Colección
INNOVACIÓN
& CONOCIMIENTO

Análisis y reducción de las vibraciones generadas por el tráfico ferroviario en túneles. Estado de la tecnología

MIGUEL A. MENGUAL PINTOS
RICARDO GALÁN DE VEGA
VÍCTOR PÉREZ CUARESMA

Innovación & conocimiento

Fundación Fidias
Innovación y conocimiento
ISBN: 978-84-615-5287-0
Depósito legal: SE 1588-2012

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni el almacenamiento en un sistema informático, ni la transimisión de cualquier forma o cualquier medio sin el permiso por escrito del editor.

Fundación Fidias

ANÁLISIS Y REDUCCIÓN DE LAS VIBRACIONES GENERADAS POR EL TRÁFICO FERROVIARIO EN TÚNELES. ESTADO DE LATECNOLÓGIA

Miguel A. Mengual Pintos
Ricardo Galán de Vega
Víctor Pérez Cuaresma

secciones
Optimización de la tipología de la sección transversal de una infraestructura viaria en zonas orográficas complejas
ACTUACIONES EN ALTA VELOCIDAD
producción

Sala de I+D+i de Fundación Fidias

índice

Introducción. 11
Normativas y especificaciones técnicas. 13
Contexto general. 13
Indicadores para la evaluación y límites admisibles. 15
Normativas internacionales. 15
Normativas nacionales. 27
Revisión de la literatura. 39
Breve repaso a la evolución del conocimiento. 39
Aproximaciones actales al problema de impacto vibratorio. 41
Modelos para predecir las vibraciones inducidas por trenes de alta velocidad. 41
Requerimientos actuales. 45
Análisis de estrategias. 47
Introducción. 47
Trabajos a nivel internacional. 47
Trabajos a nivel nacional. 49
Conclusiones. 53
Referencias. 55

1. Introducción

El alto déficit de suelo en los centros de las ciudades altamente habitadas, unido a la creciente oferta de líneas de metro, tranvías y trenes de Alta Velocidad, apoyadas por fuertes inversiones tanto públicas como privadas para los próximos años, están desencadenando en la construcción de numerosas líneas de ferrocarril bajo las ciudades.

Este hecho, sumado a las crecientes demandas de calidad de vida y de mejora medioambiental, exige un profundo estudio sobre el impacto de estas nuevas construcciones en las edificaciones aledañas.

A lo largo de la historia las líneas ferroviarias y tranviarias tradicionales se diseñaban en base a la experiencia en construcciones previas, pero con los nuevos sistemas de transporte de metros y trenes de alta velocidad han surgido nuevos problemas de diseño y de comportamiento que no eran tenidos en cuenta con las experiencias anteriores y que no se resuelven con las metodologías de cálculo tradicionales.

Uno de los principales problemas planteados frente a esta nueva situación de las infraestructuras es la predicción de los niveles de vibración que provoca el paso de un tren en las edificaciones próximas a la vía.

Las aproximaciones a este fenómeno que se han realizado en el campo de la ciencia a lo largo de la historia con distintos planteamientos por regla general pueden ser agrupadas en tres grupos:

- Métodos empíricos,
- Métodos numéricos, y
- Métodos analíticos

todos ellos analizados de forma somera a lo largo de esta monografía.

El objeto de la presente monografía es analizar el estado general de los estudios realizados en este campo, así como servir de base para una mayor especialización en las investigaciones futuras.

En los últimos años han sido varios los centros de investigación que han desarrollado estudios en este campo, tanto experimental como analíticamente, aunque el número de referencias obtenidas es a día de hoy aún escaso.

En España las investigaciones dentro del campo de las vibraciones provocadas por el ferrocarril se han llevado a cabo principalmente en las grandes escuelas de ingeniería del país, focalizándose los principales estudios en las Universidades Politécnicas de Madrid, Cataluña, Sevilla y Granada.

A lo largo de este trabajo se desarrollan primeramente las distintas normativas que actualmente rigen los niveles máximos permisibles dentro del campo de las vibraciones, tanto a nivel internacional como nacional.

Posteriormente, se realiza un análisis sobre el estado actual del conocimiento dentro del ámbito de las vibraciones causadas por el ferrocarril, acompañadas de algunos de los estudios específicos que se desarrollan o se han desarrollado recientemente en los principales centros de estudios a nivel mundial y nacional.

