



Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona

Vibracions Mecàniques

Valoració de les vibracions

Salvador Cardona

Lluïsa Jordi

2006



Departament d'Enginyeria Mecànica

Vibracions Mecàniques. Valoració de les vibracions

Primera edició març 2006

© Els autors, 2006

Edita: Salvador Cardona i Foix

I.S.B.N.: 84-689-7876-0

Dipòsit Legal: B-20704-2006

Són rigurosament prohibides, sense l'autorització escrita dels titulars del copyright, sota les sancions establertes a la llei, la reproducció total o parcial d'aquesta obra per qualsevol procediment, inclosos la reprografia i el tractament informàtic, i la distribució d'exemplars mitjançant lloguer o préstec públic.

Valoració de les vibracions

Són pocs els casos en els que les vibracions es produeixen amb propòsits funcionals: alimentadors vibratoris, compactadors, etc.; en general, són efectes no desitjats generats per multitud de causes, fonts de vibració, que es propaguen a través de camins de transmissió: canonades, terrenys, etc. i que arriben als receptors: persones, màquines i estructures.

La vibració es pot estudiar i valorar des del punt de vista de la font que la genera, estudi de l'*emissió* de vibracions, o es pot fer des del punt de vista del receptor de la pertorbació que representa, estudi de la *immissió* de vibracions.

Un entorn en el que és important l'estudi de l'emissió de vibracions és en el manteniment de màquines i instal·lacions, on cal tenir present que les vibracions són al mateix temps una pertorbació que cal corregir i un símptoma de l'estat de la màquina o instal·lació. L'estudi de la immissió de vibracions de les persones és en alguns casos ineludible ja que les vibracions i la seva manifestació aèria -el so- són unes pertorbacions de l'entorn que poden generar un impacte ambiental no negligible.

1 Caracterització de la vibració per a la seva valoració

Per valorar la vibració s'utilitzen paràmetres dels senyals de les magnituds associades a la vibració. Així per exemple, per valorar una vibració del terreny en relació al seu possible efecte sobre la integritat d'un edifici és usual emprar el valor de pic de la velocitat de vibració. En altres casos, l'efecte de la vibració es valora no per un valor puntual en el temps, com és el valor de pic, sinó per paràmetres que tinguin en consideració la història temporal, com és el valor eficaç (determinat sovint com valor eficaç mòbil amb ponderació exponencial de constant de temps d'1 s) . Si la vibració pot causar efectes per acumulació la història temporal pren un paper molt important i es passa a parlar de la dosi de vibració.

Basat en l'experiència i amb un cert suport teòric, és usual considerar en primera aproximació que vibracions amb la mateixa velocitat són igualment severes o igualment percebudes. Si s'analitza amb més detall normalment es conclou, però, que el contingut freqüencial modifica en més o menys grau la severitat o percepció, de manera que, per exemple, dues vibracions del mateix valor eficaç però de freqüències diferents poden ser percebudes com d'intensitat diferent.



Per prendre en consideració el diferent efecte de la vibració segons la freqüència, de vegades aquesta es descompon en els seus components de diferents freqüències (es determina el seu espectre freqüencial) i cadascun es valora segons nivells de referència (nivells que produeixen el mateix efecte) que depenen de la freqüència del component. Un cop valorat cada component, cal establir un procediment de valoració del senyal global; de vegades es pren simplement la severitat global igual a la severitat del component que la té més gran. La descomposició en components de diferent freqüència se sol fer agrupant-los en bandes freqüencials normalitzades (d'octava, de terç d'octava o de dècim de dècada). Operativament aquesta agrupació correspon a fer passar el senyal per un conjunt de filtres passabanda i el resultat que s'obté és l'espectre freqüencial de senyal per bandes (d'octava, de terç d'octava o de dècim de dècada).

A la figura 1 es pot veure un senyal transitori corresponent a la vibració produïda en el terreny per una voladura, el seu espectre continu (de fet de banda estreta, obtingut directament a partir de la transformada de Fourier i equivalent en aquest cas a un espectre per bandes d'1 Hz) i els espectres d'ampla de banda d'octava i de dècim de dècada.

