

1. INTRODUCCIÓN
2. TEORÍA FUNDAMENTAL DEL CÁLCULO DINÁMICO
3. DEFINICIÓN “IN SITU” DE LA ESTRUCTURA
4. ENSAYOS DINÁMICOS
- 5. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE VIBRACIONES.**
 - 5.1. CRITERIOS ESTRUCTURALES.
 - 5.2. CRITERIOS PSICOLÓGICOS.
 - 5.3. CRITERIOS DE PRODUCCIÓN.
6. MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA
7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS
8. CONCLUSIONES
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
10. AGRADECIMIENTOS
11. ANEJOS

5. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE VIBRACIONES

En ingeniería y arquitectura las magnitudes de las oscilaciones o vibraciones de las estructuras (frecuencias, aceleraciones, velocidades, desplazamientos...) medidas o calculadas deben evaluarse en función de si los efectos de estas vibraciones son o no tolerables. Con este objetivo, en este apartado se describen distintos criterios de aceptación de vibraciones expuestos en diversas normas de construcción que permiten valorar su grado de afectación a la estructura, personas o actividades. Los criterios para la aceptación o limitación de los valores tolerables en estructuras peatonales o edificios se definen en relación a los tres siguientes posibles efectos:

- Sobreesfuerzos en los elementos que forman la estructura (deformaciones, fatiga, tensiones...).
- Efectos psicológicos o de sensaciones en las personas (mecánicos, acústicos, ópticos...).
- Efectos en actividades profesionales o procesos productivos (problemas con las tolerancias de algunos productos...) así como también incremento de tensiones en maquinaria (deformaciones, fatiga, esfuerzos...).

Resulta relativamente complejo discernir entre valores aceptables o inaceptables para los tres efectos descritos en el párrafo anterior. Los efectos psicológicos sobre las personas responden a parámetros de sensibilidad personales y por lo tanto resultan de difícil evaluación objetiva dada la posibilidad de valoraciones subjetivas individuales distintas. Tampoco resulta sencillo valorar los efectos de las vibraciones en la maquinaria o instalaciones de algún proceso productivo, mientras que los valores tolerables o aceptables para evitar sobreesfuerzos en estructuras pueden determinarse de manera más segura, pues se pueden medir y valorar de manera real. Los valores límite para las vibraciones pueden darse mediante valores de aceleración, velocidad, desplazamientos, amplitudes, frecuencias o cantidades empíricas derivadas de las anteriores.

Con el objetivo de diferenciar los distintos efectos que pueden producir las vibraciones y sus valores aceptables, dividiremos este apartado en tres tipos de criterios para valorar su aceptación:

1. Criterios estructurales.
2. Criterios psicológicos.
3. Criterios de calidad en la producción.

En ninguno de los casos los criterios que se describen a continuación deben ser considerados como límites para determinar con absoluta certeza la idoneidad o no de una estructura desde alguno de los puntos de vista descritos anteriormente, y deben tomarse como herramientas para realizar valoraciones relativas sobre la construcción.

5.1 CRITERIOS ESTRUCTURALES

Las vibraciones producidas por las personas, maquinaria, tráfico de vehículos, trabajos de construcción, etc... pueden causar deformaciones, así como pequeñas o grandes afectaciones a los edificios o a los elementos estructurales o no estructurales que los constituyen. Algunas de estas incidencias son,

- rotura, agrietamiento o fisuración de paredes o forjados del edificio.
- empeoramiento de patologías existentes por otras causas de elementos estructurales o no-estructurales.
- caídas de equipos o maquinaria de trabajo con los consecuentes daños en equipos o personas.

Las vibraciones continuadas, además de los efectos descritos anteriormente, pueden producir en las estructuras de los edificios problemas de fatiga, incremento de tensiones o sobreesfuerzos en los elementos resistentes principales de la estructura. Los criterios de aceptación de los valores de las vibraciones deben tener en cuenta los siguientes factores entre otros: calidad y características de los materiales de construcción (especialmente la ductilidad), tipología del edificio, propiedades de la cimentación del edificio, dimensiones de los principales elementos resistentes, edad de la construcción, duración de los efectos de las vibraciones, caracterización de la oscilación... En la figura 7.1 se muestran la totalidad de daños estructurales esperables en función de distintos parámetros (frecuencia, velocidad pico, aceleración pico, desplazamiento pico...) según [5] y [6].

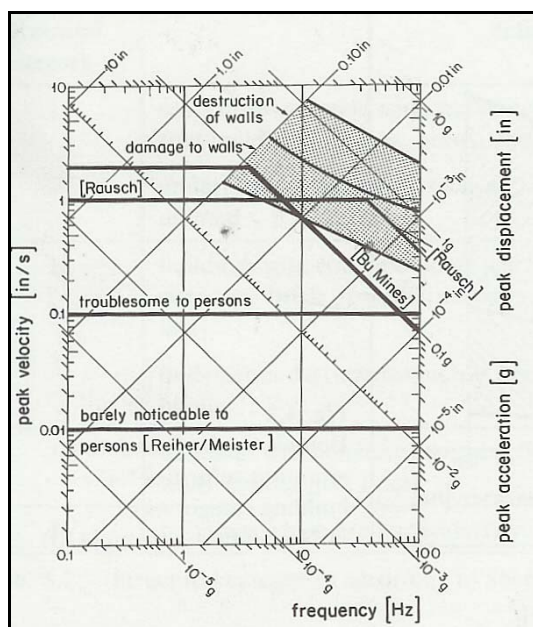


Figura 5.1: Espectro de respuesta de los efectos de las vibraciones en personas y estructuras. [5] [6]

Aunque los criterios de aceptación se toman de manera independiente de la frecuencia, los valores más convenientes como indicadores varían en función del rango de frecuencia; mientras que el límite para las vibraciones lo marca la velocidad para frecuencias bajas, para frecuencias altas, debemos atender a las aceleraciones pico. A pesar de esto, la mayoría de los criterios se basan en valores de velocidades.

A continuación describimos algunos de los criterios de aceptación de vibraciones según parámetros de afectación estructural descritos en bibliografía o normativas internacionales.

