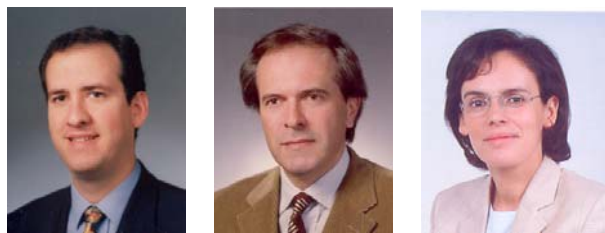


NOVAS METODOLOGIAS PARA A ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM PAVIMENTOS DE EDIFÍCIOS

Moutinho, C.¹; Cunha, A.¹; Caetano, E.¹

¹ Departamento de Engenharia Civil / VIBEST, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



RESUMO

Este artigo tem como objectivo principal descrever as novas metodologias de análise de vibrações em pavimentos de edifícios. Começa-se por fazer uma breve referência às metodologias clássicas que durante muitos anos foram utilizadas para avaliar os limiares de aceitabilidade das vibrações nestes elementos e, posteriormente, descrevem-se sucintamente as actuais recomendações neste domínio expressas em normas nacionais e internacionais recentemente publicadas. Seguidamente, expõem-se os novos desenvolvimentos em termos do dimensionamento de pavimentos de edifícios às vibrações resultantes do projecto Europeu de investigação designado de “Human Induced Vibration of Steel Structures”, ou simplesmente “HIVOSS”, no qual a FEUP foi um dos parceiros. Esta nova metodologia de análise assenta na uniformização e compatibilização os conhecimentos existentes nesta área, fornecendo um processo expedito de avaliação de vibrações em pavimentos que tende a ser integrado no desenvolvimento futuro dos Eurocódigos.

1- INTRODUÇÃO

1.1 - Problemas de vibrações em lajes

Os pavimentos de edifícios correntes são susceptíveis de apresentarem níveis de vibração excessivos decorrentes da elevada flexibilidade que frequentemente possuem, aliada aos baixos coeficientes de amortecimento que muitas vezes os caracteriza. É o caso de pavimentos metálicos e de madeira, de reduzida massa e espessura, sujeitos às acções dinâmicas induzidas pelos seus utilizadores. Também é o caso de pavimentos de betão, os quais tendem a ter menor espessura decorrente da progressiva utilização de materiais de elevada resistência e também devido às novas exigências arquitectónicas, marcadas por elementos de elevada esbelteza e transparência. Em qualquer

destas situações, os níveis de vibração podem ser ainda mais elevados na eventualidade de ocorrência de fenómenos de ressonância originados pela proximidade da frequência da excitação produzida pelos peões relativamente às frequências naturais do pavimento.

Nestes casos, os níveis de vibração alcançados podem ser considerados excessivos do ponto de vista do bom funcionamento em serviço da estrutura, originado por vezes sensações de desconforto e até situações de incapacidade de trabalho. Neste sentido, a adopção de medidas que tendam a limitar vibrações excessivas em pavimentos é desejável e actualmente imprescindível de modo a proporcionar conforto humano aos seus utilizadores.

1.2 - Metodologias de análise

A sensibilidade dos seres humanos às vibrações começou a ser estudada no início do século passado, tendo despoletado um crescente interesse da comunidade científica sobre este tema. Esses trabalhos iniciais, em conjunto com a investigação que foi sendo desenvolvida, deram origem a um conjunto de recomendações (métodos clássicos) que foram utilizadas por muitos anos no dimensionamento de lajes de edifícios.

A avaliação da exposição dos seres humanos às vibrações foi novamente impulsionada pelo surgimento da norma ISO 2631, particularmente nas suas versões mais actuais, a ISO 2631-1/2. Estes documentos permitem avaliar os efeitos da transmissão de vibrações aos seres humanos, incluindo o caso particular da propagação através de pavimentos de edifícios. Os métodos de análise expostos constituem as ferramentas actualmente mais fiáveis neste domínio.