Dado que el presente estudio sobre el estado de la tecnología se centra en recopilar los estudios realizados en la materia, a nivel internacional y nacional, cabe mencionar que gran parte de la información utilizada ha sido extraída de los diversos estudios realizados por los distintos centros del país, que han sido recogidos dentro de la Jornada de "Vibraciones causadas por el ferrocarril. Análisis y soluciones correctoras" celebrada por el Instituto Técnico de la Vialidad y del Transporte en 2008. En las referencias presentadas al final se muestra una relación completa del origen de la información utilizada en la redacción del presente estudio.

Por último, se realiza una conclusión sobre el estudio llevado a cabo.

2. Normativas y especificaciones técnicas

2.1 Contexto general

En el presente apartado se analizan de forma breve las distintas normativas y especificaciones técnicas dedicadas al ámbito de las vibraciones.

Aunque tradicionalmente el concepto de contaminación acústica engloba la presencia en el medio ambiente tanto de ruido como de vibraciones, y siendo fenómenos de análoga naturaleza, la realidad es que desde todos los puntos de vista se ha prestado mucha más atención al ruido que a las vibraciones y esto es así, aún teniendo en cuenta que en la mayoría de las ordenanzas municipales sobre contaminación acústica se vienen regulando ambos fenómenos.

Es de destacar que los indicadores empleados tradicionalmente para la evaluación de las vibraciones provienen de la Norma ISO 2631-2 (1989), en la que los límites se establecen en función del nivel de vibración ponderado en frecuencia mediante las típicas curvas del índice K, que han sido empleadas en las ordenanzas municipales vigentes en nuestro país y en el extranjero.

Sin embargo, dicha norma ha sido sustituida por la Norma ISO 1631-2 (2003), en la que aparecen nuevos indicadores del nivel de vibración, en los que en vez de analizar eventos aislados se contemplan valores equivalentes en periodos de tiempo. Este cambio en la normativa es todavía relativamente reciente y su aplicación no está muy extendida, principalmente debido a que la responsabilidad de fijar niveles admisibles se traslada a las administraciones.

En España, con la publicación de la Ley del Ruido y su desarrollo reglamentario se ha abordado un nuevo enfoque en la evaluación y control de la contaminación acústica y en particular en el apartado de las vibraciones como problema ambiental, estableciendo una nueva regulación que incluye la evaluación a través de indicadores y procedimientos

de evaluación novedosos, así como el establecimiento de nuevos objetivos de calidad para vibraciones en el interior de edificaciones.

A continuación, se enumeran las normativas analizadas para el presente documento, tanto a nivel internacional como nacional:

NIVEL INTERNACIONAL

- DIN 4150-2 DE FECHA 06/1999: Vibraciones en edificios Parte 2: Efectos sobre seres humanos en el interior de edificios.

- ISO/DIS 14837-1.2:2005: Vibraciones mecánicas – Ruido estructural y vibraciones procedentes del sistema de vía.

- ISO 2631-1: 1997: Vibraciones y choques mecánicos – Evaluación de la exposición de seres humanos a las vibraciones globales del cuerpo – Parte 1: Requisitos Generales.

- ISO 2631-2: 1989: Evaluación de la exposición de seres humanos a las vibraciones globales del cuerpo – Parte 2: Vibraciones continuas e inducidas por choque en edificios (1 a 80 Hz).

- ISO 2631-2: 2000 & 2003.

- BS 6841 (1987): Mediciones y evaluación de la exposición humana a las vibraciones mecánicas globales del cuerpo y choques repetidos.

- BS6472 (1992): Evaluación de la exposición humana a las vibraciones en edificios (1 a 80 Hz).

– Nivel nacional

- Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido.
- Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre.
- Ley 5/1999, de 8 de abril, de Evaluación del Impacto Ambiental.

2.2 Indicadores para la evaluación y límites admisibles

En el presente apartado se realiza un breve recorrido por las distintas normativas, tanto a nivel internacional como a nivel nacional.

2.3 Normativas internacionales

· DIN 4150-2 DE FECHA 06/1999: Vibraciones en edificios
Esta norma trata sobre los efectos de las vibraciones en personas que se encuentran en el interior de edificios.