5.1.1 Normativa DIN 4150, Parte 3 (1999) [7]

La normativa alemana DIN 4150 en su tercera parte trata los efectos en edificios y sus elementos estructurales de vibraciones de carácter internas o externas. Para la valoración mediante este criterio, las velocidades, las frecuencias o las tensiones debidas a las cargas dinámicas si es necesario, se comparan con los valores del criterio. Partiendo de los tiempos de actuación de las vibraciones aparecen tres criterios de aceptación:

- Vibraciones estructurales de corta duración (transitorias).
- Vibraciones estructurales permanentes.
- Vibraciones permanentes particulares de los forjados.

Para esta normativa, el objetivo es marcar los límites en las vibraciones que no supongan para el edificio perder su uso habitual. La reducción del uso del edificio por efecto de las vibraciones incluye la afectación de la estabilidad del edificio o de alguno de sus componentes o la reducción de la capacidad resistente de los forjados. Para las estructuras incluidas en los tipos “Line 2” y Line 3” su uso se puede ver reducido si aparecen fisuras o grietas en las superficies de las paredes, empeoran fisuras o grietas existentes o si las particiones o tabiquerías se ven afectadas por la pérdida de resistencia de los forjados. Estos tipos de lesiones se consideran menores pero pueden suponer una pérdida de servicio del edificio.

En la tabla 5.1 y la figura 5.2 se dan los valores de las velocidades máximas para la cimentación y para el plano del piso más alto de varios tipos de edificios para vibraciones de corta duración. Si se cumplen estos valores, ningún efecto dinámico debería producir daños importantes para provocar la pérdida de servicio del edificio cosa que supondría que la posible aparición de patologías tendría otras causas. En cambio, el hecho de superar dichos valores, no supone obligatoriamente la aparición de los daños descritos anteriormente.

5. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE VIBRACIONES

Line	Type of structure	Guideline values for velocity, v_v , in mm/s			
		Vibration at the foundation at a frequency of			Vibration at horizontal plane of highest floor at all frequencies
		1 Hz to 10 Hz	10 Hz to 50 Hz	50 Hz to 100 Hz*)	
1	Buildings used for commercial purposes, industrial buildings, and buildings of similar design	20	20 to 40	40 to 50	40
2	Dwellings and buildings of similar design and/or occupancy	5	5 to 15	15 to 20	15
3	Structures that, because of their particular sensitivity to vibration, cannot be classified under lines 1 and 2 and are of great intrinsic value (e.g. listed buildings under preservation order)	3	3 to 8	8 to 10	8

*) At frequencies above 100 Hz, the values given in this column may be used as minimum values.

Tabla 5.1: Valores para las velocidades de vibración para evaluar los efectos en las estructuras de vibraciones de corta duración. [7]

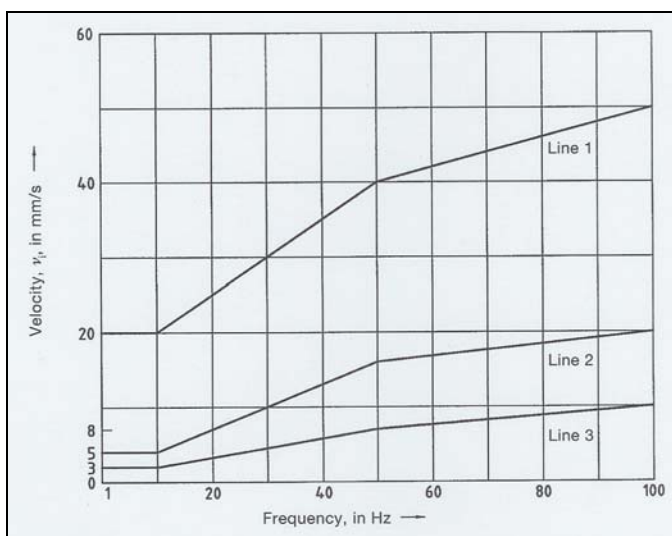


Figura 5.2: Gráficas para las velocidades máximas de las cimentaciones para distintas categorías de edificios para vibraciones de corta duración. [7]

Para el caso de estudio de los forjados, la norma alemana establece como valor límite, para no producirse reducción del servicio o uso de los edificios sometidos a vibraciones de corta duración, una velocidad v_z no superior a los 20 mm/s. En los edificios encuadrados en la “line 3” será necesario prever valores inferiores para evitar los daños.

En la tabla 5.2 se dan los valores de las velocidades máximas para el plano del piso más alto de varios tipos de edificios para vibraciones de larga duración. Al igual que en el caso de vibraciones de corta duración, si se cumplen estos valores, ningún efecto dinámico debería producir daños importantes para provocar la pérdida de servicio del edificio cosa que supondría que la posible aparición de patologías tendría otras causas. En cambio, el hecho de superar dichos valores, no supone obligatoriamente la aparición de los daños descritos anteriormente.

Line	Type of structure	Guideline values for velocity, v_i , in mm/s, of vibration in horizontal plane of highest floor, at all frequencies
1	Buildings used for commercial purposes, industrial buildings, and buildings of similar design	10
2	Dwellings and buildings of similar design and/or occupancy	5
3	Structures that, because of their particular sensitivity to vibration, cannot be classified under lines 1 and 2 and are of great intrinsic value (e.g. listed buildings under preservation order)	2,5

Tabla 5.2: Valores para las velocidades de vibración en el plano horizontal del último piso para evaluar los efectos en las estructuras de vibraciones de larga duración. [7]

Los efectos sobre los forjados de las vibraciones de larga duración se valoran en la norma alemana mediante una formulación, pero como indicación general se limita la velocidad máxima en dirección vertical a 10 mm/s debiendo estudiar de manera particular los edificios de tipo “Line 3”.

5.1.2 Normativa SN 640312 (1978) [8]

La Asociación Suiza de Ingenieros de Carreteras en su normativa SN 640312, diferencia cuatro tipos de construcciones o edificios de acuerdo principalmente con el tipo de construcción, tal como se observa en la tabla 5.3.

