



Vibrações em Pavimentos

Documento Base



Schlaich Bergemann
und Partner

Structural Consulting
Engineers

Background_Floors_EN01.doc – 29.10.2008

Índice geral

1.1.	Acções	4
1.2.	Percepção e classes de percepção	4
1.3.	Avaliação da resposta	6
2.1.	Introdução.....	7
2.2.	Método da função de transferência	8
2.1.	Valor eficaz da resposta devida ao andamento de um peão.....	9
2.1.1.	Acção do peão normalizada.....	9
2.1.2.	Ponderação.....	10
2.2.	Determinação do valor OS-RMS ₉₀	11
2.3.	Método de cálculo manual	12
3.1.	Sobreposição modal.....	12
3.1.1.	Resposta ressonante	13
3.1.2.	Resposta transitória	13
3.1.3.	Factores de ponderação.....	13
3.1.4.	Mapas da resposta vibratória	13
3.1.5.	Procedimento detalhado	14
3.2.	Outras considerações relativas a vibrações	14
3.3.	Método simplificado	15
4.1.	Aumento da massa modal	16
4.2.	Ajuste da frequência	16
4.3.	Aumento de amortecimento	16
4.4.	Alterações da concepção estrutural	16
4.5.	Medidas correctivas	17

Resumo

Este documento serve de suporte ao documento: "Vibrações em Pavimentos - Recomendações Técnicas de Projecto", fornecendo um conjunto de métodos gerais alternativos para a determinação da resposta de pavimentos aos efeitos dinâmicos das acções humanas.

Os métodos teóricos aqui apresentados, bem como nas Recomendações Técnicas, foram elaborados/ estudados no quadro do projecto de investigação VOF: "Vibration of Floors" suportado financeiramente pelo Research Fund for Coal and Steel (RFCS).

Os documentos "Vibrações em Pavimentos- Recomendações Técnicas" e "Vibrações em Pavimentos- Documento Base" foram preparados no âmbito do projecto de disseminação RFS-P2-06133, HIVOSS- "Human Induced Vibrations of Steel Structures".

1. Considerações de projecto

1.1. Acções

A massa presente na estrutura tem um efeito muito significativo na frequência de vibração do pavimento e na amplitude das vibrações correspondentes. É assim importante que a massa distribuída usada na análise de vibrações seja representativa da massa presente em condições de serviço, sendo que a adopção de uma massa superior conduzirá a uma menor amplitude das vibrações para uma dada frequência. Para efeito de projecto, a massa por unidade de área a utilizar deve ser obtida a partir do peso próprio não majorado da estrutura, adicionado das restantes acções permanentes, como as correspondentes ao peso de tectos e equipamentos técnicos. Além disso, sempre que haja segurança relativamente à sua presença na estrutura no final da construção, deverão considerar-se adicionalmente as acções de carácter semi-permanente. Em geral, recomenda-se que estas não excedam 10% das acções permanentes nominais. A massa das pessoas presentes sobre o pavimento não é habitualmente incluída de forma explícita. No caso de estruturas muito leves, esta massa adicional é muito significativa e poderá ser considerada.

1.2. Percepção e classes de percepção

De maneira semelhante à audição, a percepção humana às vibrações varia segundo a sua frequência: o ouvido não consegue detectar sons de frequência baixa ou elevada e, da mesma forma, o corpo humano não é sensível a frequências de vibração muito elevadas. Na definição de medidas de atenuação da resposta, utilizam-se então factores de ponderação variáveis com a frequência das vibrações. O nível de percepção da vibração depende também da direcção de incidência relativamente ao corpo humano, utilizando-se por essa razão um sistema de coordenadas de acordo com o ilustrado na Figura 1-1 (o eixo z corresponde à direcção da coluna vertebral humana). O limite de percepção (nível de vibração abaixo do qual o ser humano médio não tem percepção de movimento) é mais elevado na direcção do eixo z do que na direcção x ou y, indicando que são mais perceptíveis vibrações segundo os eixos x ou y.

Valores da ponderação em frequência dos limites de vibração são apresentados em normas, como as ISO 10137[4]. Diversas curvas são apresentadas, dependendo da direcção da vibração e do tipo de actividade.