- Definiciones

La normativa define algunos parámetros físicos que se enumeran a continuación:

v(t) =	Velocidad de vibración, filtrada para una banda de frecuencia 1 – 80 Hz. Sin unidad: normado vs. v_0 = 1 mm/s
KB(t) =	Velocidad de vibración con ponderación de frecuencia v(t) filtrado con filtro paso banda alta de 1ª: $H_{KB}(f) = \frac{1}{\sqrt{1+(f_0^2/f)}}$ Con f_0 = 5,6 Hz
$KB_F(t)$ =	Velocidad de vibración ponderada vs. tiempo $KB_F(f) = \sqrt{\frac{1}{r}\int_{\xi=0}^{t} e^{-\frac{(1-\xi)}{r}} . KB_2(\xi)d\xi}$ Con r= 0,125 s (rápido)
KB_{Fmax} =	KB_F máx. medido durante el periodo de mediciones

KB_{FTi} =	KB_F máx. en un periodo de 30 s (T = 30 s = 1 takt)
KB_{FTm} =	Valor raíz cuadrática media de los valores max $KB_{FTm} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N} .KB^2_{FTi}}$ Con N = numero de takt (e.g. 5 min = 10 takt) Si KBFTi $\leq$ 0,1 entonces KB_{FTi} = 0
T_r =	Periodo de evaluación (día: 16 h (6h00 to 22h00) – noche: 8 h (22h00 a 6h00))
T_e =	Periodo de exposición a las vibraciones (por ejemplo, periodo de exposición al paso de los trenes)
KB_{FTr} =	$KB_{FTm}\sqrt{\frac{T_e}{T_r}}$

– Mediciones

La norma también define como han de llevarse a cabo las mediciones:

- En el lugar donde las amplitudes de las vibraciones sean máximas.
- En dirección Z vertical.
- En dirección horizontal X e Y.

– Evaluación

La evaluación de los niveles de vibración se basa en las figuras 2 y D.1 y la tabla 1 de la norma DIN4150-2 mostrada a continuación. La tabla 1 de la norma DIN 4150-2 indica, para dos periodos determinados (día y noche) los valores límite más bajos y más altos de KBFmax:

- Au: límite inferior

– Ao: límite superior
Esta tabla es válida para ferrocarriles, es decir tranvías, metros y trenes.

Fila	Tipo de emplazamiento / uso	Día			Noche		
		Au	Ao	Ar	Au	Ao	Ar
1	Polígonos industriales	0,4	6	0,2	0,3	0,6	0,15
2	Zonas con predominio de tiendas y talleres frente a viviendas	0,3	6	0,15	0,2	0,4	0,1
3	Zonas mixtas	0,2	5	0,1	0,15	0,3	0,07
4	Zonas con predominio de viviendas frente a tiendas y talleres	0,15	3	0,07	0,1	0,2	0,05
5	Edificios que necesitan especial protección como hospitales si se encuentran en las correspondientes zonas	0,1	3	0,05	0,1	0,15	0,05

Tabla 2.1 Tabla 1 de DIN 4150-2

La figura 2 de la norma DIN4150-2 describe el procedimiento de evaluación.

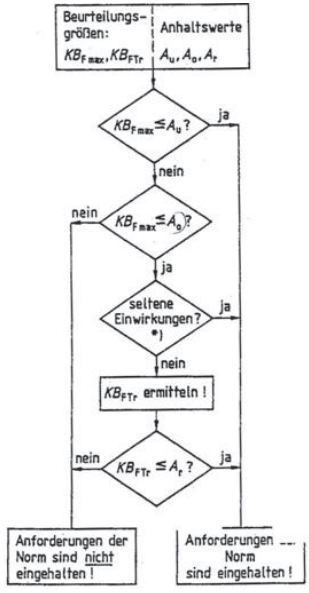


Figura 2.1 Figura 2 de DIN 4150-2: Flow-chart del procedimiento de evaluación

La figura D.1 de esta norma indica el numero máximo de pasajes permitidos cuando $A_u < KB_{Fmax} < A_o$.