Mais recentemente, o projecto de investigação Europeu “Human Induced Vibration of Steel Structures”, liderado pela Universidade de Aachen, propôs uma nova metodologia de análise que adopta o princípio da ISO 2631, introduzindo simultaneamente algumas simplificações para o caso específico das lajes, incidindo especialmente no estudo de pavimentos metálicos. Esta metodologia é de aplicação simples e directa, de grande utilidade para Engenheiros e projectistas, e tende a fazer parte do desenvolvimento dos Eurocódigos.

Nas próximas secções apresentam-se resumidamente o conteúdo dos métodos clássicos referidos, assim como as metodologias que estão actualmente a ser utilizadas neste contexto. Expõe-se por fim as evoluções propostas pelo projecto HIVOSS.

2- MÉTODOS CLÁSSICOS

Uma das primeiras propostas que surgiu relativamente à necessidade de se limitar os níveis de vibração em

pavimentos foi apresentada por Lenzen em 1966, o qual sugeriu que se utilizasse a acção produzida pelo cair de calcanhares como meio de obter uma estimativa do nível de percepção às vibrações em pavimentos metálicos. Para o efeito, apoiou-se num dos primeiros trabalhos de investigação nesta área desenvolvido por Reiher e Meister na anterior década de 30, tendo proposto a escala modificada de Reiher-Meister, cuja representação gráfica está indicada na Figura 1. Lenzen sugeriu que a escala inicialmente desenvolvida por esses autores fosse multiplicada por um factor de 10 para ter em conta a redução da sensibilidade que os seres humanos têm a vibrações de carácter transiente quando comparada com a aquela que apresentam relativamente a vibrações contínuas.

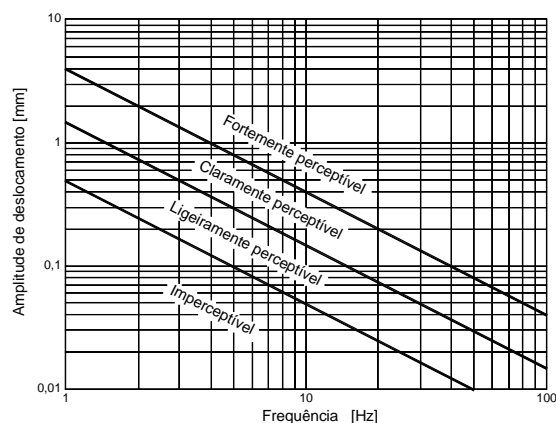


Figura 1 – Escala modificada de Reiher-Meister

Em 1981, Murray, tendo por base os estudos por ele realizados nesta área, propôs um critério (conhecido por critério de Murray) relativamente à definição de um nível de amortecimento mínimo em lajes de escritórios e edifícios residenciais para que tenham um comportamento aceitável em serviço, sendo este traduzido por

$$\xi > 35A_0f_n + 2,5$$

em que ξ é o coeficiente de amortecimento do pavimento, A_0 é a amplitude do deslocamento inicial provocado pelo cair de calcanhares (em polegadas) e f_n é a respectiva primeira frequência natural.

A norma canadiana da CSA (“Canadian Standards Association”)

conhecida como a CAN3-S16.1 (1989), também é um documento de referência nesta área, propondo limiares para vibrações em pavimentos residenciais, de escritórios e de escolas. Baseado no trabalho de Allen e Rainer, esta norma faz intervir a frequência natural e coeficiente de amortecimento do pavimento e tem em conta o tipo de vibração em causa. Distingue se as vibrações são do tipo transiente, provocadas pelo cair de calcanhares ou por acções impulsivas resultantes do caminhar, ou se são contínuas com um número de oscilações entre 10 e 30 ciclos (ver Figura 2). Também sugere que a percepção às vibrações é mais sensível na banda dos 2 aos 8 Hz.