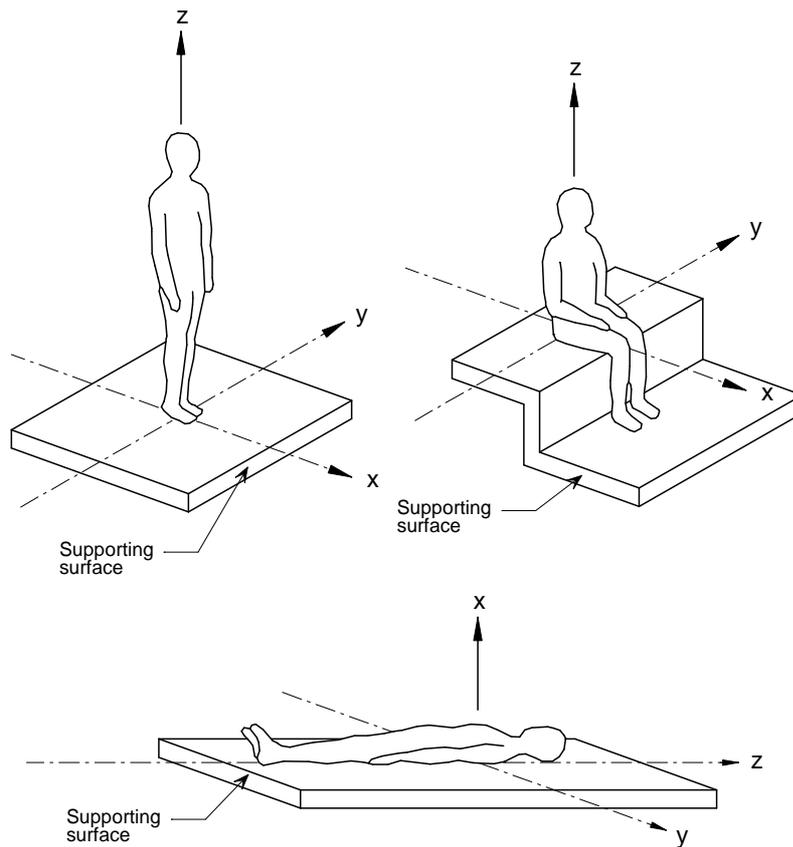
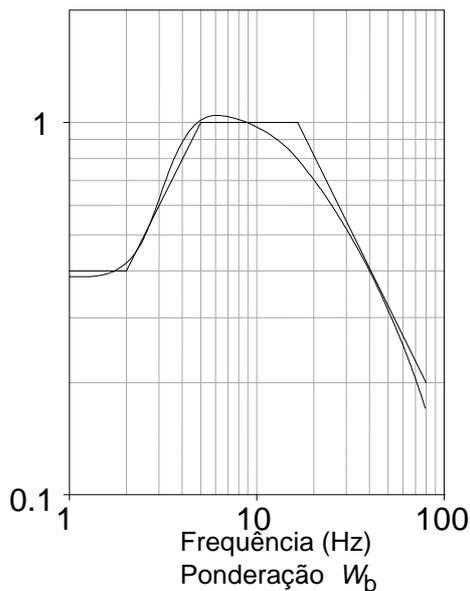


Figura 1-1: Direcções de vibração definidas na norma ISO 10137

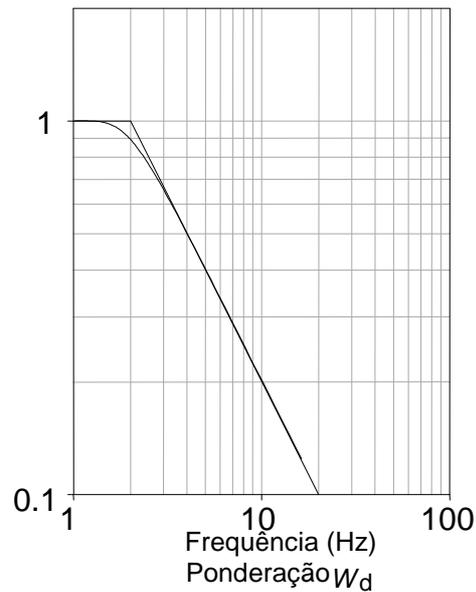
As curvas de ponderação em frequência são também específicas do parâmetro considerado - velocidade ou aceleração. Na maior parte dos casos, o objectivo da análise de vibrações é o de reduzir ou eliminar o desconforto. No entanto, em circunstâncias especiais, como é o caso dos blocos operatórios, o nível de vibrações deve ser de tal ordem baixo, que não seja perceptível e que não afecte a estabilidade da mão ou da visão. A percepção e o desconforto são limitados através dos mesmos factores de ponderação, embora tipicamente se associem à percepção limites de tolerabilidade inferiores (o que significa que uma pessoa pode ter a percepção da existência de vibrações sem que sinta incomodidade), enquanto que diferentes curvas de ponderação são utilizadas na avaliação do controlo exercido pela mão ou pela visão. As curvas de ponderação para a percepção segundo o eixo dos z (W_b) e dos y (W_d) são apresentadas na Figura 1-2.

De forma a ilustrar a utilização destas curvas, refere-se que, de acordo com a curva W_b para a vibração segundo o eixo dos z , uma sinusóide com uma frequência de 8Hz causa o mesmo nível de incomodidade que uma sinusóide de frequência 2.5Hz ou 32Hz de amplitude dupla.

Factor de ponderação

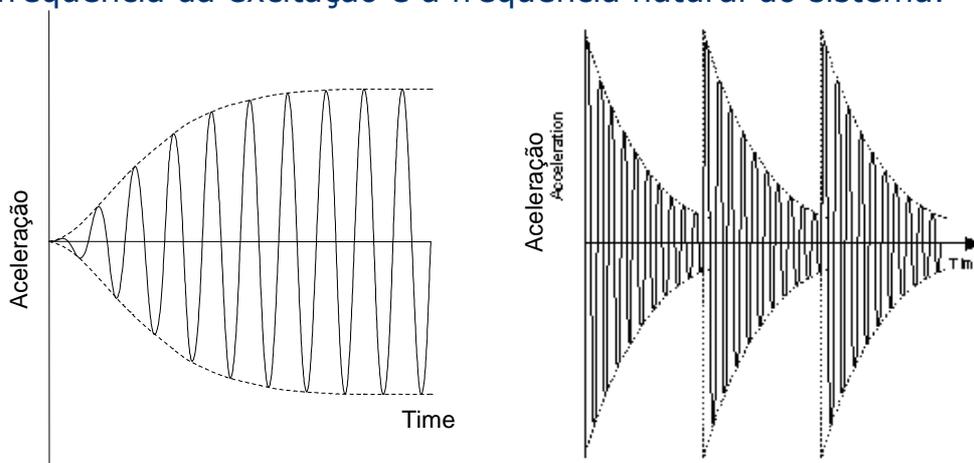


Factor de ponderação

**Figura 1-2: Curvas W_b e W_d de ponderação em frequência da aceleração**

1.3. Avaliação da resposta

A resposta de um sistema à excitação contínua por peões assume uma das formas apresentadas na Figura 1-3, dependendo da proximidade entre a frequência da excitação e a frequência natural do sistema.