En este caso, el dato para aplicar el criterio de aceptación de esta normativa es la velocidad pico de las vibraciones, considerando dos casos distintos en función de la causa de las vibraciones (fuente de origen que las provoca) que se distinguen también en su forma de producirse; el primer grupo incluye tráfico, maquinaria y equipos de trabajo mientras que el segundo se refiere a vibraciones producidas por explosiones que al ser poco frecuentes se permiten límites superiores. Los valores máximos admisibles para cada caso se muestran en la tabla 5.4.

5. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE VIBRACIONES

structural category	definition
I	reinforced-concrete and steel structures (without plaster) such as industrial buildings, bridges, masts, retaining walls, unburied pipelines; underground structures such as caverns, tunnels, galleries, lined and unlined
II	buildings with concrete floors and basement walls, above-grade walls of concrete, brick or ashlar masonry; ashlar retaining walls, buried pipelines; underground structures such as caverns, tunnels, galleries, with masonry lining
III	buildings with concrete basement floors and walls, above-grade masonry walls, timber joist floors
IV	buildings which are particularly vulnerable or worth protecting

Tabla 5.3: categorías estructurales. [8] [5]

structural category	source M		source S	
	f [Hz]	v_{\max} [mm/s]	f [Hz]	v_{\max} [mm/s]
I	10 ÷ 30	12	10 ÷ 60	30
	30 ÷ 60	12 ÷ 18*	60 ÷ 90	30 ÷ 40**
II	10 ÷ 30	8	10 ÷ 60	18
	30 ÷ 60	8 ÷ 12*	60 ÷ 90	18 ÷ 25**
III	10 ÷ 30	5	10 ÷ 60	12
	30 ÷ 60	5 ÷ 8*	60 ÷ 90	12 ÷ 18**
IV	10 ÷ 30	3	10 ÷ 60	8
	30 ÷ 60	3 ÷ 5*	60 ÷ 90	8 ÷ 12**

source M: machinery, traffic, construction works – (*) the lower value applies to 30 Hz, the upper to 60 Hz, with interpolation in between.
source S: blasting operations – (**) the lower value applies to 60 Hz, the upper to 90 Hz, with interpolation in between.

Tabla 5.4: Criterios de aceptación según en función de las categorías de edificios y tipo de vibraciones. [8] [5]

5.1.3 Directriz KDT 046/72 (1972) [9]

La directriz presentada por la Cámara Tecnológica de la antigua República Democrática Alemana, también diferencia cuatro tipos de edificaciones o construcciones para los que proporciona unos valores límite para sus velocidades pico en caso de oscilaciones, tal como se puede ver en la tabla 5.5.

	building category	$v_{z,adm}$ [mm/s]
I	historical monuments	2
II	half-timbered houses	5
III	wall construction (e.g. buildings of slab walls, blocks, masonry)	10
IV	framed construction (e.g. buildings of steel, reinforced concrete, timber)	30

Tabla 5.5: Categorías de edificios y velocidades admisibles. [9] [5]

Los valores límite que la directriz alemana expone para vibraciones debidas a explosiones para las distintas categorías de edificios expuestas en la tabla 5, se muestran en la figura 5.3.

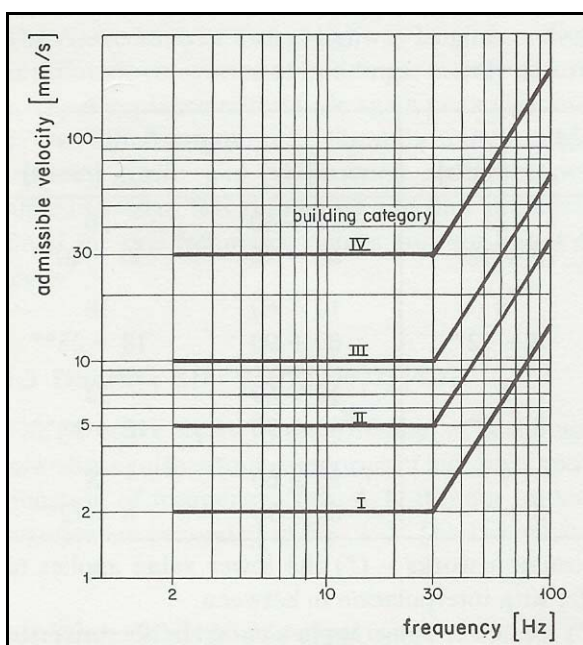


Figura 5.3: Límites para las velocidades de vibración debidas a explosiones en función de la categoría del edificio. [9] [5]

5.1.4 Normativa ISO 4866 (1990) [10]

En la normativa ISO 4866 “*Mechanical vibration and shock-Vibration of buildings-Guidelines for the measurement of vibrations and the evaluation of their effects o buildings*” no se especifica propiamente ningún criterio para la aceptación de vibraciones en las estructuras. En cambio, en su anejo A, se define una clasificación de los edificios en 14 categorías distintas de acuerdo con su tipología, cimentación, tipo de terreno, importancia del edificio, etc.

En la tabla 5.6 se muestra la clasificación de las estructuras en ocho tipos distintos en función del tipo de edificio según la ISO 4866. Los grupos de edificios 1 y 2 hacen referencia a la antigüedad de la construcción. El grupo 1 hace referencia a edificios antiguos o construidos más recientemente pero con técnicas, materiales y maquinaria antigua. Este tipo de edificaciones suelen ser pesadas pero con materiales poco resistentes y tienen un coeficiente de amortiguamiento elevado. El grupo 2 se refiere a estructuras modernas que suelen ser más ligeras y con materiales más resistentes en todas sus direcciones, y un coeficiente de amortiguamiento pequeño.