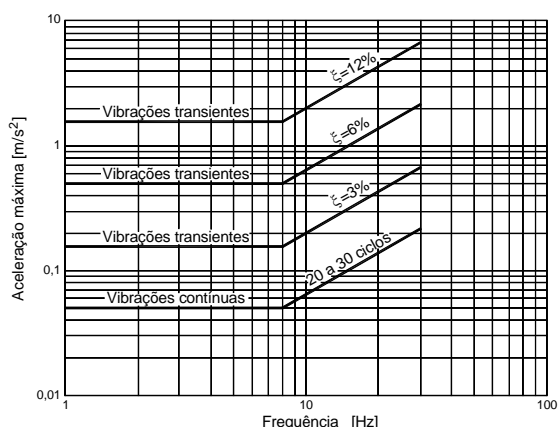


Figura 2 – Limites da vibração indicados pelo CSA

Por outro lado, Ellingwood e Tallin recomendaram que em pavimentos de apoio à actividade comercial não se ultrapassasse uma aceleração de 0,005g para vibrações provocadas pelo andamento. Para cumprir este critério sugeriram que a máxima deformação do pavimento quando sujeito a uma carga concentrada de 2,5kN aplicada em qualquer localização da laje, não excedesse 0,5mm. Curiosamente, o Eurocódigo 3, relativo ao projecto de estruturas de aço, utiliza verificações deste género para que se proceda à verificação dos estados limites de utilização no que respeita aos efeitos dinâmicos nas lajes.

3- METODOLOGIAS ACTUAIS

3.1 - Norma ISO 2631-1/2

A ISO 2631 é uma norma publicada pela primeira vez em 1972 mas que teve várias evoluções nos anos seguintes. Em 1989 esta norma sofreu modificações significativas, tendo-se optado por dividi-la na ISO 2631-2, publicada nesse ano, e na ISO 2631-1, publicada mais tarde em 1997.

Em termos gerais, esta norma estabelece limiares a partir dos quais as vibrações começam a ser sentidas pelos seres humanos. Para o efeito, define um sistema de eixos orientado de acordo com a posição do corpo humano, conforme se indica na Figura 3.

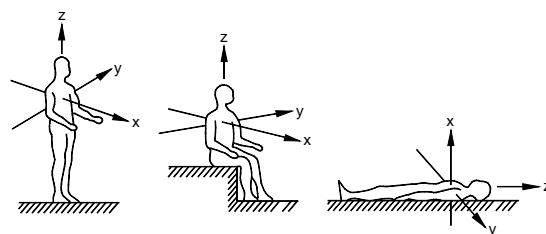


Figura 3 – Sistema de eixos utilizados na ISO 2631

Posteriormente, apresenta os ábacos que definem as curvas base da aceleração para vibrações na direcção z e nas direcções x e y, correspondentes ao nível mínimo de perceptibilidade das vibrações pelos seres humanos. Esses gráficos estão indicados nas Figuras 4 e 5. A gama de frequências considerada é de 1 a 80 Hz, estando os valores das vibrações indicados em termos da aceleração eficaz ponderada em frequência.

Os níveis máximos de vibração admissíveis em diferentes tipos de edifícios podem ser obtidos por aplicação dos factores multiplicativos indicados na Tabela 1 às curvas base de interesse. Esta tabela, que também faz parte da ISO 10137, tem em conta o período do dia em que ocorrem as vibrações e se são contínuas ou intermitentes, ou então, se são impulsivas com várias ocorrências diárias. No primeiro caso devem comparar-se os níveis de vibração em aceleração e, no caso de vibrações impulsivas, devem utilizar-se os ábacos em velocidade que também constam na norma.