**Figura 1-3: Envolventes da resposta**

Quando a frequência da excitação (ou de um dos seus harmónicos de ordem mais elevada) é próxima da frequência natural do pavimento, a resposta resultante tem uma variação do tipo da apresentada no gráfico da esquerda da Figura 1-3 – caracterizada por um aumento gradual da envolvente desde zero até um valor constante, sendo designada alternativamente por resposta ressonante ou resposta estacionária. Tendo em consideração a excitação gerada pela actividade humana na deslocação sobre pavimentos, este tipo

de resposta ocorre gradualmente para pavimentos com frequências naturais inferiores a 9-10Hz.

Quando a frequência de excitação é substancialmente inferior à frequência natural do pavimento, a envolvente da resposta típica é a mostrada no gráfico da direita da Figura 1-3, com características transitórias. Neste caso, o pavimento tem uma resposta semelhante à originada pela aplicação de uma série de impulsos, em que a vibração devida a uma passada é atenuada antes da passada seguinte. Estes dois tipos de excitação podem ser observados nos gráficos OS-RMS₉₀, já que as linhas de contorno associadas a valores constantes da resposta tornam-se menos dependentes da frequência do pavimento quando esta sobe acima de 9Hz, mostrando que a resposta deixa de ser ressonante para adquirir características transitórias.

2. Método OS-RMS

2.1. Introdução

O método do valor eficaz da resposta do pavimento sob acção de um peão (OS-RMS) baseia-se nos resultados de um projecto de investigação sobre vibrações em pavimentos financiado pelo ECSC [1]. Apresenta-se neste capítulo uma breve descrição deste método, que constitui a base do procedimento de verificação de projecto proposto.

O valor OS-RMS representa a resposta de um pavimento à excitação induzida por um peão quando se desloca. Este valor é obtido a partir da resposta medida ou simulada, tendo por base as características do pavimento e de uma função de carga tipo correspondente à acção aplicada por um peão com um peso determinado e uma frequência de passada dada.

No cálculo do valor OS-RMS, os pontos de excitação e resposta não têm necessariamente de coincidir. Além disso, assume-se que o ponto de excitação se mantém fixo, ou seja, não é tido em consideração o percurso efectuado pelo peão. Em geral escolhem-se como pontos de excitação e resposta aqueles onde se esperam maiores níveis de vibração (em pavimentos correntes, são normalmente pontos situados a meio vão).

Na verificação de projecto, é necessário calcular o percentil 90% dos valores OS-RMS associados a pessoas com diferentes pesos e velocidades de andamento (ou frequências da passada). Esta quantidade é designada por valor OS-RMS₉₀, devendo ser verificada tendo por base os limites indicados na Tabela 1 das Recomendações Técnicas.

Fixando o peso do peão e a frequência da passada, o valor da resposta OS-RMS pode ser obtido por um dos seguintes três métodos:

1. Método de cálculo manual

2. Método da função de transferência utilizando valores medidos
3. Método da função de transferência utilizando uma análise do pavimento por elementos finitos

O método de cálculo manual é o método proposto nas Recomendações Técnicas, aplicando-se a pavimentos que podem ser facilmente descritos através de sistemas amortecidos de um grau de liberdade. Na base deste método, está o método da função de transferência. O relacionamento entre os três métodos no âmbito da verificação de um pavimento às vibrações através da determinação do valor OS-RMS encontra-se esquematicamente apresentado na Figura 2-1.

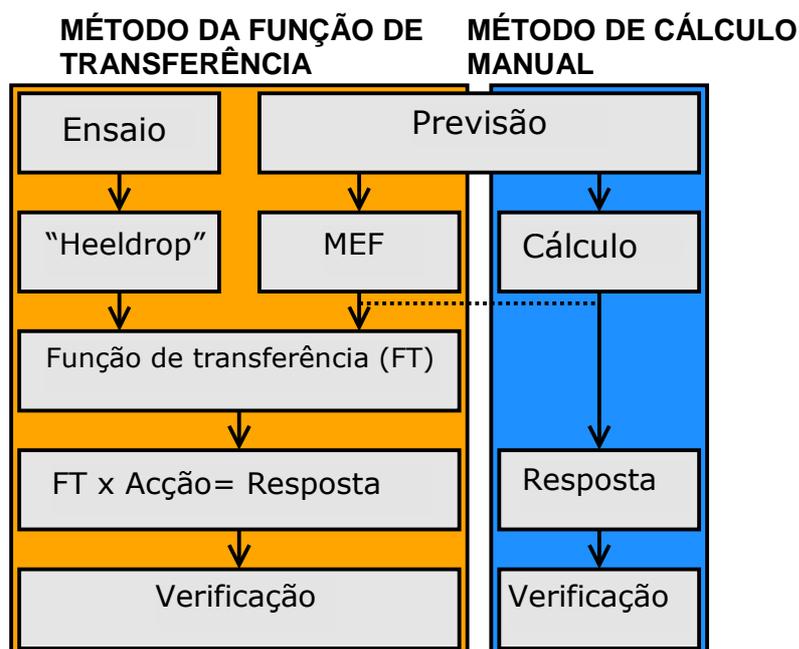


Figura 2-1: Esquema simplificado do procedimento de verificação às vibrações baseado no método OS-RMS.

2.2. Método da função de transferência

Neste método, as características do pavimento são descritas através de uma função de resposta em frequência, FRF, também designada por função de transferência. A função de transferência representa a resposta de uma estrutura quando sujeita a uma acção harmónica (função de carga com variação temporal sinusoidal) com uma dada frequência e com amplitude unitária. Combinando esta função com a acção correspondente ao andamento padrão, pode determinar-se o valor OS-RMS.

