e de coleta de dados para se chegar a avaliações qualitativas da reação humana a vibrações e a critérios de conforto para vibrações em pisos (ISO 2631, 1985).

Como a faixa de frequência a ser verificada é grande, é comum plotar contornos mostrando a reação humana em escalas logarítmicas de frequência e amplitude de resposta. Esta resposta estrutural pode ser descrita como deslocamentos, velocidade ou aceleração (Figura 3).

Na Norma ISO 2631/1 (1985) são caracterizadas as faixas de parâmetros de conforto humano, a qual define três limites ligados à sensação humana, relacionadas ao tempo de exposição e nível de aceleração a que uma pessoa fica exposta:

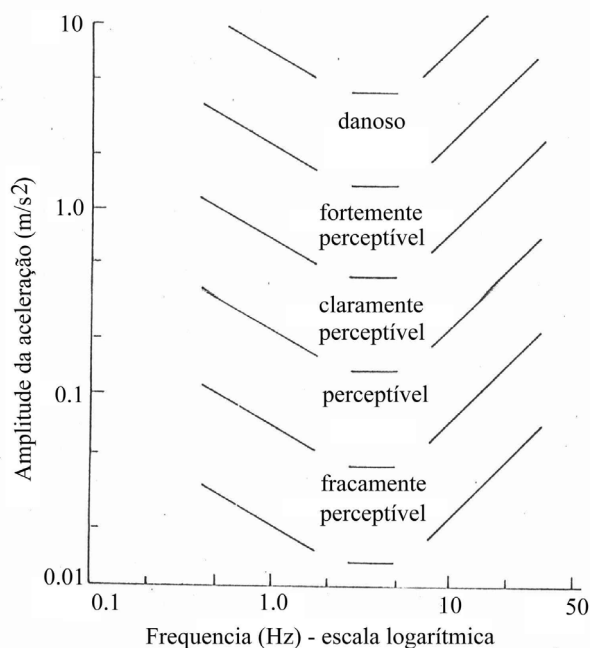


Figura.3 - Descrição qualitativa da reação humana à oscilação contínua uniforme. FONTE – OHLSSON, 1982

- Limite I – Limite do conforto reduzido – está relacionado com o nível de aceleração vertical a partir do qual as pessoas sentem-se incomodadas pela vibração, tendo mais dificuldades para executar tarefas que exigem certa concentração, tais como comer, ler e escrever.
- Limite II – Limite de queda de eficiência – define o limite além do qual a exposição prolongada à vibração pode trazer um significativo risco de queda de eficiência na atividade desenvolvida pela pessoa exposta, particularmente fadiga, quando tal exposição é demasiadamente prolongada. O limite associado à queda de eficiência é definido pela ISO 2631/1 (1985) como sendo três vezes maior que o limite associado ao conforto reduzido.
- Limite III – Limite de tolerância – é o limite em termos de valores de máximos de aceleração que uma pessoa pode ficar exposta de modo seguro, para qualquer condição de frequência, duração e direção, estimado em duas vezes superior ao limite de queda de eficiência.

### 3. METODOLOGIA ADOTADA

O estudo é feito através da análise de algumas configurações de piso utilizando-se simulação computacional (ANSYS, 2001). Nesta análise é observada a resposta dinâmico-estrutural dos pisos em função do deslocamento, velocidade ou aceleração levando-se em conta as condições de contorno, rigidez e massa dos painéis de piso utilizados.

Para se proceder à verificação de um piso de uma dada edificação quanto ao critério de conforto é necessário que se faça uma caracterização dinâmica do piso em termos de seus parâmetros modais (frequências e modos naturais e taxa de amortecimento), além da obtenção da resposta dinâmica do piso, em geral, em termos de sua aceleração. A verificação do piso quanto ao critério de conforto humano devido às vibrações impostas por atividades humanas, por exemplo, é realizada confrontando-se as acelerações obtidas como resposta do piso com aquelas limites, estabelecidas pelas Normas e Recomendações Internacionais, como por exemplo a Norma ISO 2631/1 e a 2631/2 (1985). Como as Normas apresentam os resultados em curvas que são funções da frequência de vibração da estrutura

versus um percentual da aceleração da gravidade, é importante se conhecer qual a frequência de vibração predominante da estrutura.

Assim, para se verificar um dado piso quanto ao critério de conforto, ou se faz medições experimentais se a estrutura já é existente ou se realiza simulações numéricas para caracterização do comportamento dinâmico. Para uma correta descrição do comportamento dinâmico é imprescindível se conhecer o carregamento atuante. No caso em estudo, isto corresponde à descrição do carregamento imposto por atividades humanas, como caminhar.