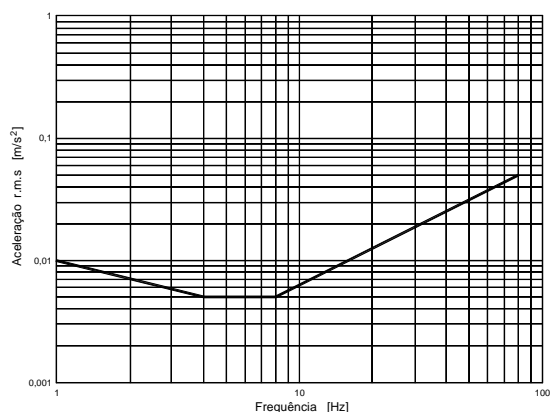


Figura 4 – Curva base para a direcção z

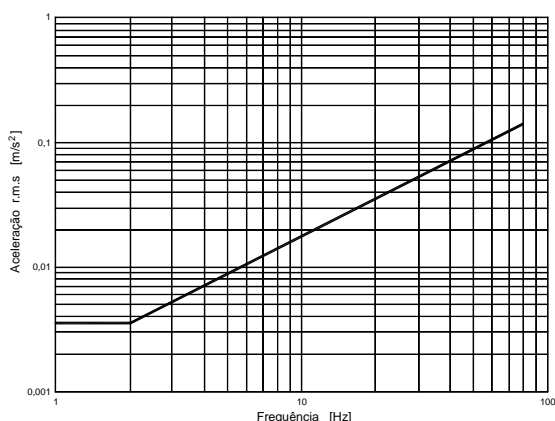


Figura 5 – Curva base para as direcções x e y

Tabela 1 – Factores multiplicativos

Localização	Período	Factores multiplicativos	
		Exposição a vibrações contínuas ou intermitentes	Exposição a vibrações impulsivas com várias ocorrências diárias
Áreas críticas de trabalho	Dia	1	1
	Noite	1	1
Zonas residenciais	Dia	2 a 4	30 a 90
	Noite	1,4	1,4 a 20
Zonas de escritórios	Dia	4	60 a 128
	Noite	4	60 a 128
Zonas de comércio	Dia	8	90 a 128
	Noite	8	90 a 128

3.2 - Publicação do CSI P354

A publicação do SCI (“Steel Construction Institute”) de referência P354, em 2007, é porventura o documento mais completo relativo ao tema em análise. Nele são abordados os aspectos da modelação da acção, da determinação da resposta dinâmica do pavimento e da

avaliação da aceitabilidade das vibrações. Além da descrição dos procedimentos que devem ser seguidos na avaliação das vibrações induzidas por peões isolados, este documento fornece ainda elementos importantes relativos à caracterização das acções induzidas por grupos de peões, dando particular ênfase ao caso da excitação produzida por actividades rítmicas, como a dança e o salto rítmico.

A análise dos efeitos das vibrações é conduzida tendo por base a metodologia introduzida pela norma ISO 2631. Para o efeito, é necessário determinar a resposta dinâmica da estrutura, quer em situações de ressonância, quer em situações de resposta transiente onde contribuição de modos de vibração superiores seja significativa. Seguidamente, o valor da aceleração eficaz ponderada em frequência é comparado com os limites indicados na referida norma, após a prévia utilização do factor multiplicativo apropriado à situação concreta que está a ser analisada. Aqui, a publicação do CSI sugere os factores multiplicativos indicados na Tabela 1 e propõe outros valores para situações não tabeladas.

3.3 - Publicação do AISC / CISC

Outro documento de referência nesta área, editado em 1997, é a publicação conjunta do “American Institute of Steel Construction” (AISC) e do “Canadian Institute of Steel Construction” (CISC). Este documento foi pioneiro em termos de associar a avaliação dos níveis de vibração em pavimentos de edifícios à ISO 2631, tendo proposto ainda factores multiplicativos para os casos mais correntes de outras estruturas como pontes pedonais e passadiços no interior de edifícios. Em particular, sugere que os factores multiplicativos da curva base da direcção z, expressos em termos da aceleração de pico, fossem 10 para escritórios e residências, 30 para zonas comerciais, salas de dança, salas de jantar e passadiços interiores, e 100 para pavimentos de apoio a actividades rítmicas e pontes pedonais. Sugere também que tais factores multiplicativos devem ser corrigidos por um coeficiente entre 0,8 e

1,5 para ter em conta a frequência e a duração das vibrações. Também propõe um factor de redução das vibrações tendo em conta o facto de muitas vezes não se conseguir atingir a resposta estacionária decorrente da curta duração da excitação relativamente ao vão da estrutura. Sugere ainda uma correcção de 0,7 em virtude do causador e do receptor das vibrações não se situarem, em geral, na secção de componente modal máxima.

4- NOVAS METODOLOGIAS DE ANÁLISE

4.1 - Principais aspectos inovadores

Em resultado do projecto de investigação nesta área (HIVOSS) foram introduzidos novos aspectos na análise tradicional de problemas de vibrações em pavimentos de edifícios.