O método da função de transferência pode ser aplicado quando a resposta do pavimento é obtida experimentalmente, ou através de uma modelação por elementos finitos.

A utilização deste método implica que o cálculo da resposta do pavimento seja efectuado no domínio da frequência.

Alternativamente, quando se realiza um cálculo através de elementos finitos, a resposta pode ser obtida no domínio do tempo. Este processo é mais exigente em termos de tempo de cálculo, porquanto a determinação do valor OS-RMS₉₀ exige a realização de um grande número de cálculos.

2.1. Valor eficaz da resposta devida ao andamento de um peão

O valor OS-RMS é obtido da resposta do pavimento a uma acção padrão caracterizadora do andamento do peão. É definido como a raiz quadrada do valor quadrático médio dos máximos da velocidade ponderados num determinado intervalo de tempo num ponto do pavimento (ver Figura 2-2). O intervalo de tempo é escolhido tendo por limites temporais as abcissas correspondentes ao valor máximo da resposta e ao valor de pico seguinte ou anterior (ver Figura 2-2).

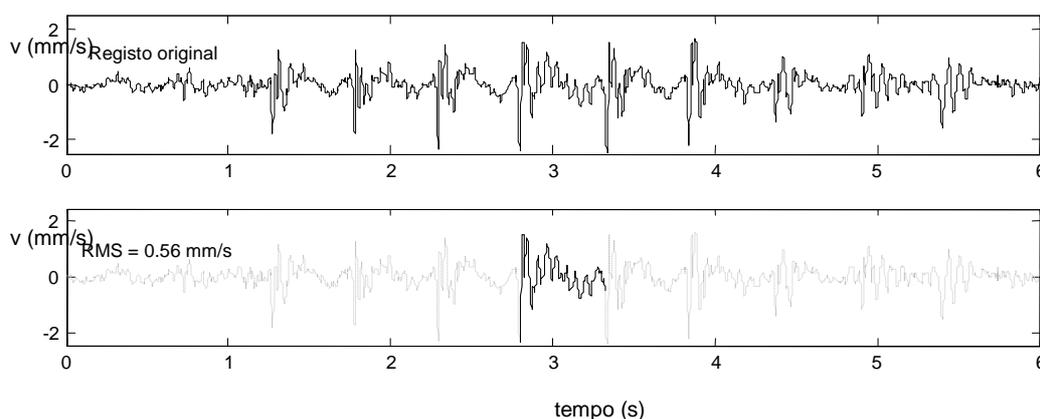


Figura 2-2: Selecção do intervalo de tempo correspondente à resposta ponderada em velocidade para determinação do valor OS-RMS.

Esta definição equivale a determinar o valor OS-RMS num intervalo de tempo correspondente à duração de uma passada, o que assegura uma medida consistente do nível de vibração¹.

2.1.1. Acção do peão normalizada

A acção do peão normalizada correspondente ao andamento é obtida a partir de uma série de passadas consecutivas, sendo a força aplicada em cada passada (no contacto com o solo) descrita através de um polinómio. A força normalizada associada a uma passada é dada por:

$$\frac{F(t)}{G} = K_1 t + K_2 t^2 + K_3 t^3 + K_4 t^4 + K_5 t^5 + K_6 t^6 + K_7 t^7 + K_8 t^8$$

¹ Os valores OS-RMS definidos desta forma podem ser comparados entre si sem ambiguidade. Se, pelo contrário, fosse adoptado um intervalo de tempo constante superior à duração de uma passada, então o valor rms determinado neste intervalo dependeria da frequência da passada e da duração do intervalo do tempo.

em que G representa a massa do peão. Os coeficientes K_1 a K_8 dependem da frequência da passada (f_s) e são dados na Tabela 2-1. A duração da força, t_s , é dada pela seguinte fórmula:

$$t_s = 2.6606 - 1.757 \cdot f_s + 0.3844 \cdot f_s^2$$

Para $t > t_s$, $F(t) = 0$.

Tabela 2-1: Coeficientes K_1 a K_8 em função da frequência da passada (f_s)

	$f_s \leq 1.75$	$1.75 < f_s < 2$	$f_s \geq 2$
K_1	$-8 \times f_s + 38$	$24 \times f_s - 18$	$75 \times f_s - 120.4$
K_2	$376 \times f_s - 844$	$-404 \times f_s + 521$	$-1720 \times f_s + 3153$
K_3	$-2804 \times f_s + 6025$	$4224 \times f_s - 6274$	$17055 \times f_s - 31936$
K_4	$6308 \times f_s - 16573$	$-29144 \times f_s + 45468$	$-94265 \times f_s + 175710$
K_5	$1732 \times f_s + 13619$	$109976 \times f_s - 175808$	$298940 \times f_s - 553736$
K_6	$-24648 \times f_s + 16045$	$-217424 \times f_s + 353403$	$-529390 \times f_s + 977335$
K_7	$31836 \times f_s - 33614$	$212776 \times f_s - 350259$	$481665 \times f_s - 888037$
K_8	$-12948 \times f_s + 15532$	$-81572 \times f_s + 135624$	$-174265 \times f_s + 321008$

A força de andamento padrão é construída a partir da força devida a uma passada acima definida, adicionada repetidamente em intervalos de duração iguais a $1/f_s$. Exemplos da força padrão associada a uma passada para diferentes frequências e da função de carga padrão são apresentados na Figura 2-3.