Category of structure	Group of building (see clause A.4)		
	1	2	
Resistance to vibration decreasing	1	Heavy industrial multi-storey buildings, five to seven storeys high, including earthquake-resistant forms Heavy structures, including bridges, fortresses, ramparts	Two- and three-storey industrial, heavy-frame buildings of reinforced concrete or structural steel, clad with sheeting and/or infilling panels of blockwork, brickwork, or precast units, and with steel, pre-cast or <i>in situ</i> concrete floors Composite, structural steel and reinforced concrete heavy industrial buildings
	2	Timber frame, heavy, public buildings, including earthquake-resistant forms	Five- to nine-storey (and more) blocks of flats, offices, hospitals, light-frame industrial buildings of reinforced concrete or structural steel, with infilling panels of blockwork, brickwork, or precast units, not designed to resist earthquakes
	3	Timber-frame, single- and two-storey houses and buildings of associated uses, with infilling and/or cladding, including "log cabin" kinds, including earthquake-resistant forms	Single-storey moderately lightweight, open-type industrial buildings, braced by internal cross walls, of steel or aluminium or timber, or concrete-frame, with light, sheet-cladding, and light panel-infilling, including earthquake-resistant types
	4	Fairly heavy multi-storey buildings, used for medium warehousing or as living accommodation varying from five to seven storeys or more	Two-storey, domestic houses and buildings of associated uses, constructed of reinforced blockwork, brickwork or precast units, and with reinforced floor and roof construction, or wholly of reinforced concrete or similar, all of earthquake-resistant types
	5	Four- to six-storey houses, and buildings of associated urban uses, made with blockwork or brickwork, load-bearing walls of heavier construction, including "stately homes" and small palace-style buildings	Four- to ten-storey domestic and similar buildings, constructed mainly of lightweight load-bearing blockwork and brickwork, calculated or uncalculated, braced mostly by internal walls of similar material, and by reinforced concrete, preformed or <i>in situ</i> floors at least on every other storey.
	6	Two-storey houses and buildings of associated uses, made of blockwork, brickwork or pis-à-terre, with timber floors and roof Stone- or brick-built towers, including earthquake-resistant forms	Two-storey domestic houses and buildings of associated uses, including offices, constructed with walls of blockwork, brickwork, precast units, and with timber or precast or <i>in situ</i> floors and roof structures
	7	Lofty church, hall and similar stone- or brick-built, arched or "articulated" type structures, with or without vaulting, including arched smaller churches and similar buildings Low heavily constructed "open" (i.e. non-cross-braced) frame church and barn type buildings including stables, garages, low industrial buildings, town halls, temples, mosques, and similar buildings with fairly heavy timber roofs and floors	Single- and two-storey houses and buildings of associated uses, made of lighter construction, using lightweight materials, pre-fabricated or <i>in situ</i> , separately or mixed
	8	Ruins and near-ruins and other buildings, all in a delicate state All class 7 constructions of historical importance	

Tabla 5.6: Categorías de las estructuras de acuerdo con su grupo de edificio. [10]

5. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE VIBRACIONES

En la tabla 5.7 se muestra la clasificación de los edificios de acuerdo con su resistencia a las vibraciones. La categoría del edificio se obtiene de la tabla 4, mientras que las dos letras (mayúscula y minúscula) responden al tipo de cimentación y al tipo de terreno según las siguientes clasificaciones:

Tipo de cimentación:

Clase A: pilotes de hormigón armado, metálicos o de madera unidos, muro de gravedad o zapatas de hormigón armado.

Clase B: Pilotes con encepados, muros con zapata corrida, zapatas de hormigón en masa y pilotes de madera.

Clase C: muros de contención ligeros, grandes piedras o sin cimentación.

Tipo de terreno:

Tipo a: rocas sin fisurar, o ligeramente fisuradas y arenas cementadas.

Tipo b: terrenos compactos y macizados.

Tipo c: terrenos poco compactos y macizados.

Tipo d: terrenos con pendiente y con planos potenciales de deslizamiento.

Tipo e: suelos granulares, grava, suelos no cohesivos y arenas cohesivas saturadas.

Tipo f: rellenos.

Class of building ¹⁾	Category of structure (see table A.1)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
	Categories of foundations (capital letters) and types of soil (lower case letter) (see clause A.5 and clause A.6)								
Level of acceptable vibration decreasing ↓	1	A a							
	2	A b	A a	A a	A a				
	3		A b B a	A b B a	A b	A a A b			
	4		A c B b	B b	A c	A c B a B b			
	5		B c	A c		B c	B a		
	6		A f		A d	B d	B b C a	B a	
	7			A f	A e	B e	B c C b	B b C a	
	8						B e C c	B c C b	
	9		B f				C d	B d C c	A a
	10			B f			C e	B e C d	A b
	11				C f	C f		C e	B a
	12						C f		B c C a
	13							C f	B d C b C c
	14								C d C e C f

1) High class number = high degree of protection required.

Tabla 5.7: Clasificación de los edificios de acuerdo con su resistencia a las vibraciones y la tolerancia aceptable para los efectos de las vibraciones. [10]

5.2 CRITERIOS PSICOLÓGICOS

La sensibilidad humana a las vibraciones de los edificios o estructuras es muy sutil. Como ejemplo, el cuerpo humano percibe desplazamientos de amplitudes de vibración de sólo 0.001 mm mientras que las yemas de los dedos pueden llegar a detectar amplitudes 20 veces inferiores. Sin embargo, la reacción humana a una vibración dada depende mucho de las circunstancias. La sensación personal de falta de confort o bienestar se percibe a niveles diferentes en cada una de las situaciones; sentados en una mesa de trabajo en la oficina, operando una máquina, conduciendo un coche, etc. La actitud de la persona también es determinante en la percepción de las oscilaciones; la costumbre de percibir las, o el hecho de ser el protagonista que crea las vibraciones (no son una agresión externa) puede disminuir su importancia subjetiva.

En la percepción de las vibraciones por parte de las personas influyen un gran número de factores como por ejemplo: la posición de la persona afectada (de pie, sentada o tumbada), la dirección de incidencia de la vibración respecto a la columna vertebral, la actividad que esté desarrollando la persona en ese momento (descansar, andar, correr...), encontrarse solo o en grupo (algunos compañeros pueden percibir vibraciones que nosotros no percibimos), la edad, el sexo, frecuencia de ocurrencia de las vibraciones, momento del día en que se producen las oscilaciones, tiempo de decaimiento de las oscilaciones (amortiguamiento)...