A primeira evolução, bastante significativa, tem haver com o facto do estudo de níveis de vibração passar a introduzir uma componente estatística na definição da excitação induzida pelos peões. Efectivamente, em vez de se considerar a acção aplicada por um único peão (ou grupo de peões), em correspondência com o cenário mais gravoso de análise, a acção é encarada por uma distribuição estatística de um conjunto de peões que representa as reais condições de carregamento de um pavimento em condições de serviço.

Outro aspecto inovador tem haver com a definição do parâmetro utilizado na avaliação das vibrações. Neste caso, recorre-se ao conceito de raiz quadrada do valor quadrático médio da resposta produzida por um única passada, OS-RMS (One-Step Root Mean Square). A explicação é que o valor quadrático médio de um sinal varia significativamente consoante o período de tempo considerado na análise das vibrações. Daí a necessidade haver uma normalização relativamente ao período de tempo de uma única passada, qualquer que seja a frequência da excitação e a velocidade do movimento do peão.

4.2 - Caracterização da acção

Tendo em conta os resultados das observações feitas numa estrutura real, onde foram caracterizados o peso e a frequência da passada dos indivíduos que aleatoriamente iam entrando num edifício, definiu-se uma distribuição estatística para estes dois parâmetros. Neste caso, considerou-se que o peso dos peões pode oscilar entre 30 e 120kg, com escalonamentos divididos em 20 classes, e que a frequência da passada pode variar entre 1,64 e 3,00Hz, discretizada por 35 classes diferentes. Assumindo que não há correlação entre estes parâmetros, existem 20×35 , ou seja 700, cenários possíveis de carregamento, cruzando todas as possibilidades de combinação de peso dos indivíduos e respectivas frequências da passada. Na Figura 6 representa-se a distribuição de ocorrências correspondente a cada um deste cenários.

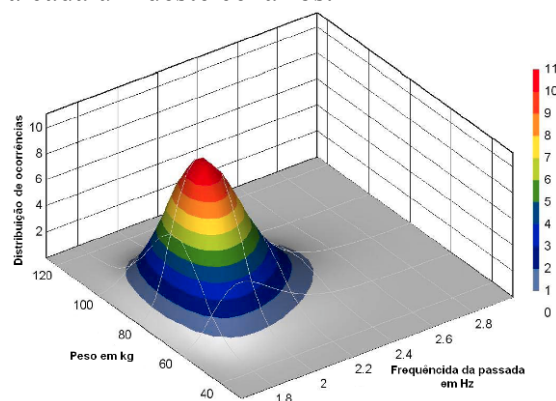


Figura 6 – Distribuição de ocorrências relativas ao peso e da frequência da passada de 700 indivíduos

4.3 - Determinação de OS-RMS₉₀

Na avaliação da admissibilidade das vibrações recorre-se à determinação do valor da raiz quadrada do valor quadrático médio da velocidade produzida por uma única passada, cuja probabilidade de ocorrência na população de 700 pessoas anteriormente caracterizadas é de 90%, designando-se de OS-RMS₉₀. Para a obtenção deste parâmetro é necessário fazer 700 simulações numéricas envolvendo a estrutura em análise e as condições de carregamento associadas a cada um dos cenários possíveis, determinar o valor de OS-RMS para cada um deles e posteriormente encontrar o valor de OS-

RMS₉₀. A título de exemplo, na Figura 7 indica-se a representação dos valores de OS-RMS encontrados numa simulação referente a um pavimento cuja frequência natural é de 2,8Hz, caracterizado por uma massa modal de 20t e um coeficiente de amortecimento associado de 3%. Na Figura 8 esquematiza-se o procedimento para encontrar o correspondente valor de RMS₉₀.