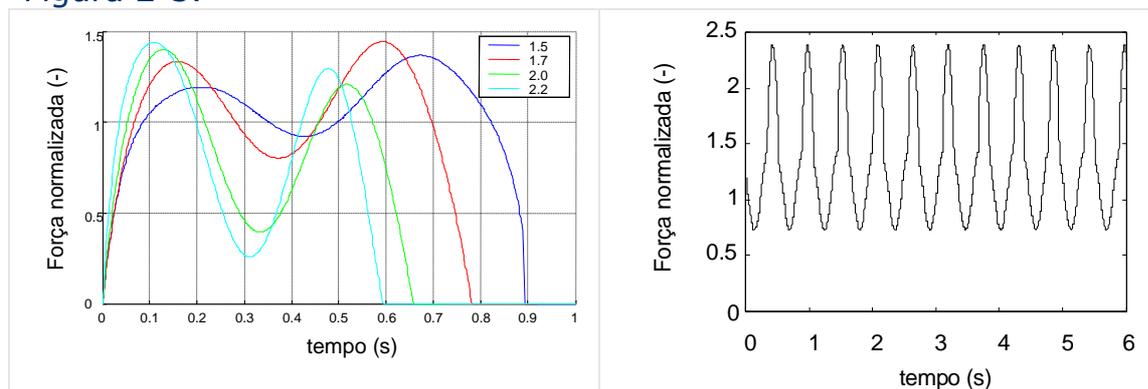


Figura 2-3: Força aplicada em correspondência com uma passada para diferentes frequências (esquerda) e exemplo de função de carga para o andamento (direita).

2.1.2. Ponderação

O valor OS-RMS é avaliado a partir da resposta ponderada expressa em termos de velocidade determinada num ponto do pavimento. A resposta ponderada é obtida aplicando a seguinte função de ponderação:

$$|H(f)| = \frac{1}{v_0 \sqrt{1 + (f_0/f)^2}}$$

em que $f_0 = 5.6$ Hz e v_0 é a velocidade de referência igual a 1.0 mm/s. A divisão pela velocidade de referência torna a resposta ponderada adimensional.

2.2. Determinação do valor OS-RMS₉₀

Conforme referido anteriormente, a verificação final de dimensionamento é baseada no valor OS-RMS₉₀. Este valor é obtido calculando o valor OS-RMS para todas as combinações possíveis de pesos de peões e frequências de passada definidos na Tabela 2-2. De acordo com esta tabela, é necessário calcular um total de 35x20=700 valores OS-RMS, correspondentes a cada combinação possível. A partir da frequência relativa (probabilidade) de cada combinação, obtém-se a frequência acumulada do valor OS-RMS. O valor OS-RMS correspondente a uma frequência acumulada de 90% define o valor OS-RMS₉₀ procurado².

Tabela 2-2: Função distribuição de probabilidade para a frequência da passada e a massa de peões

Probabilidade acumulada	Frequência da passada f_s (Hz)	Probabilidade acumulada	Massa (kg)
0.0003	1.64	0.0000	30
0.0035	1.68	0.0002	35
0.0164	1.72	0.0011	40
0.0474	1.76	0.0043	45
0.1016	1.80	0.0146	50
0.1776	1.84	0.0407	55
0.2691	1.88	0.0950	60
0.3679	1.92	0.1882	65
0.4663	1.96	0.3210	70
0.5585	2.00	0.4797	75
0.6410	2.04	0.6402	80
0.7122	2.08	0.7786	85
0.7719	2.12	0.8804	90
0.8209	2.16	0.9440	95
0.8604	2.20	0.9776	100
0.8919	2.24	0.9924	105
0.9167	2.28	0.9978	110
0.9360	2.32	0.9995	115
0.9510	2.36	0.9999	120
0.9625	2.40	1.0000	125
0.9714	2.44		
0.9782	2.48		
0.9834	2.52		
0.9873	2.56		
0.9903	2.60		
0.9926	2.64		
0.9944	2.68		
0.9957	2.72		
0.9967	2.76		
0.9975	2.80		
0.9981	2.84		
0.9985	2.88		
0.9988	2.92		
0.9991	2.96		
0.9993	3.00		

² Com efeito, o valor OS-RMS é definido como uma variável aleatória, procurando-se o valor correspondente ao percentil 90%.

2.3. Método de cálculo manual

Neste método assume-se que a estrutura é idealizada como um sistema de um grau de liberdade, que facilmente se pode modelar através de uma massa, uma mola e um amortecedor. Os valores OS-RMS₉₀ correspondentes a várias combinações de massas do pavimento, rigidez e amortecimento foram anteriormente obtidos e encontram-se sistematizados nos gráficos apresentados nas Recomendações Técnicas.

Neste caso é então suficiente determinar as características modais do pavimento (massa, rigidez e amortecimento) para a estrutura em estudo, retirando-se então os valores OS-RMS₉₀ desses gráficos.

3. Métodos de análise alternativos

3.1. Sobreposição modal

Alternativamente à aproximação probabilística baseada na função de transferência dada pelo método OS-RMS, podem igualmente utilizar-se técnicas de sobreposição modal na determinação da resposta de um pavimento às vibrações induzidas pela acção humana. Estas vibrações podem ser causadas pelo andamento ou por outras actividades mais intensas, como a aeróbica ou a dança. Nesta aproximação o pavimento é modelado através de um programa de elementos finitos, com base no qual são calculadas as frequências naturais, as massas modais e os modos de vibração.