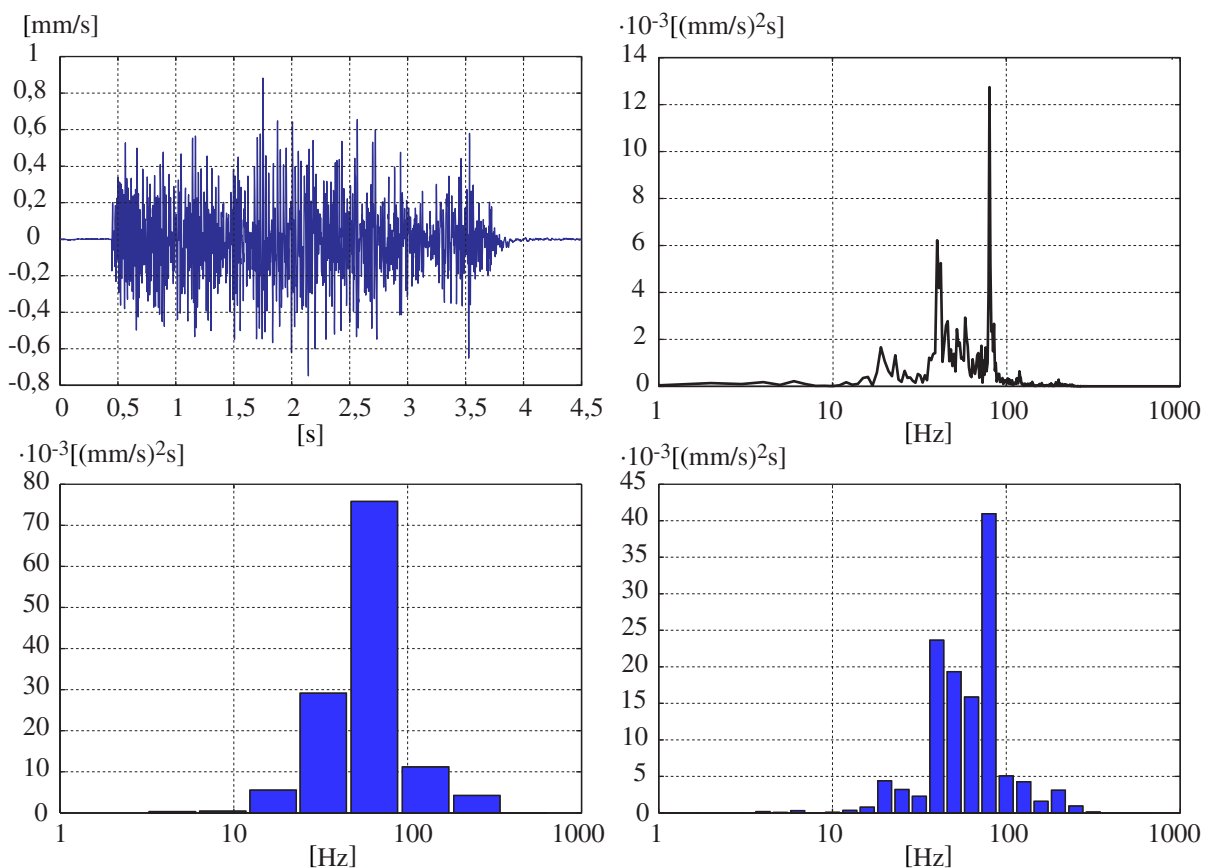


Figura 1. Un senyal transitori i els seus espectres freqüencials continu, en bandes d'octava i en bandes de dècim de dècada.



Un altre procediment, per prendre en consideració el diferent efecte de la vibració segons la freqüència, és fer passar el senyal representatiu de la vibració per un filtre de ponderació (sistema analògic o digital) que modifica el contingut freqüencial del senyal de partida i que dóna a cada component freqüencial un pes inversament proporcional al nivell de referència a la seva freqüència. D'aquesta manera després de passar pel filtre, iguals amplituds de components freqüencials diferents corresponen a igual severitat o percepció. El gràfic del pes aplicat pel filtre funció de la freqüència s'anomena la corba de pes o de ponderació del filtre (i és el mòdul de la funció de resposta freqüencial del filtre).

A la figura 2 es pot veure la corba de pes del filtre de ponderació proposat en diversa normativa i legislació per valorar les vibracions globals del cos (Norma ISO 8041, Norma DIN 4150-2, Llei 16/2002 de 28 de juny de 2002 *Llei de protecció contra la contaminació acústica*) i els espectres d'energia en bandes de dècim de dècada del senyal transitori de la figura 1 abans i després de passar pel filtre.