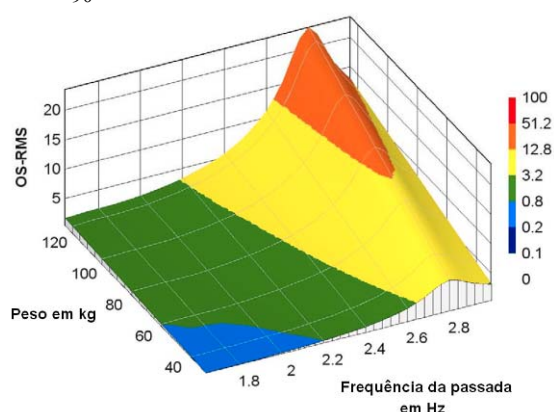


Figura 7 – Valores de OS-RMS para um pavimento com $f_1=2,8\text{Hz}$, $M=20\text{t}$ e $\xi=3\%$

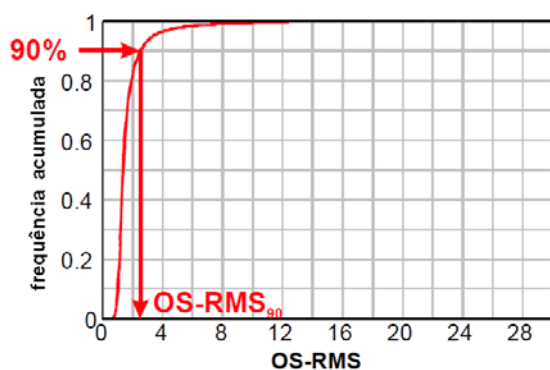


Figura 8 – Processo para a determinação de OS- RMS₉₀

4.4 - Avaliação dos níveis de vibração

A caracterização dos níveis de vibração num dado pavimento faz-se tendo em conta a classificação atribuída na Tabela 2. Neste caso, em vez de se fixar um valor limite absoluto a partir do qual os níveis de vibração são considerados excessivos, esta metodologia prefere atribuir uma classificação ao pavimento em função da aceitabilidade das vibrações tendo em conta o tipo de utilização da estrutura. São definidas classes que variam entre A e F, em correspondência directa com o valor de OS-RMS₉₀ determinado. A classe correspondente a níveis de vibração

mais reduzidos é a classe A enquanto que a classe F é onde as vibrações apresentam os valores mais elevados.

Tabela 2 – Classificação da resposta de pavimentos e recomendação em função da utilização

Classe	OS-RMS ₉₀		Função do pavimento												
	Limite inferior	Limite superior	Espaço crítico	Saúde	Educação	Residencial	Escritório	Conferência	Retailho	Hotel	Prisão	Industrial	Desporto		
A	0.0	0.1													
B	0.1	0.2													
C	0.2	0.8													
D	0.8	3.2													
E	3.2	12.8													
F	12.8	51.2													

Recomendado

Crítico

Não recomendado

Recomendado
Crítico
Não recomendado

4.5 - Método simplificado

A determinação do valor de OS-RMS₉₀ é bastante fastidiosa na medida em que se torna necessário proceder a inúmeras simulações numéricas em correspondência com cada cenário de carregamento da laje. Para simplificar este processo, estas simulações foram previamente efectuadas para uma gama bastante alargada de osciladores de 1 grau de liberdade com frequências naturais entre 1 e 20Hz, fazendo variar a massa modal entre 100kg e 100ton e o coeficiente de amortecimento entre 1 e 9%. Tendo em conta os valores de OS-RMS₉₀ obtidos por este processo e a classificação da Tabela 2, foram desenvolvidos ábacos de consulta rápida como aquele que está representado na Figura 9. Se o comportamento dinâmico do pavimento for convenientemente representado por um sistema de 1 grau de liberdade, basta entrar no ábaco com a massa modal e a frequência natural da estrutura, para imediatamente se conhecer o valor de OS-RMS₉₀ correspondente assim como a respectiva classe do pavimento. Este procedimento está também exemplificado na Figura 9.

Se a dinâmica do pavimento for caracterizada pela contribuição significativa de vários modos de vibração de ordem superior, então o valor de OS-RMS₉₀ pode ser determinado individualmente para cada frequência natural, procedendo-se posteriormente a uma ponderação quadrática conveniente.