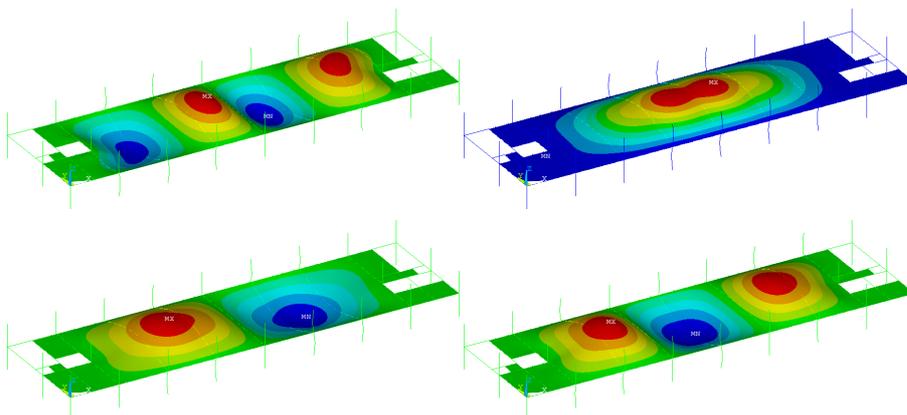


Figura 3-1: Modos de vibração de um pavimento típico

Conhecidos os modos de vibração, determina-se a resposta do pavimento, expressa em termos de acelerações. As acções são caracterizadas através da decomposição em série de Fourier das forças de excitação devidas ao peão. Utilizando os coeficientes da decomposição em série de Fourier, deixa de ser necessário analisar a variabilidade da frequência de passada e da massa do peão, obtendo-se um valor de cálculo da aceleração do pavimento pela

simples análise da resposta do pavimento à excitação com a frequência da passada mais desfavorável.

As acelerações são calculadas de dois modos diferentes, dependendo de ser esperada uma resposta ressonante ou transitória.

3.1.1. Resposta ressonante

No caso da resposta ressonante, as acelerações são calculadas através de uma análise dinâmica simples, em que a aceleração associada a cada modo de vibração devida a cada harmónico da excitação é igual ao cociente entre a força aplicada e a massa modal, multiplicado por um factor amplificação dinâmica (FAD). Este FAD tem em consideração a quantidade de amortecimento presente na estrutura e o cociente entre a frequência da passada (ou harmónico em estudo) e a frequência modal. No pior dos casos, o harmónico da frequência da passada iguala a frequência modal e o FAD é igual a $1/2\zeta$, em que ζ é o coeficiente de amortecimento. Em pavimentos correntes $\zeta = 3\%$, pelo que o factor de amplificação é igual a 17. O cálculo tem também em consideração a amplitude do modo de vibração nos pontos considerados para aplicação da força e cálculo da resposta (que podem ou não ser coincidentes). Isto significa que o efeito dinâmico associado a todos os modos de vibração considerados pode ser combinado sem sobrestimar os níveis de vibração. Uma vez calculados os níveis de aceleração em correspondência com cada modo de vibração e com cada harmónico da excitação, efectua-se uma combinação quadrática de modo a obter o valor eficaz da aceleração devido à actuação da força associada ao peão nos pontos de excitação e resposta considerados.

3.1.2. Resposta transitória

No caso da resposta transitória, aplica-se no ponto de excitação uma acção impulsiva em correspondência com cada modo de vibração, calculando-se o valor máximo da resposta por comparação da força impulsiva com a massa modal, a frequência natural e o modo de vibração. O decaimento da aceleração é determinado pelo amortecimento, podendo obter-se o valor eficaz da aceleração por combinação das respostas em cada modo de vibração.

3.1.3. Factores de ponderação

No cálculo da aceleração do pavimento, são introduzidos os factores de ponderação indicados na Figura 1-2 de modo a garantir que a aceleração calculada se situa no domínio da percepção humana. A aceleração ponderada é então comparada com valores limite, tais como os definidos pelas normas ISO 10137, ou por outras normas ou recomendações técnicas.

3.1.4. Mapas da resposta vibratória

Efectuando esta análise para pontos de excitação e resposta coincidentes ao longo de todo o pavimento, pode caracterizar-se o comportamento vibratório

de diferentes áreas, de acordo com o representado na Figura 3-2. Isto permite ao arquitecto ou dono de obra o posicionamento das áreas mais sensíveis às vibrações (tais como blocos operatórios, laboratórios, etc) em zonas que exibam um melhor comportamento e, inversamente, localizar áreas menos sensíveis às vibrações (ateliês, cantinas, etc) em zonas mais susceptíveis.

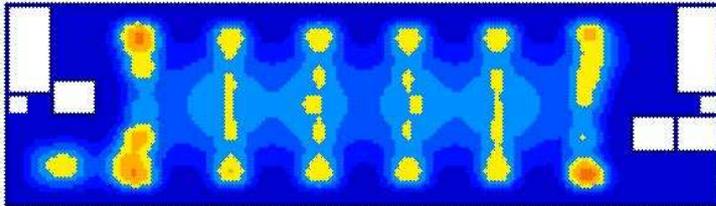


Figura 3-2: Comportamento vibratório de um pavimento corrente

3.1.5. Procedimento detalhado

O procedimento exacto de cálculo, incluindo valores de entrada, tais como os coeficientes de Fourier associados à actividades humanas (andamento, dança), e critérios de aceitabilidade das vibrações definidos em normas, encontra-se apresentado na publicação do SCI 354, intitulada: "Design of Floors for Vibration: A New Approach"[2]. Esta publicação inclui igualmente indicações sobre a modelação de pavimentos tendo por base programas de elementos finitos.

O método P354 fornece resultados semelhantes aos obtidos através do método OS-RMS₉₀, mas utiliza valores mais directamente comparáveis com os limites definidos em normas como a ISO 10137. O efeito da propagação da vibração ao longo do pavimento, como o correspondente à deslocação entre um corredor muito utilizado e um bloco operatório, pode ser tido em consideração, e diferentes factores de ponderação podem ser usados tendo em conta diferentes cenários de utilização. Este método permite a consideração de diferentes tipos de excitação, sejam devidas às actividades humanas, ou a equipamentos mecânicos, e permite ainda a análise dos efeitos das vibrações em diferentes receptores (como equipamento sensível).