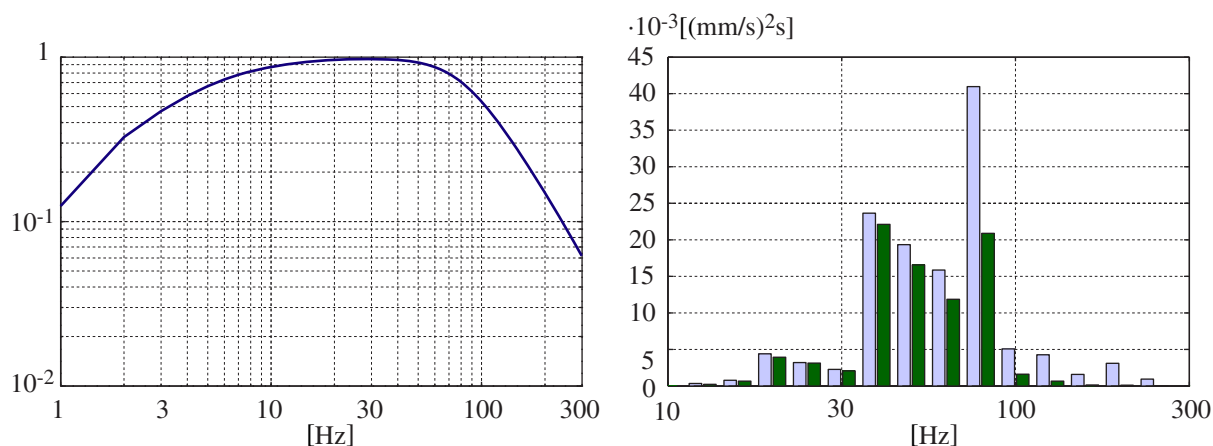


Figura 2. Corba de pes per valorar les vibracions globals del cos. Espectre d'un transitori abans (blau clar) i després (verd fosc) de passar pel filtre.

Un conjunt de filtres aplicats consecutivament és equivalent a aplicar un únic filtre que té per corba de ponderació el producte de corbes de ponderació de cadascun dels filtres. Integrar o derivar un senyal és equivalent a fer-lo passar pel filtre apropiat. L'ordre dels filtres, teòricament irrellevant, pot ser important si cal entrar en la consideració del seu marge dinàmic (relació entre el valor més gran i el valor més petit del senyal que es pot manipular) i la seva resolució (valor mínim de l'increment de senyal quantificable).

A la figura 3 es mostra la corba de pes i la resposta impulsional d'un integrador que, per evitar els problemes que usualment apareixen a causa del soroll de baixa

frequència, limita el creixement del pes per sota d'una certa freqüència (freqüència de tall). L'efecte d'aquest integrador és equivalent a l'efecte d'aplicar un integrador ideal més un filtre passabaix. La corba de pes de l'integrador ideal és, evidentment, una recta ja que en el domini freqüencial integrar és equivalent a dividir per $2\pi f$, essent f la freqüència. La resposta impulsional de l'integrador ideal és constant de valor unitari (la integral d'un impuls és una constant).

Si després d'aplicar un filtre a un senyal cal analitzar la seva forma d'ona, la seva evolució temporal, per determinar, per exemple, un valor de pic, cal tenir present que el pas per un filtre provoca una distorsió, distorsió de fase, causada per la diferent variació de fase que introdueix en els seus components freqüencials. Si la variació de fase relativa és lineal amb la freqüència, filtre de fase lineal, aleshores tots els components freqüencials sofreixen el mateix retard temporal i el senyal no es distorsiona per la variació de fase, només sofreix un retard. Només alguns filtres digitals poden ser estrictament de fase lineal.