### 3.1 Função de Carga Descritiva de Atividades Humanas

O carregamento em função do tempo para atividades que envolvam atividades humanas, como caminhar, pular, correr e dançar, pode ser descrito através de uma série de Fourier de  $n$  harmônicos, dado pela Eq. [01] (VASCONCELOS, 1998).

$$F(t) = G_{st} + \sum_{i=1}^n G_{st} \cdot \alpha_i \cdot \text{sen}(2\pi \cdot i \cdot f_T \cdot t - \phi_i) \quad [\text{Eq.01}]$$

onde  $G_{st}$  é a densidade de carga (força por unidade de área);  $f_T$  é a frequência de excitação da força (frequência fundamental da atividade humana);  $\phi_i$  é a fase relativa da força de excitação e  $\alpha_i$  são os coeficientes da série.

No caso de pessoas caminhando sobre o piso e considerando importantes apenas os três primeiros harmônicos para a descrição da força, obtém-se para  $G_{st} = 700 \text{ N/m}^2$  (peso de uma pessoa);  $\alpha_1 = 0,4$ ;  $\alpha_2 = 0,1$ ;  $\alpha_3 = 0,1$ ;  $i = 1, 2$  e  $3$ ;  $f_T = 2 \text{ Hz}$  (adotado); faixa de frequência fundamental para pessoas caminhando entre 1,6 a 2,4 Hz e  $\phi_1 = 0$ ;  $\phi_2 = \pi/2$ ;  $\phi_3 = \pi/2$ , Eq. [02]:

$$F(t) = 70 + \left\{ \left[ 280 \cdot \text{sen}(4\pi t) \right] + \left[ 70 \cdot \text{sen}\left(8\pi t - \frac{\pi}{2}\right) \right] + \left[ 70 \cdot \text{sen}\left(12\pi t - \frac{\pi}{2}\right) \right] \right\} \quad [\text{Eq.02}]$$

## 4. RESULTADOS

Para se realizar a simulação numérica computacional via Ansys (ANSYS, 2001) em pisos, foram montadas três situações hipotéticas, nas quais os vãos escolhidos se aproximam das dimensões mais comumente encontradas no mercado (Figuras 5, 6 e 7). Todas as situações estruturais foram analisadas como laje de concreto moldada *in loco*, considerando-se uma espessura média de 10 cm, massa específica do concreto e do aço iguais a  $2500 \text{ kg/m}^3$  e  $7850 \text{ kg/m}^3$  respectivamente, módulo de Young do concreto e do aço iguais a 29 GPa e 210 GPa respectivamente e coeficiente de Poisson igual a 0,20 para ambos os materiais. A definição das dimensões dos perfis metálicos, de cada situação, foi feita a partir de um pré-dimensionamento básico e foram escolhidos os perfis mais robustos para serem usados como padrão, nos três tipos de piso (SALES et al, 2001).

Para todas as situações hipotéticas de arranjo de pisos descritas foram realizadas análises estática, modal, harmônica e transiente. A análise estática possibilitou além da comparação com aqueles obtidos por um processo simplificado de cálculo, obter a região da laje que se apresenta com os maiores deslocamentos, de modo a se monitorar a sua resposta (SALES et al, 2001).

Com o objetivo de avaliar qual o modo de vibração predominante para os pisos foi realizada uma análise harmônica a fim de se verificar a importância dos modos na resposta dinâmica da estrutura e facilitar no processo do estabelecimento das taxas de amortecimento modais para se realizar as análises transientes. Para todas as análises transientes realizadas, usou-se a função de carga descritiva de atividades humanas (Eq. 02). A realização da análise transiente visa a determinação dos deslocamentos e acelerações nodais para aqueles pontos do piso que apresentam os maiores deslocamentos estáticos.

Uma vez determinada as acelerações, em termos de valores de pico, calculam-se os valores médios quadráticos equivalentes a esses valores de pico, de forma a se usar as prescrições de Norma. Aqui, é usada a curva base apresentada na Norma ISO 2631-1/2 (1985) multiplicada por um fator de ponderação, de acordo com a utilização do piso, e como sugerido pela Norma. Os valores médios quadráticos e os valores de pico da aceleração são obtidos através da Eq. 03.

$$a_m = \frac{\Gamma \cdot a_{rms}}{\Lambda} \quad [\text{Eq. 03}]$$

onde,  $a_m$  é o pico máximo de aceleração;  $a_{rms}$  é a raiz da média quadrática e representa o valor admissível da aceleração obtida através das curvas da ISO;  $\Gamma$  é a constante que depende do caso analisado, sendo definida para cada limite com:  $\Gamma = 1/3$  – limite I;  $\Gamma = 1$  – limite II;  $\Gamma = 2$  - limite III. A constante,  $\Lambda$ , para conversão do valor RMS para o valor de pico, considerando um harmônico simples, vale (Eq. 04),

$$\Lambda = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad [\text{Eq.04}]$$

Na figura 4 apresenta-se as curvas de pico de aceleração versus frequência provocada por atividade humana. Aquelas situações em que os pontos localizam-se acima de determinada curva não são recomendados para o ambiente em questão.