3.2. Outras considerações relativas a vibrações

Um aspecto importante na verificação do comportamento dinâmico tendo por base o método P354 prende-se com a amplificação das acções associadas a actividades rítmicas. As acções humanas que induzem vibrações sujeitam os pavimentos a forças mais elevadas do que a força estática. No entanto, enquanto que as acções devidas ao andamento de um peão originam um aumento pouco importante dessas forças, coberto pelos valores das acções de dimensionamento impostas, as acções devidas a um grupo de peões desenvolvendo actividades rítmicas combinadas (normalmente ao ritmo de música, como é o caso da aeróbica ou da dança) podem exceder os valores

de projecto e devem ser explicitamente tidas em consideração. Em casos extremos, podem ocorrer problemas de fadiga na estrutura.

3.3. Método simplificado

Em alternativa à modelação do pavimento através de elementos finitos, o método P354 apresenta um método simplificado para cálculo manual. Este método baseia-se num estudo paramétrico de um certo número de modelos usando o método da sobreposição modal, conduzindo de novo ao cálculo de uma aceleração para comparação com valores limite definidos em normas.

4. Melhoramento do comportamento dinâmico

As três formas mais efectivas de melhorar o comportamento dinâmico de um pavimento podem ser inferidas da análise dos gráficos OS-RMS₉₀. Dois desses gráficos, associados a diferentes níveis de amortecimento, são apresentados na Figura 4-1.

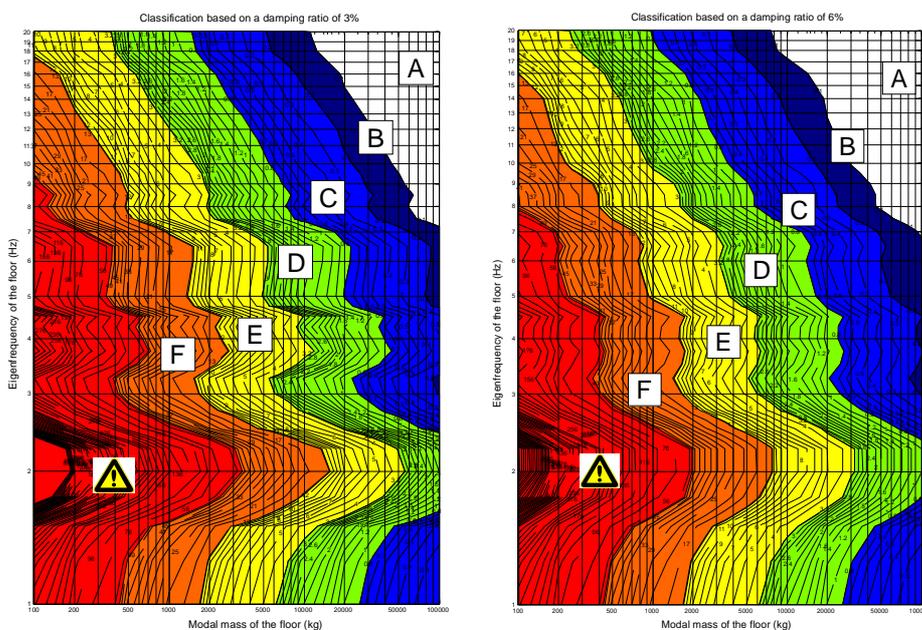


Figura 4-1: Gráficos OS-RMS para amortecimento de 3% (esquerda) e 6% (direita)

A análise destes gráficos mostra claramente que a melhoria do comportamento dinâmico de um pavimento se pode conseguir actuando em três níveis diferentes: aumentando a massa modal (i.e. deslocando um ponto da esquerda para a direita no gráfico); ajustando a frequência (i.e. deslocando um ponto verticalmente no gráfico); ou aumentando o amortecimento (i.e., deslocando um ponto do gráfico da esquerda para o gráfico da direita, com coordenadas equivalentes). Utilizando métodos de análise mais sofisticados, é igualmente possível ajustar os vãos de modo a isolar certas áreas do pavimento – o que tem grande utilidade quando se estudam potenciais efeitos de vibrações em blocos operatórios, por exemplo.

4.1. Aumento da massa modal

Em geral, o método mais efectivo na melhoria do comportamento vibratório de um pavimento consiste no aumento da massa activa na vibração. Isto pode ser conseguido através de um aumento da massa distribuída do pavimento (aumentando a espessura da laje, etc), ou então ajustando a rigidez da estrutura metálica de suporte de modo a aumentar a área de laje que participa no modo de vibração. Uma área maior do pavimento está associada a uma maior massa modal, o que ajuda a reduzir a resposta. Contudo, aumentar a massa modal afecta igualmente a frequência, devendo ter-se o cuidado de não aumentar a resposta da estrutura em virtude de uma redução apreciável da frequência.

4.2. Ajuste da frequência

A frequência da laje de um pavimento pode ser facilmente aumentada incrementando a rigidez das vigas ou, no caso de estruturas já existentes, adicionando chapas aos banzos das vigas metálicas de suporte. Os benefícios alcançados não são necessariamente significativos, porquanto a dependência do comportamento vibratório com a frequência só tem alguma importância para frequências acima de 9-10 Hz, e a única forma de reduzir a resposta consiste em ajustar a frequência natural para valores situados entre os harmónicos da excitação.