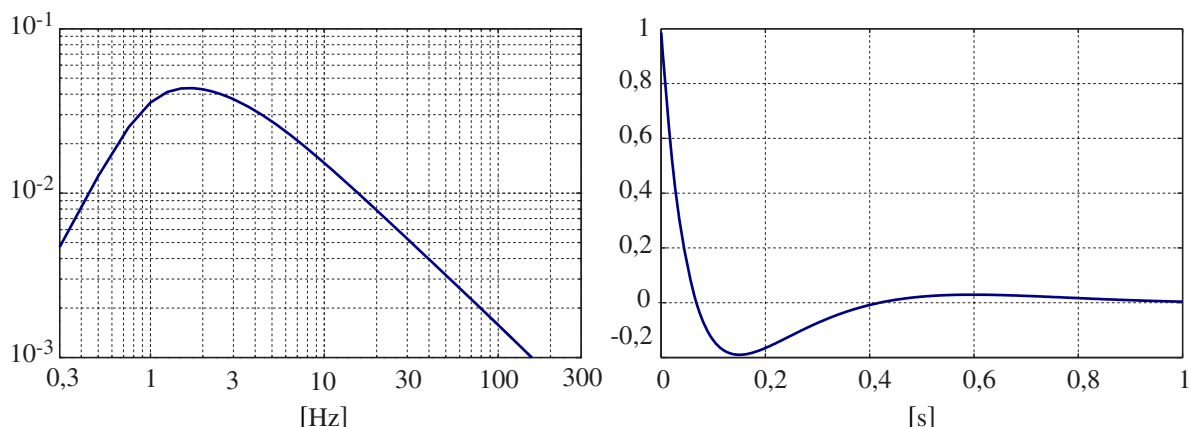


Figura 3. Corba de pes i resposta impulsional d'un integrador amb freqüència de tall.

2 Les vibracions a les màquines

Tal com ja s'ha dit, cal tenir present, sobretot per part del tècnic de manteniment, que les vibracions a les màquines són al mateix temps una pertorbació que cal corregir i un símptoma de l'estat de la màquina o instal·lació.

Des del punt de vista de pertorbació, l'experiència o normes com la ISO 10816 donen criteris per jutjar la severitat de les vibracions de les màquines, mesurant-les externament, en general sobre o prop dels suports de coixinets dels elements rotatoris. La norma ISO 10816-1995 defineix per a grups específics de màquines i en un annex



informatiu uns límits típics de zones d'avaluació expressats en valor eficaç de la velocitat de vibració dins de tota la banda freqüencial (banda ampla). A la taula 1 es mostra el contingut d'aquest annex. En el cos de la mateixa norma es defineixen les zones d'avaluació que es mostren a la taula 2.

En el cos de la norma es proposa que els límits de les zones d'avaluació siguin constants per a la banda central de freqüències i en els extrems es modifiquin per disminuir a baixes i altes freqüències. A la figura 4 es mostra aquesta proposta.

Taula 1. Criteri provisional de vibracions de banda ampla per grups específics de màquines (segons norma ISO 10816-1995).

Velocitat de vibració (valor eficaç) mm/s	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	B
1,8				
2,8	C	C	C	C
4,5				
7,1	D	D	D	D
11,2				
18				
28				
45				

Classificació de les màquines

Classe I: Components individuals de màquines i motors, íntegrament connectats a la màquina completa en les seves condicions normals d'operació. Els motors elèctrics de producció de fins a 15 kW són exemples d'aquesta categoria.

Classe II: Màquines de mitjana dimensió (típicament motors elèctrics d'entre 15 kW i 75 kW) sense fonaments especials, motors i màquines (fins a 300 kW) en fonaments especials.



Classe III: Grans generadors i altres grans màquines amb inèrcies giratòries muntades en fonaments rígids i pesats que són relativament rígids en la direcció de mesura de les vibracions.

Classe IV: Grans generadors i altres grans màquines amb inèrcies giratòries muntades en fonaments que són relativament tous en la direcció de mesura de les vibracions (per exemple, conjunts turbogeneradors i turbines de gas amb sortides més grans que 10 MW).

Taula 2. Zones típiques d'avaluació definides per permetre una valoració qualitativa de la vibració d'una màquina i per proporcionar pautes de possibles accions (segons norma ISO 10816-1995).

Zona	
A	La vibració de màquines acabades de posar en servei sol caure dins aquesta zona.
B	Les màquines amb vibració dins d'aquesta zona es consideren normalment acceptables per funcionar de manera il·limitada
C	Les màquines amb vibració dins d'aquesta zona es consideren normalment no adequades per funcionar contínuament de manera il·limitada. En general, la màquina pot funcionar per un període limitat en aquestes condicions fins que aparegui una oportunitat per fer una reparació.
D	Valors de vibració dins d'aquesta zona es consideren normalment de suficient severitat per causar avaries a la màquina.