A pesar del gran número de factores que influyen en la percepción de las vibraciones, la intensidad de esta percepción depende de parámetros físicos objetivos de las oscilaciones como por ejemplo: amplitud del desplazamiento, velocidad, aceleración, duración de las vibraciones y frecuencia de vibración. En las tablas y figuras que siguen se presentan diversos criterios de percepción de las vibraciones por las personas en función de las frecuencias, velocidades y aceleraciones según bibliografía consultada.

vibration effects on people	frequencies 1 ÷ 10 Hz a_{\max} [mm/s ²]	frequencies 10 ÷ 100 Hz v_{\max} [mm/s]
imperceptible	10	0.16
just perceptible	40	0.64
clearly perceptible	125	2.0
annoying	400	6.4
unpleasant, painful if lasting	1000	16.0
harmful	> 1000	> 16.0

Tabla 5.8: Clasificación de los efectos en las personas (nivel de percepción) de las vibraciones en función de su frecuencia, aceleración y velocidad. [11] [5]

En la tabla 5.8 se muestra el criterio de aceptación del Ministerio Soviético de Ingeniería metalúrgica y química que fecha del año 1955. Como se puede observar, el criterio distingue dos casos: frecuencias entre 1-10 Hz y entre 10-100 Hz. Para el primer rango de valores, se considera determinante en la percepción de las vibraciones el valor máximo de la aceleración, mientras que para valores superiores de las frecuencias, el parámetro definitivo es la velocidad.

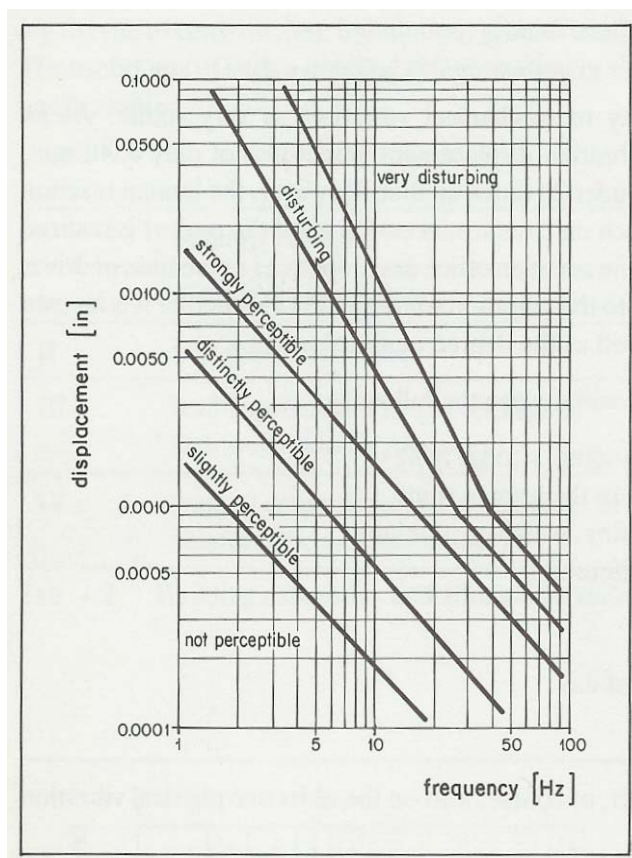


Figura 5.4: Gráfico para la obtención de percepción de vibraciones en función de su frecuencia y desplazamiento. [12] [5]

En la figura 5.4 los parámetros que influyen en la consideración de la percepción de las oscilaciones son la frecuencia y el desplazamiento. En este caso no se diferencian distintos rangos de valores para la frecuencia, considerando que el valor determinante para valorar la sensación de molestia a partir de la frecuencia es el desplazamiento. Lo mismo ocurre en la figura 5.5, pero en este caso el valor a estudiar conjuntamente con la frecuencia es la aceleración pico.

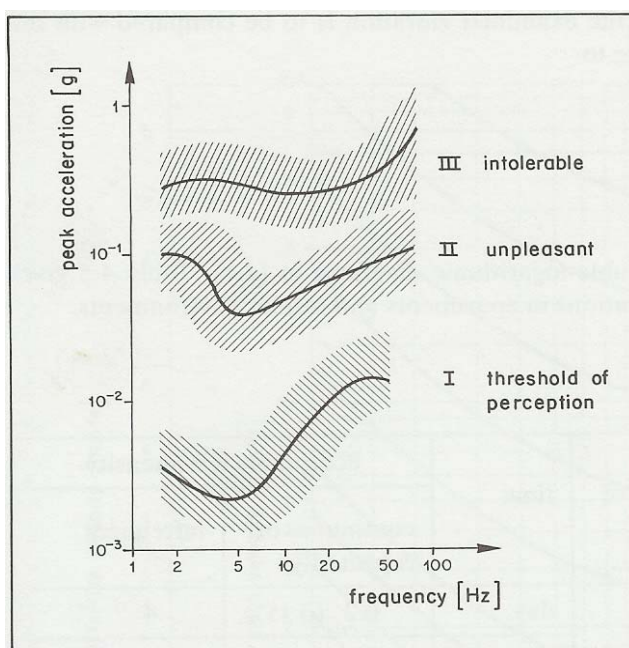


Figura 5.5: Tabla para obtención de la percepción de vibraciones en función de su frecuencia y aceleración pico. [13] [5]