4.3. Aumento de amortecimento

Em teoria, a maneira mais efectiva de reduzir a resposta vibratória de um pavimento consiste no aumento do amortecimento. Com efeito, a amplitude da resposta diminui para cerca de metade com a duplicação do amortecimento. No entanto, é difícil adicionar amortecimento a pavimentos, já que os sistemas de amortecimento necessitam de ser ligados a pontos com grandes movimentos de modo a serem plenamente efectivos. Isto significaria portanto introduzir amortecedores entre pavimentos no centro de vigas ou lajes, o que na generalidade dos casos é impraticável. Os amortecedores de massas sintonizadas (TMDs) introduzem um nível significativo de amortecimento, mas são normalmente utilizados como medidas correctivas e não introduzidos em fase de projecto.

4.4. Alterações da concepção estrutural

Em zonas particularmente sensíveis dos pavimentos, como as destinadas a blocos operatórios, pode ser preferível isolar uma determinada área do restante pavimento, em vez de dimensionar um pavimento contínuo capaz de cumprir estritas exigências em termos de conforto na zona mais sensível. Isto pode ser conseguido através da definição de diferentes "layouts" da estrutura de suporte dos pavimentos, originando por exemplo vãos mais curtos, apoiados em vigas de rigidez mais elevada do que a utilizada

habitualmente, ou introduzindo pilares adicionais nas zonas mais sensíveis. A maneira mais simples de avaliar a eficiência destas medidas passa pela modelação numérica do pavimento através de elementos finitos, realizando-se ajustes à disposição dos vãos e rigidez das vigas até conseguir que os modos de vibração ilustrem o isolamento das áreas sensíveis.

4.5. Medidas correctivas

A introdução de medidas correctivas é normalmente bastante dispendiosa e por vezes praticamente impossível de realizar dadas as restrições físicas existentes. Em algumas situações, pode ser possível introduzir medidas que apenas reduzem a incomodidade associada às vibrações em vez de alterar a sua natureza ou extensão da ocorrência. Estas medidas incluem a remoção ou redução de factores de incomodidade, como o ruído causado pela vibração de componentes, a modificação do período da actividade que está na origem das vibrações, ou a modificação do "layout" arquitectónico, de modo a afastar os ocupantes das zonas do pavimento mais problemáticas.

Em geral, os métodos de melhoramento das estruturas acima referidos aplicam-se igualmente no caso de necessidade de introdução de medidas correctivas após a construção. Modificar a massa de um pavimento como medida correctiva pode ser uma medida efectiva, mas é necessário garantir que a frequência do pavimento não reduz de tal maneira que se perca o efeito benéfico introduzido pelo aumento da massa.

A frequência pode ser aumentada por soldadura de chapas aos banzos inferiores das vigas de suporte. Esta medida pode ser combinada com o aumento da massa para baixar significativamente a resposta do pavimento.

O amortecimento de uma estrutura pode também ser aumentado, sendo os métodos usualmente utilizados os seguintes:

- ❖ Modificação da localização dos elementos não estruturais, como as paredes;
- ❖ Instalação de amortecedores de massas sintonizadas;
- ❖ Instalação de materiais específicos.

A modificação ou aumento do número de componentes não estruturais pode levar a um aumento do amortecimento do pavimento. Infelizmente, dada a variabilidade do amortecimento, é impossível quantificar com precisão o incremento de amortecimento proporcionado por estas componentes.

Habitualmente, torna-se necessário realizar ensaios de modo a avaliar a eficiência das medidas correctivas implementadas, sendo eventualmente necessário experimentar diferentes soluções.

Os amortecedores de massas sintonizadas permitem um controlo passivo do pavimento, podendo ser utilizados na redução da resposta a acções como as devidas às passadas dos peões. Um amortecedor de massas sintonizadas (TMD) é constituído por uma massa ligada à estrutura do pavimento através de uma mola e um amortecedor. Este sistema é apenas efectivo, no entanto,

se a sua frequência natural se relacionar estritamente com a frequência do modo de vibração crítico através de um dimensionamento adequado. Os TMDs sintonizados para frequências naturais do pavimento podem ficar dessintonizados em consequência de variações de frequência do pavimento resultantes de alterações das suas características ou da deslocação de alguns equipamentos. É necessário salientar que os TMDs são apenas efectivos numa banda de frequências limitada. Consequentemente, um pavimento com várias frequências críticas pode necessitar de vários TMDs para reduzir a resposta. Tipicamente, a massa de um TMD varia entre 2% e 5% da massa modal associada a cada modo crítico, o que pode originar adicionalmente problemas de resistência da estrutura à massa adicional total.

Os sistemas de amortecimento do tipo sanduíche empregam normalmente materiais específicos com elevada capacidade de dissipação energética, que são colocados entre a estrutura e uma chapa metálica adicional. As deformações induzidas subsequentemente em cada camada (tracção/compressão e corte) dissipam energia por histerese. Refere-se a importância de consultar um especialista na avaliação da adequação e eficiência deste tipo de sistema à solução do problema em estudo (a eficiência do material pode, por exemplo, ser dependente da temperatura ou da amplitude das deformações).

5. Referências

- [1] European Commission – Technical Steel Research: “Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and public building and gymnastic halls”, RFCS Report EUR 21972 EN, ISBN 92-79-01705-5, 2006, <http://europa.eu.int>
- [2] A.L. Smith, S. J. Hicks, P. J. Devine: “Design of Floors for Vibration: A New Approach”. SCI 2007, ISBN 1-85942-176-8
- [3] Waarts, P. *Trillingen van vloeren door lopen: Richtlijn voor het voorspellen, meten en beoordelen*. SBR, September 2005.
- [4] ISO 10137 – Bases for design of structure – Serviceability of buildings and walkways against vibrations, International Organization for Standardization, 2007.