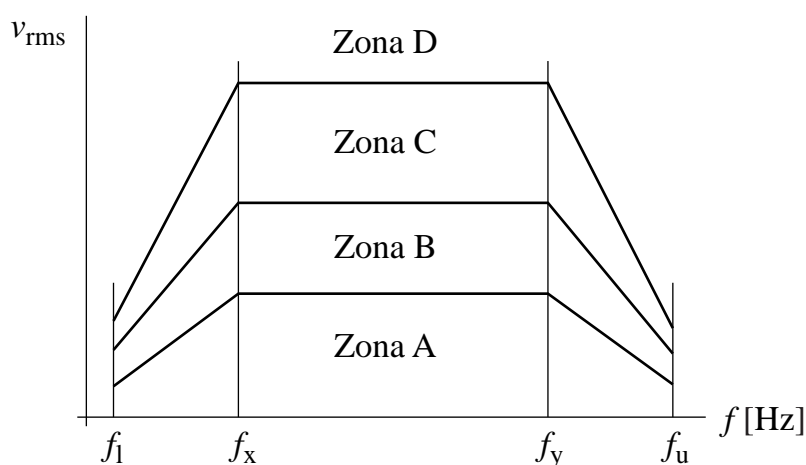


Figura 4. Forma general dels nivells de vibració que limiten les zones d'avaluació (segons norma ISO 10816-1995).



3 Monitoritzat de l'estat de les màquines per vibracions

Des del punt de vista del manteniment, cal, a part de valorar la severitat de la vibració, tenir informació de les seves causes. Aquesta informació es troba en el contingut freqüencial i en la forma d'ona de la vibració.

El manteniment és el conjunt d'actuacions que cal fer sobre una màquina o instal·lació per tal de garantir la seva capacitat per realitzar correctament la tasca que té encomanda. Segons com es planifiquin i realitzin aquestes actuacions es distingeixen els següents tipus de manteniment:

Manteniment correctiu. Aquest tipus de manteniment també es pot anomenar “a ruptura”; només s'intervé en els equips quan s'ha produït una fallada i cal reparar-los perquè puguin continuar realitzant la seva tasca.

Manteniment preventiu. Les fallades imprevistes poden tenir conseqüències catastròfiques per a la integritat dels equips i de les persones i conseqüències econòmiques importants, per exemple en aturades no programades de la producció. Per intentar evitar aquestes fallades, a més del que usualment s'anomena entreteniment o manteniment rutinari (neteja, canvis d'oli, substitució d'alguna peça independentment del seu estat etc.) es pot fer un manteniment preventiu que consisteix a realitzar inspeccions rutinàries (segons un pla establert) durant les quals s'analitzen aspectes diversos de la màquina que poden comportar desmuntar-la, més o menys, i substituir components. Aquest procediment sol ser car (es canvien elements que no han arribat al final de la seva vida útil), es desmunta una cosa que funciona amb el risc d'un nou muntatge defectuós, etc. i sempre cal assumir la possibilitat d'avaries entre inspeccions consecutives.

Manteniment predictiu. També es pot anomenar “manteniment segons estat o condició” i es basa en el coneixement de l'estat de l'equip per mitjà d'un conjunt d'indicadors quantificables (temperatura de l'oli, nivell de vibració en un suport, nivell de so emès...) dels quals se'n fa un seguiment o *monitoritzat* (per exemple, monitoritzat per vibracions de l'estat de les rodes dels trens d'una línia de ferrocarril). L'evolució temporal d'aquests indicadors i la seva interpretació permet identificar i quantificar la variació de característiques de components (jocs, viscositats...) que incideixen en el correcte funcionament i són causades pel desgast o envelliment d'aquests components i, a vegades, per l'acumulació d'elements estranys -residus, brutícia... Aquesta identificació i quantificació permeten preveure tant la necessitat



d'intervenir en l'equip com la vida útil restant de certs components; d'aquesta manera, es poden programar les operacions de manteniment sense arriscar-se des del punt de vista de la seguretat i sense provocar aturades de producció en moments inoportuns. La bondat del procediment és millor com millor es conegui l'equip i millors siguin els sistemes de captació i d'anàlisi de les magnituds físiques dels indicadors emprats.

Las vibracions en punts externs de les màquines, sovint suports d'elements mòbils (per exemple, coixinets de rotors), són un dels indicadors més emprats per al monitoritzat de l'estat de màquines petites o grans i per a la identificació ja sigui de defectes inicials en màquines noves o de variacions de característiques per l'ús. La taula 3 és un resum clàssic dels defectes en màquines i la freqüència de les vibracions que generen.

Taula 3. Components freqüencials de la vibració associada a la presència de defectes en els elements de màquines. f_0 és la freqüència de rotació de l'eix principal (segons Cempel, 1991).