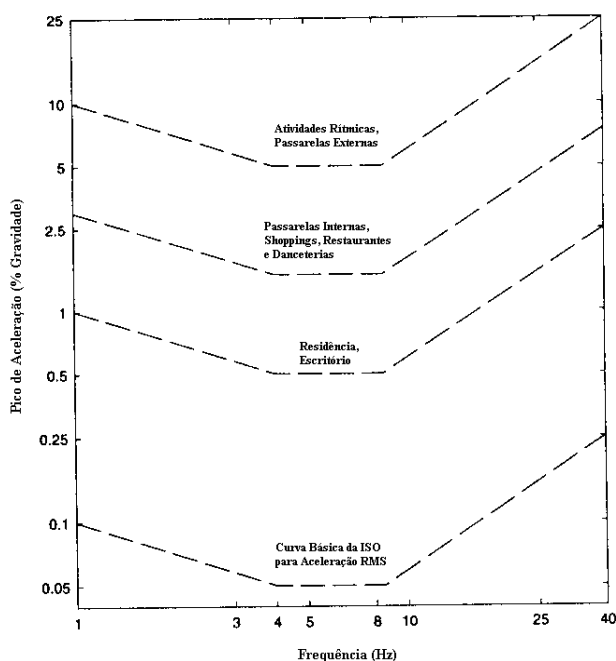


Figura 4 - Valores de pico de aceleração para verificação do conforto humano devido a vibrações geradas por atividades humanas – FONTE - ISO2631-2, 1985.

## 4.1 Configurações de pisos analisadas

### 4.1.1 Situação 01

Piso de 18,00 m x 12,00 m, espaçamento entre vigas de 3,00 m e condições de contorno como indicadas na figura 5. De acordo com pré-dimensionamento, as dimensões mínimas das vigas são: V1 – viga externa (perfil 350x38), V2 – viga externa (perfil 350x38), V3 – viga interna (perfil 400x78).

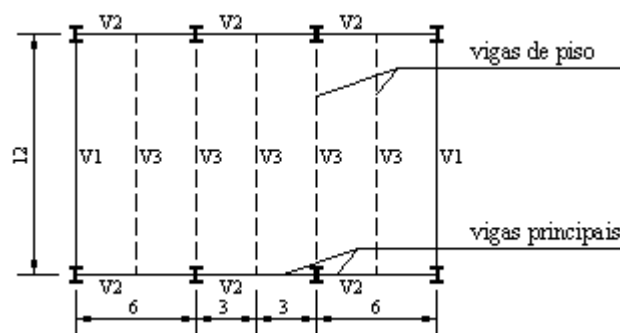


Figura 5 – Planta esquemática do vigamento de piso – situação 01 (medidas em m)

#### 4.1.2 Situação 02

A situação 02 apresenta-se como piso de 36,00 m x 12,00 m, espaçamento entre vigas de 3,00 m e condições de contorno como indicadas na figura 6. De acordo com pré-dimensionamento, as dimensões mínimas das vigas são: V1 – viga externa (perfil 350x38), V2 – viga externa (perfil 500x97), V3 – viga interna (perfil 500x86).

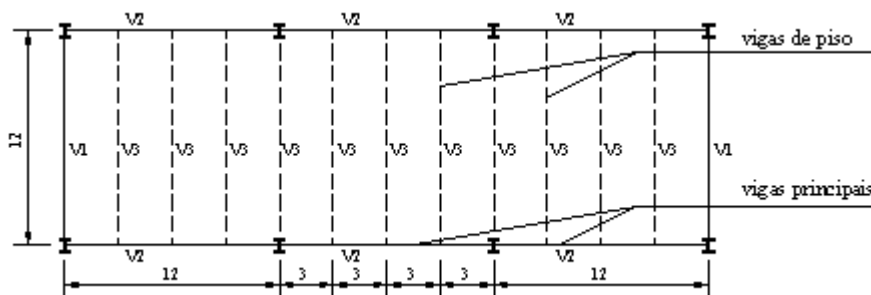


Figura 6 - Planta esquemática do vigamento de piso (medidas em m)

#### 4.1.3 Situação 03

A situação 03 apresenta-se como piso de 24,00 m x 12,00 m, espaçamento entre vigas de 3,00 m e condições de contorno como indicadas na figura 7. De acordo com pré-dimensionamento, as dimensões mínimas das vigas são: V1 – viga externa (perfil 200x19), V2 – viga externa (perfil 400x68), V3 – viga interna (perfil 250x27), V4 – viga interna (perfil 550x100).