5.2.1 Normativa DIN 4150, Parte 2 (1999) [14]

La normativa DIN 4150, en su parte segunda trata sobre los efectos de las vibraciones de muy diversos orígenes sobre las personas en edificios residenciales o similares. En su última versión (1999) propone una nueva metodología para la valoración de las vibraciones diferente a la versión anterior (1992). Dado que en esta nueva versión se necesitan datos de los que no se disponen, se aplica en esta tesina la versión anterior para la cual se dispone de todos los datos y presenta además un método más simple. El rango de frecuencias se acota a valores entre 1Hz y 80Hz. Conjuntamente con la frecuencia de las oscilaciones, la velocidad, el desplazamiento y la aceleración permiten obtener un valor empírico para la intensidad de la percepción conocido por KB. Éste se obtiene con la fórmula:

$$KB = d \frac{0.8f^2}{\sqrt{1+0.032f}} \quad (5.1)$$

donde d es la amplitud del desplazamiento en mm y f el valor de la frecuencia de vibración expresada en Hz. El valor de KB puede también expresarse en términos de velocidad (v) o aceleración (a) de la oscilación que se relacionan, si el movimiento es armónico, de la siguiente manera:

$$d = \frac{v}{2\pi f} = \frac{a}{4\pi^2 f^2} \quad (5.2)$$

El valor KB que se obtiene de este cálculo debe compararse con los valores del criterio de aceptación teniendo en cuenta factores como el uso del edificio, la frecuencia de ocurrencia de las vibraciones, la duración de los efectos y el momento del día en que se produce la vibración tal como se muestra en la tabla 5.9.

building zone (actual utilization and development of the estate within radius of vibration emission)	time	acceptable KB intensity	
		continuous or repeatedly	infrequent
purely residential, housing estate, holiday resort	day	0.2 (0.15*)	4
	night	0.15 (0.1*)	0.15
village and small business, town-centres	day	0.3 (0.2*)	8
	night	0.2	0.2
business and trade (incl. offices)	day	0.4	12
	night	0.3	0.3
industrial	day	0.6	12
	night	0.4	0.4
exceptional areas (acc. to residential content)	day	0.1 ÷ 0.6	4 ÷ 12
	night	0.1 ÷ 0.4	0.15 ÷ 0.4

(*) Values in brackets should be complied with if buildings are exited horizontally with a frequency below ~ 5 Hz.

Tabla 5.9: Intensidades del parámetro KB aceptables para edificios residenciales. [14]

5.2.2 Normativas ISO 2631-1 (1997) y ISO 2631-2 (2003)

La normativa ISO 2631 “Mechanical Vibration and SOC-Evaluation of human exposure to whole body vibration” en su parte primera “General requirements” [15] establece unos criterios de aceptación para las vibraciones en función de su afectación a la salud (Anejo B) y su percepción y afectación al confort (Anejo C).

En la figura 5.6 se muestra la zona de la gráfica que relaciona la aceleración ponderada con la duración de la exposición, en la que pueden aparecer problemas de salud. En este caso los factores determinantes son el tiempo de exposición a las oscilaciones y la aceleración de la vibración ponderada. Los valores para la ponderación de las aceleraciones se describen en la norma y dependen esencialmente de los efectos que estudiemos (salud, percepción, confort...) y de la posición relativa entre la columna vertebral del individuo y la dirección de actuación de la oscilación, tal como se muestra en la figura 5.7.

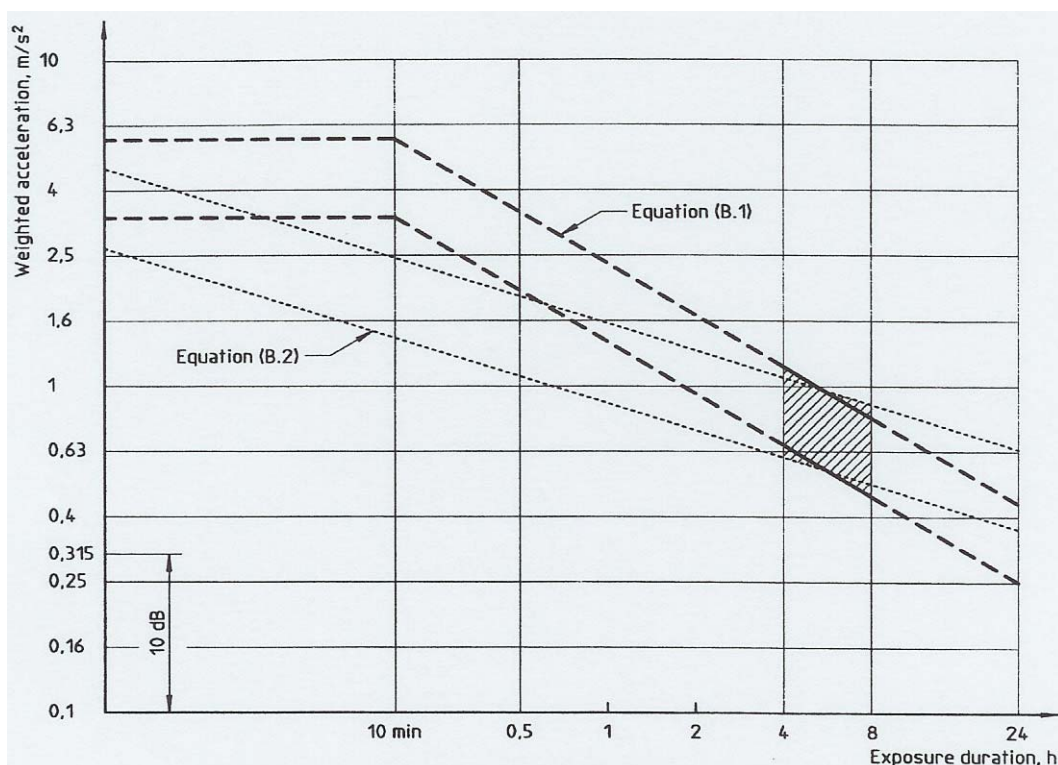


Figura 5.6: Zona de precaución para la salud. [15]

Para la sensación de confort, la normativa ISO 2631-1 presenta unos valores de referencia en su anejo C. En este caso el dato que marca según esta normativa la sensación de confort de la persona es la aceleración:

Valores inferiores a 0.315 m/s^2	confortable
de 0.315 a 0.63 m/s^2	un poco inconfortable
de 0.5 a 1.0 m/s^2	bastante inconfortable
de 0.8 a 1.6 m/s^2	inconfortable
de 1.25 a 2.5 m/s^2	muy inconfortable
valores superiores a 2.0 m/s^2	extremadamente inconfortable

En la norma ISO 2631-2 “Vibrations in buildings” [16], se establecen como válidos los resultados anteriormente citados, pero destacando la subjetividad de la sensación de confort dependiendo de la posición, actividad que se esté realizando, etc. Es por esta razón que estudios realizados en distintos países muestran que las quejas de personas en edificios suelen producirse para valores de las vibraciones ligeramente por encima de los valores de percepción de estas. Es decir, que en cuanto las oscilaciones se perciben en los edificios provocan malestar, cosa que en otras situaciones (transportes públicos, paseos por la calle, actividades deportivas...) no se produce y los criterios de confort responden más acertadamente a los indicados anteriormente.