Descripció del defecte	Freqüència de vibració	Direcció de vibració	Observacions
Desequilibri d'un element rotatiu	f_0	Radial	Causa comú de vibracions en les màquines. Amplitud proporcional al desequilibri.
Desalineació o flexió d'un eix	$f_0, 2f_0, 3f_0$	Radial i axial	Si l'amplitud del component $2f_0$ (axial) excedeix el 75% del component f_0 , aquest defecte pot causar l'avaría de la màquina.
Element deteriorat d'un rodament	Impulsos de freqüència relacionada amb la de rotació i amb el tipus d'element deteriorat. També vibracions en la banda alta de freqüències (de 20 kHz a 60 kHz)	Radial i axial	Impulsos de freqüència relacionada amb el defecte. β angle de contacte, n n de elements rodants, f_r freqüència de rotació relativa de les pistes, f freqüència dels impulsos, d diàmetre de l'element rodant, D diàmetre de la trajectòria dels centres dels elements rodants.



Descripció del defecte	Freqüència de vibració	Direcció de vibració	Observacions
			<p>Defecte en la pista externa:</p> $f = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right)$ <p>Defecte en la pista interna:</p> $f = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta \right)$ <p>Defecte en un element rodant:</p> $f = \frac{D}{d} f_r \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \beta \right)^2 \right)$ <p>Joc a la gàbia:</p> $f = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right)$
Joc en el muntatge de coixinets de fricció	$1/2 f_0, 1/3 f_0$ subharmònics de la rotació	Radial	Aquests jocs es mostren només a determinades freqüències i determinades temperatures, per exemple en turbogeneradors.
Inestabilitat de la pel·lícula d'oli en un coixinet de fricció (formació de vòrtex)	Des de $0,2 f_0$ a $0,48 f_0$	Principalment radial	Sempre menor que $1/2 f_0$. Es produeix freqüentment en màquines i turbines d'alta velocitat.
Defecte en engranatges	$n f_0, z f_0$ i subharmònics z nombre de dents	Radial i axial	Les bandes espectrals a l'entorn de la freqüència de l'engranament indiquen excentricitat de les rodes.
Joc en els parells giratoris, joc en la fixació	$f_0, 2 f_0$	Radial o axial	Usualment relacionat amb el desequilibri i el desalineament.
Corretja de transmissió malmesa	$f_0, 2 f_0, 3 f_0, 4 f_0$ (f_0 de la corretja)	Radial	Aquest defecte es detecta fàcilment amb un estroboscopi.
Forces i moments desequilibrats en moviments alternatius	f_0 i harmònics superiors depenent de l'ordre del desequilibri	Principalment radial	Només es poden reduir amb canvis constructius o amb l'aïllament de vibracions.

Descripció del defecte	Freqüència de vibració	Direcció de vibració	Observacions
Pulsacions en fluids	$n f_0$ i harmònics superiors n nombre de àleps, cilindres, etc.	Radial i axial	En el cas de coincidir amb freqüències pròpies de l'estructura poden causar fallades.
Vibracions en màquines de corrent altern	$f_e, 2f_e$ f_e freqüència de la xarxa elèctrica	Radial o axial	Desapareixen després de desconnectar el corrent elèctric.

4 Les vibracions a les estructures i edificis

La incidència de la vibració en les estructures i edificis es tracta en diferents normes. Una de les més emprades i de reconegut prestigi és la norma DIN 4150 *Vibracions estructurals* (edició actual de 1999). La part 3 d'aquesta norma, *Efectes de les vibració en les estructures*, dóna valors de referència per sota dels quals no es produiran danys que tinguin un efecte negatiu en la utilitat de l'estructura. S'entén per dany qualsevol efecte permanent de la vibració que redueix la utilitat d'una estructura o d'un dels seus components. Per a estructures de les categories 2 i 3 de les taules 4 i 5, la utilitat es considera que s'ha reduït si:

- Es formen esquerdes en les superfícies enguixades de les parets.
- Augmenten les esquerdes existents en l'edifici.
- Es separen els envans de les parets de càrrega o dels forjats.

L'avaluació de la vibració en aquesta norma es fa en base al valor màxim absolut de la velocitat, no ponderada, en tres direccions ortogonals, v_i (on $i = x, y$ o z). Es distingeix l'efecte de la vibració en l'estructura com un tot i en els forjats. També es diferencia entre vibració de curta i de llarga durada. Es considera de *curta durada* aquella que no succeeix prou sovint per causar fatiga estructural i que no produeix ressonància en l'estructura de l'edifici; en tot altre cas, es considera de llarga durada. Els valors de referència s'indiquen a les taules 4 i 5.