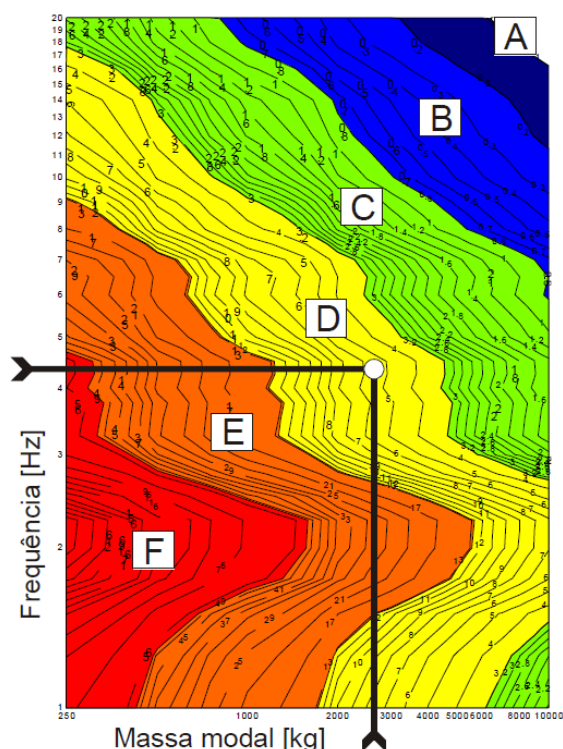


Figura 9 – Exemplo da determinação de OS-RMS₉₀ e correspondente classe de pavimento

5- CONCLUSÕES

Os pavimentos de edifícios podem apresentar níveis de vibração elevados especialmente se possuírem baixa massa modal e reduzido amortecimento, como é o caso de pavimentos metálicos. Os níveis de vibração podem ainda ser mais elevados se ocorrem fenómenos de ressonância decorrentes da proximidade da frequência da excitação relativamente às frequências naturais da estrutura.

Neste contexto, é útil recorrer a normas e recomendações que permitam avaliar se os níveis de vibração alcançados são admissíveis em termos do conforto humano dos seus utilizadores. Neste artigo dá-se particular atenção à metodologia recentemente proposta no contexto do projecto de investigação HIVOSS no qual a FEUP foi um dos parceiros. Além de ter em conta o carácter estatístico da acção, esta metodologia utiliza o conceito de OS-RMS₉₀ para obter uma classificação dos pavimentos em função do tipo de utilização previsto.

Devido ao facto desta proposta uniformizar e compatibilizar os conhecimentos actualmente existentes nesta área, e também por apresentar um processo simplificado de fácil utilização por parte de Engenheiros e projectistas, esta metodologia tende a ser integrada no futuro desenvolvimento do Eurocódigo 3.

6- REFERÊNCIAS

- Allen, D., Rainer, J. 1976. Vibration Criteria for Long-span Floors. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.3, Nº 2, pp.165-173.
- CAN3 - S16.1 - M89. 1989. Steel Structures for Buildings - Limits States Design : Appendix G, Guide for Floor Vibration. Canadian Standards Association, Ontario.
- HIVOSS Project. 2007. Vibration Design of Floors. Background document and Guideline.
- ISO 2631-1. 1997. Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration - Part 1: General Requirements.
- ISO 2631-2. 1989. Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration - Part 2: Continuous and Shock-induced Vibrations in Buildings (1 to 80 Hz).
- ISO 10137. 2007. Bases for Design of Structures - Serviceability of Buildings and Walkways Against Vibrations.
- Lenzen, K. 1966. Vibration of Steel Joist-Concrete Slab Floors. Engineering Journal, AISC, nº3, pp. 133-136.
- Murray, T. 1981. Acceptability Criterion for Occupant-induced Floor Vibrations. AISC Engineering Journal, vol.18, nº2.
- Murray, T., Allen, D., Ungar, E. 1997. Floor Vibrations Due to Human Activity. Publication of AISC and CISC.
- NBCC. 1981. National Building Code of Canada. Part 4: Design.
- Reiher, H., Meister, F.1931. The Sensitiveness of the Human Body to Vibrations. Forschung, (VDI-Berlin), Vol. 2 No 11, pp. 381-386.
- Smith, A., Hicks, S., Devine, P. 2007. Design of Floors for Vibration. A New Approach. SCI Publication P354.