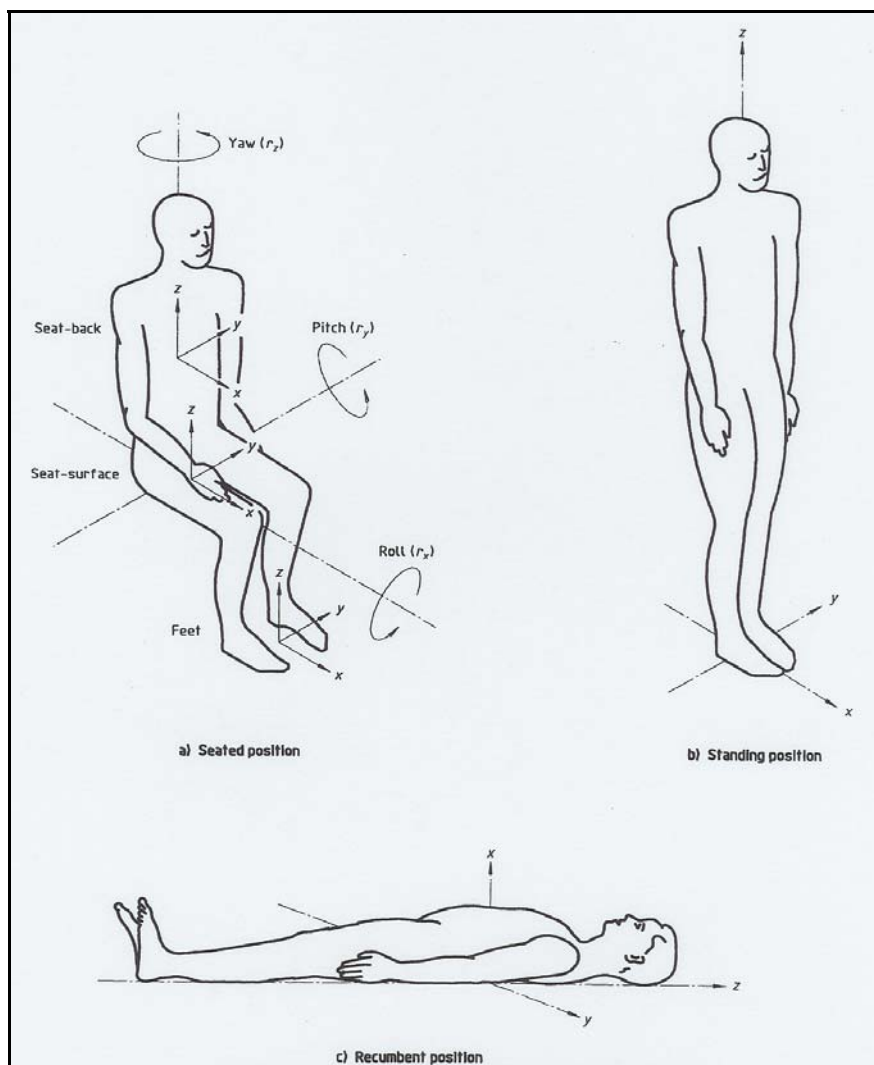


Figura 5.7: Posiciones del cuerpo humano y sus correspondientes ejes. [16]

5.2.3 BRE Digest 278 (1983) [17]

La British Building Research Establishment presenta una valoración para la aceptación de vibraciones muy parecidas a la segunda parte de la normativa DIN 4150 en su versión del 1992, tomando la expresión (5.1) para la determinación del valor K.

En la tabla 5.10 se muestran las descripciones de las distintas percepciones en función del valor K que se obtiene de la fórmula de cálculo y en la tabla 7.11 se muestran los valores límites aceptables de K para cada tipo de edificio que da la norma británica.

human perception	K value	commentary
not felt	< 0.1	Values are applicable to both horizontal and vertical vibrations. K values 25 and 63 of DIN 4150 were here not adopted as their effects on people can hardly be distinguished.
threshold of perception	0.1	
barely noticeable	0.25	
noticeable	0.63	
easily noticeable	1.6	
strongly detectable	4	
very strongly detectable	10	

Tabla 5.10: Relación entre los valores del parámetro K y la percepción humana del movimiento. [17]

building category	time	acceptable K intensity		
		continuous	repeatedly	occasionally
hospitals and nursing homes	day	0.1	0.1	2.5
	night			0.1
residential	day	0.1	0.2 (0.1*)	4
	night		0.1	0.1
city residential and business	day	0.3 (0.15*)	0.63 (0.3*)	8
	night	0.1	0.1	0.1
industrial	day	0.63 (0.3*)	0.8 (0.4*)	12
	night	0.63 (0.3*)	0.8 (0.4*)	12

(*) Values in brackets apply to cases where the frequency of vibration is below 15 Hz.

Tabla 5.11: Valores de intensidad aceptables de K en función del tipo de edificio y el tiempo de exposición. [17]

5.2.4 Eurocódigo 3 (1996) [18]

La normativa experimental europea en su versión española UNE-ENV 1996 “Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-1: reglas generales y reglas para edificación” contiene en su apartado 3 *Efectos dinámicos* de su capítulo 4 *Estados Límite de Servicio* algunas recomendaciones para las limitaciones que deben imponerse a ciertas estructuras para evitar molestias a sus usuarios, daños en los equipos, etc.... En este caso las recomendaciones no se engloban de manera clara en ninguno de los criterios pero parecen orientados a valorar o limitar los efectos psicológicos más que las

afectaciones estructurales. Por esta razón esta norma se considera en este apartado y no en el de criterios estructurales.