Pel que fa als forjats, la norma DIN 4150 dóna valors de referència de la velocitat de vibració per ser utilitzats quan s'hi avaluen els efectes de les vibracions de llarga durada i diu:



“L’ experiència ha demostrat que velocitats de vibració vertical de fins a 10 mm/s no causen danys en els forjats de les categories 1 i 2 de la taula, inclús si s’ utilitza la màxima tensió de disseny. Tal vibració és perceptible molt clarament. Per a estructures de categoria 3 de la taula, no es poden donar valors de referència per a la vibració vertical.

Danys menors no es poden atribuir automàticament a la càrrega dinàmica i són necessàries més investigacions”.

Altres normes fan referència a vibracions produïdes per causes específiques en estructures; aquest és, per exemple, el cas de la norma UNE 22-381-93 *Control de vibracions produïdes per voladures*.

Taula 4. Valors de referència de la velocitat de vibració per ser utilitzats quan s’avaluen els efectes de les vibracions de curta durada en les estructures (segons DIN 4150).

Categoria	Tipus d’estructura	Valors de referència per a la velocitat, v_j , en mm/s			
		Vibració en els fonaments a la freqüència de			Vibració en el pla horitzontal del pis més alt a totes les freqüències
		1 Hz a 10 Hz	10 Hz a 50 Hz	50 Hz a 100 Hz (*)	
1	Edificis utilitzats per a usos comercials, edificis industrials, i edificis de disseny similar.	20	20 a 40	40 a 50	40
2	Habitatges i edificis de disseny i/o ocupació similar.	5	5 a 15	15 a 20	15
3	Estructures que, a causa de la seva particular sensibilitat a les vibracions, no poden ser classificades a les categories 1 o 2 i que són de gran valor intrínsec (p.e. edificis catalogats en ordres de preservació).	3	3 a 8	8 a 10	8

De 1 Hz a 10 Hz el valor de referència és constant. De 10 Hz a 50 Hz i de 50 Hz a 100 Hz el valor de referència creix linealment.
 (*) A freqüències superiors als 100 Hz, els valors donats a l’última columna es poden utilitzar com valors mínims.



Taula 5. Valors de referència de la velocitat de vibració per ser utilitzats quan s'avaluen els efectes de les vibracions de llarga durada en les estructures (segons DIN 4150).

Categoria	Tipus d'estructura	Valors de referència per a la velocitat, v_i , en mm/s, de vibració en el pla horitzontal del pis més alt a totes les freqüències
1	Edificis utilitzats per a usos comercials, edificis industrials, i edificis de disseny similar.	10
2	Habitatges i edificis de disseny i/o ocupació similar.	5
3	Estructures que, a causa de la seva particular sensibilitat a les vibracions, no poden ser classificades a les categories 1 o 2 i que són de gran valor intrínsec (p.e. edificis catalogats en ordres de preservació).	2,5

5 Efecte de les vibracions sobre les persones en els edificis residencials, en els llocs de treball i en els transports.

Les persones estan sotmeses a vibracions en situacions i circumstàncies diverses, tenen diferent resposta i resistència físiques i psicològiques a estímuls externs, diferents cultures i diferent nivell de satisfacció (o de percepció d'aquesta satisfacció), de necessitats vitals o no. Tot això fa molt difícil fer una valoració absoluta de l'efecte de les vibracions sobre les persones com individus i com membres d'una comunitat.

En general, es considera que les vibracions (no el so) afecten fonamentalment al cos de manera global: vibració de cos sencer o a les mans i braços (vibració mà-braç, causada per eines manuals com moto-serres, desbarbadores...). Les normes ISO que les tracten són: ISO 2631 *Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration* i UNE EN ISO 5349 *Mechanical vibration-Guidelines for the measurement and assessment of human exposure to hand-transmitted vibration*. La directiva europea 2002/44/CE estableix les disposicions mínimes de seguretat i de salut relatives a l'exposició dels treballadors a les vibracions.

Evidentment, la vibració mà-braç és un tema molt específic i que afecta una part ben determinada de la població i una exposició llarga a vibracions intenses pot causar, per exemple, la malaltia dels dits blancs o la síndrome dels dits morts. Per raons clares,



aquesta vibració es tracta a part de la norma citada, en normes i legislació relacionades amb seguretat i higiene en el treball. La seva avaluació es fa en base al valor eficaç de la vibració ponderada amb filtres normalitzats.