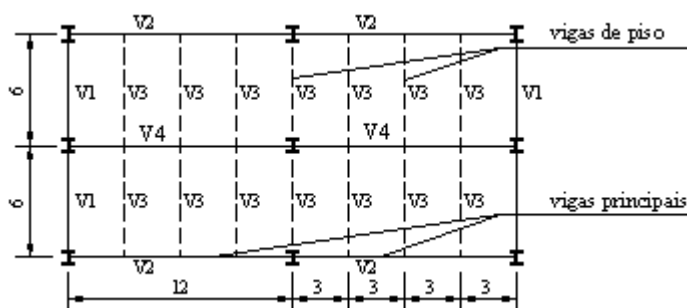


Figura 7- Planta esquemática do vigamento de piso (medidas em m)

### 4.2 Análise dos Resultados

Na Tabela 1 apresenta-se os valores das acelerações obtidos para as três situações de pisos analisadas, aplicando-se uma carga de excitação dada pela Eq. [02] e considerando uma frequência de oscilação em torno de 2 Hz. O valor da aceleração RMS, é obtido através das Eqs. [03] e [04].

**Tabela 1 – Valores das acelerações para as configurações de pisos analisadas.**

<b>Aceleração (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Situação 01</b>	<b>Situação 02</b>	<b>Situação 03</b>
$a_{m\acute{a}x}$	$4,75 \times 10^{-2}$	$5,48 \times 10^{-2}$	$2,03 \times 10^{-2}$
$a_{RMS}$ (Limite I)	$1,01 \times 10^{-1}$	$1,16 \times 10^{-1}$	$4,31 \times 10^{-2}$
$a_{RMS}$ (Limite II)	$3,36 \times 10^{-2}$	$3,87 \times 10^{-2}$	$1,44 \times 10^{-2}$

Confrontando-se os valores da Tabela 1 com os as curvas mostradas na figura 4 tem-se que o piso da situação 01 está adequado para o uso como residência e escritório apenas para o Limite II para a carga de excitação em questão. Da mesma forma o piso da situação 02 está adequado para o uso como residência e escritório apenas para o Limite II para a carga de excitação aplicada. Já o piso da situação 3 está adequado para o uso como residência e escritório para a carga de excitação em questão tanto para o Limite I como para o Limite II.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos, para o comportamento vibratório dos pisos, via simulação numérica, mostraram-se coerentes quando comparados com aqueles apresentados pela Norma. Isto comprova que este procedimento de cálculo é uma boa ferramenta para verificação da condição de conforto de pisos em relação à vibração já na fase de pré-projeto.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS 6.0 (2001) User's Manual, version 6.0, SAS IP Inc., Canonburg, PA.

ISO 2631 (1985) Guide to the Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration, *International Standards Organization*. 1985.

OHLSSON, S. U. (1982) *Floor Vibrations and Human Discomfort*, Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

RAINER, J. H., PERNICA, G., ALLEN, D. E. (1988) Dynamic Loading and Response of Footbridges. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 15: p. 66-71, feb, 1988.

SALES, U. C. (2001) Mapeamento dos problemas gerados na associação entre sistemas de vedação e estrutura metálica e caracterização acústica e vibratória de painéis de vedação. Ouro Preto, 249p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Construção Metálica) - Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

SALES, U.C., SOUZA, H.A., NEVES, F. A.(2001) Avaliação Comparativa do Desempenho Vibratório de Pisos Pré-fabricados para Construção Metálica. In: IV SEMINÁRIO INTERNACIONAL – O USO DE ESTRUTURAS METÁLICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL E I CONGRESSO INTERNACIONAL DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, São Paulo. *Anais eletrônicos*. SME/MG.

SCI (1989) Design Guide on the Vibration Floors. *the steel construction institute*, SCI-P-0761989, 43p., London.

VASCONCELOS, R. P. (1998) Atenuações de Vibrações em Lajes Nervuradas de Piso em Concreto Armado. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.