Según la normativa europea, en el caso de suelos sobre los que el público pasea frecuentemente, como los suelos de viviendas, oficinas y similares, la frecuencia de la vibración más baja de la construcción del forjado, no deberá ser inferior a 3 ciclos/s. Esta condición se cumplirá si la flecha total instantánea $\delta_1 + \delta_2$ calculada utilizando la combinación frecuente definida por la expresión (2.15) del eurocódigo, es menor de 28mm. Estos límites se pueden rebajar donde esté justificado debido a altos valores de amortiguamiento. En la figura 5.8 se definen las distintas flechas que considera el EC-3.

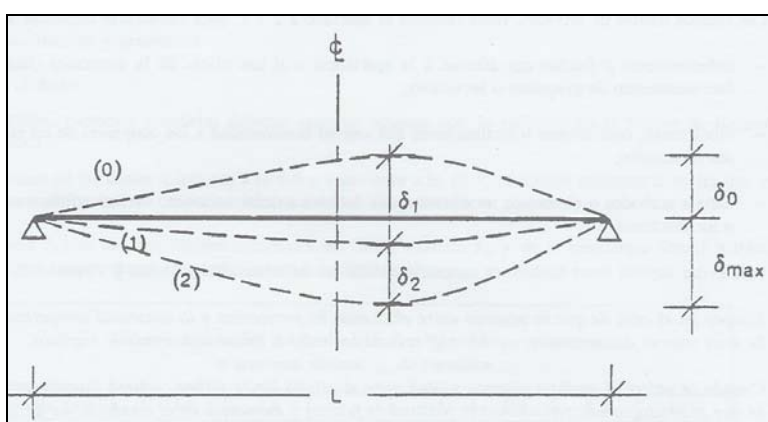


Figura 5.8: Flechas verticales a considerar según EC-3. [18]

Los valores de la figura 5.8 cumplen la relación $\delta_{max} = \delta_1 + \delta_2 - \delta_0$ donde δ_{max} es la flecha máxima debida al momento flector positivo en el estado final con relación a la línea recta que une los apoyos, δ_0 es la flecha negativa debida al momento flector negativo de la viga en estado de descarga, δ_1 es la variación de la flecha de la viga debida a las cargas permanentes después de cargada y δ_2 variación de la flecha de la viga debida a la carga variable más cualquier deformación a lo largo del tiempo debida a la carga permanente.

En caso de un suelo sobre el que se salta o de baila de forma rítmica, como el suelo de un gimnasio o de una sala de baile, la frecuencia natural más baja de este suelo no deberá ser menor de 5 ciclos/s. Esta condición se cumplirá si la flecha calculada según el párrafo anterior no supera los 10 mm.

5.2.5 Instrucción de Hormigón Estructural-EHE (1998) [19]

La Instrucción de Hormigón Estructural en su artículo 51º Estado Límite de Vibraciones ofrece unos valores orientativos para los límites inferiores de las frecuencias de vibración de ciertas estructuras de hormigón armado. Según esta normativa nacional, para gimnasios o palacios de deporte el límite se sitúa en 8Hz, para salas de fiestas o

conciertos sin asientos fijos 7Hz y para salas de fiestas o conciertos con asientos fijos 3.4Hz. Aún así, la norma informa de la dificultad de valorar el comportamiento dinámico de las estructuras de hormigón por el cambio de las frecuencias naturales, por cambios de rigidez de la estructura debido a la fisuración, o de los parámetros de amortiguamiento.

5.3 CRITERIOS DE PRODUCTIVIDAD

Para trabajos industriales o científicos las limitaciones a los efectos de las vibraciones deben formularse valorando los problemas que estas oscilaciones pueden producir en estas actividades como por ejemplo, problemas en la producción de tecnología visibles en los productos fabricados, problemas de rendimiento de aparatos de precisión (por ejemplo microscopios) o problemas en el material tecnológico de las propias máquinas de las cadenas productivas.

Dada la variedad de maquinaria y tecnología para los innumerables procesos productivos es complicado establecer normas o criterios generales para la limitación de vibraciones en estos casos. Generalmente se dividen las distintas máquinas en distintos grados de sensibilidad y posteriormente se definen para cada grupo unos valores máximos de aceleraciones y velocidades en función de los rangos de frecuencias. En las tablas 5.12 y 5.13 se muestran las categorías de maquinaria y sus límites de aceptación de vibraciones respectivamente que plantea Korenev [21].

apparatus category	machinery and equipment
I	optical instruments, such as microscopes, interferometer, optimeter, etc.; mechanical measuring instruments in the micron-range, apparatus for precision scale calibration; finishing of optical lenses; precision cutters; rotor-balancing machines and other heavy precision machinery; machine control stations
II	machinery for grinding of ball bearings, cogwheels, razor blades, etc.; coordinate grinding machines, milling and turning machinery to a precision of some hundredths mm
III	metal-working machinery for turning, cutting, drilling, milling, etc., to usual precision; spinning, weaving and sewing machinery; printing presses, etc.
IV	rotary machines such as blowers, centrifugal separators, electric engines, etc.; stamping machines and presses in light metal-working industry; precision drilling machines; vibratory machines such as vibrators, jarring plates, riddlers, strewing machines, etc.

Tabla 5.12: Categorías de las máquinas según su sensibilidad. [21]

5. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE VIBRACIONES

apparatus category	sensitivity to harmonic vibrations	frequ. 1 ÷ 10 Hz a_{\max} [mm/s ²]	frequ. 10 ÷ 100Hz v_{\max} [mm/s]
I	highly sensitive	6.3	0.1
II	normally sensitive	63	1
III	little sensitive	250	4
IV	insensitive	> 250	> 4

Tabla 5.13: Criterio de aceptación de vibraciones según categoría de las máquinas indicada en la tabla 5.12. [21]