A molt baixa freqüència, els moviments oscil·latoris constitueixen un cas especial ja que el seu efecte no és causat per esforços, és el mareig, que no és un procés patològic sinó una resposta normal dels individus que no estan acostumats a aquests moviments. Les vibracions de cos sencer es consideren significatives dins de la banda freqüencial compresa entre 1 Hz i 80 Hz. S'avaluen en base al valor eficaç de la vibració ponderada amb filtres normalitzats. Per valorar-les cal considerar quina activitat realitzen els individus dins d'un entorn vibratori determinat. Això porta a la següent possible classificació de zones segons l'activitat:

- Zones d'especial atenció (p.e. hospitals, laboratoris específics...). En aquestes zones el nivell de vibració ha de ser extraordinàriament baix per a les persones (per sota del llindar de percepció) i per a la sensibilitat de certs instruments.
- Zones residencials (s'hi poden incloure biblioteques i potser també centres escolars...). Aquí la vibració cal valorar-la com molèstia a causa de la intrusió d'una pertorbació exterior que representa. El nivell de vibració es pot situar al voltant del llindar de percepció i cal tenir en compte que sovint el receptor confon la percepció de la vibració amb la del so que produeixen els tancaments, parets, sostres i forjats, a causa de la vibració. No només és el nivell de la vibració el que caldria tenir en compte per valorar-la, ja que en la sensació de molèstia intervenen l'horari, la repetitivitat, etc.
- Zones comercials (s'hi poden incloure oficines, probablementment escoles en moltes hores d'activitat ...). Les vibracions, si són clarament perceptibles poden causar malestar, pèrdua de concentració i de capacitat de treball. Com en el cas anterior, cal prendre en consideració no només el nivell de vibració.
- Zones industrials (s'hi poden incloure oficines de tallers, tallers, cadenes de muntatge...). Les vibracions, si són notables, poden causar pèrdua de capacitat de treball, fatiga.
- Llocs de treball. Si són propers a màquines que produeixen una vibració intensa o en instal·lacions especialment vibratòries cal fer atenció no només a la possible fatiga ja que una exposició perllongada a nivells alts de vibració pot causar malalties.
- Vehicles de transport. En aquest cas, cal distingir entre els treballadors (conductors, etc.) i els passatgers. Per als primers cal tractar el vehicle com a lloc de treball. Per als passatgers cal establir, en principi, criteris de comoditat.



La Llei 16/2002 de 28 de juny de 2002 de Catalunya (*Llei de protecció contra la contaminació acústica*) defineix els nivells d'avaluació de la immissió de les vibracions a l'interior dels edificis i la magnitud a mesurar (L_{aw}) per quantificar aquesta immissió. Aquest nivell és el valor eficaç de la vibració ponderada expressat en dB. El nivell L_{aw} màxim permès en aquesta llei és de 70 dB a 80 dB segons la zona de sensibilitat, que ha de ser definida per l'administració corresponent. El procediment per obtenir aquesta magnitud és d'aplicació raonable, prescindint del punt 2.1.5 de l'Annex 7.

6 Bibliografia

Brüel&Kjær .(2002). *Human Vibration*. Denmark.

Cempel, C. (1991). *Vibroacoustic condition monitoring*. England: Ellis Horwood Limited.

Directiva europea 2002/44/CE. *Disposicions mínimes de seguretat i de salut relatives a l'exposició dels treballadors a les vibracions*.

Figliola, R. S.; Beasley, D. E. (2000). *Theory and Design for Mechanical Measurements*. New York. John Wiley & Sons.

Gómez de León, F. C. (1998). *Tecnología del mantenimiento industrial*. Universidad de Murcia: Servicio de publicaciones.

Llei 16/2002 de Catalunya *Llei de protecció contra la contaminació acústica*.

Norma DIN 4150 (1999). *Structural vibration*.

Norma ISO 2631. *Mechanical vibration and shock—Evaluation of human exposure to whole-body vibration*.

Norma ISO 4866 (1990). *Mechanical vibration and shock. Vibration of buildings*.

Norma ISO 8041 (2005). *Human response to vibration—Measuring instrumentation*.

Norma ISO 10816 (1995). *Mechanical vibration—Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts*.

Norma UNE-EN-ISO 5349. *Mechanical vibration—Guidelines for the measurement and assessment of human exposure to hand-transmitted vibration*.