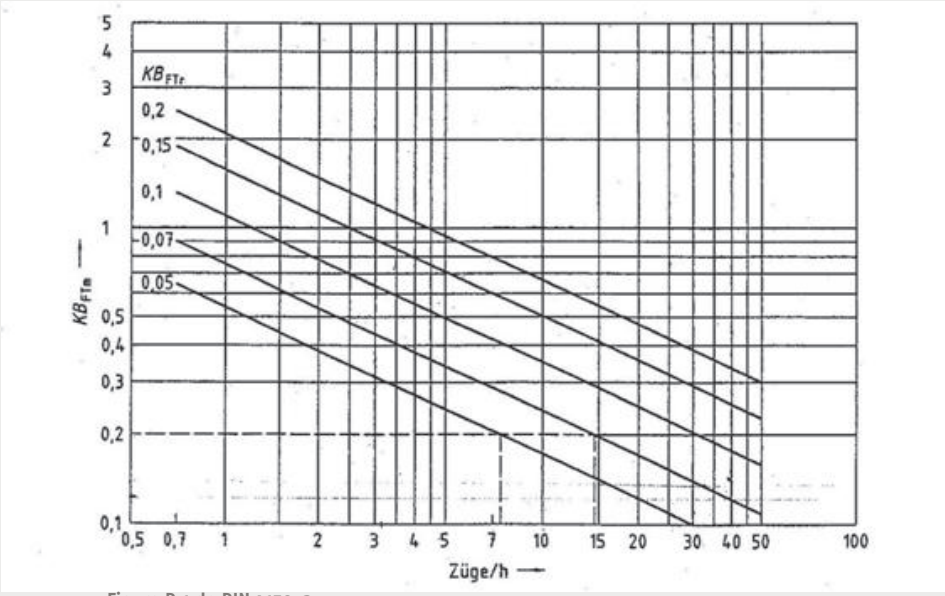


Figura D.1 de DIN 4150-2

· ISO 2631-1 (1997): Vibraciones y choques mecánicos – Evaluación de la exposición humana a las vibraciones globales del cuerpo – Parte 1: requisitos generales

– Campo de aplicación

El campo de aplicación de esta norma se define para:

– Rango de frecuencia: 0,5 Hz – 80 Hz
– Criterio: salud – confort – percepción

La norma define filtros ponderados Wk y Wd a ser aplicados para aceleraciones vibratorias medidas.

– Ponderación Frecuencial

Ponderación frecuencial	Salud	Confort	Percepción
W_k	Eje z	Eje z, sentado Eje z, de pie eje z, vertical eje z, recostado (excepto la cabeza) eje z, y eje eje z, pies (sentado)	Eje z, sentado Eje z, de pie Eje z, vertical Eje z, recostado (excepto la cabeza) -
W_d	Eje x, sentado eje y, sentado	Eje x, sentado eje y, sentado eje x, eje y , de pie eje y, eje z, horizontal eje y, eje z, recostado eje y, eje z, respaldado en asiento	x eje, sentado y eje, sentado x eje, y eje, de pie y eje, z eje, horizontal y eje, z eje, recostado

Tabla 2.2 Sumario de las curvas de ponderación frecuencial a ser aplicadas

– Mediciones de vibraciones

- Direcciones: X-Y-Z (ver figura 1 de ISO 2631-1)
- Localización Mediciones: lo más cerca posible del punto o área a través del cual se transmiten las vibraciones al cuerpo
- Duración: la suficiente para asegurar una exactitud estadística razonable.

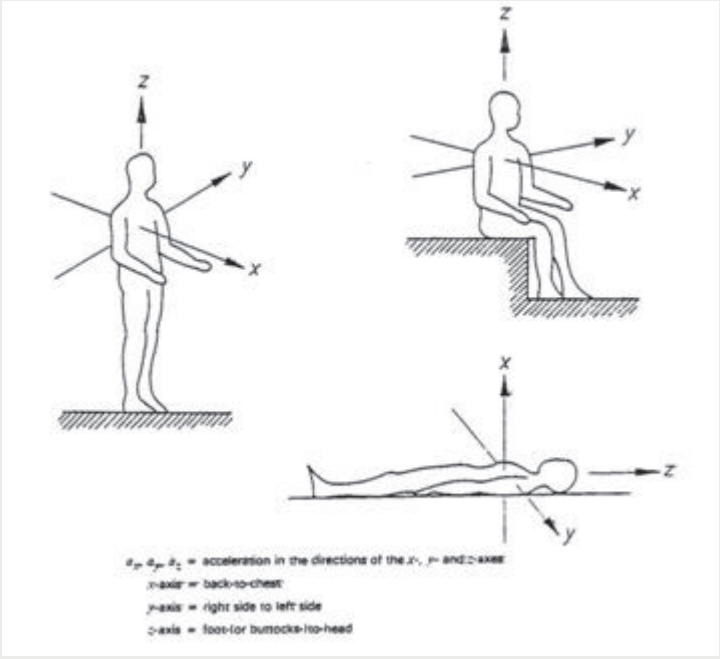


Figura 2.bi3 Figura 1 de ISO 2631-1

– Evaluación de la vibración sobre la base del valor r.m.s. de la aceleración ponderada

De aplicación si el valor punta es menor o igual que 9 (factor punta = amplitud máx. en la señal de tiempo/valor r.m.s.).

El valor r.m.s. de la aceleración ponderada se expresa en metros por segundo al cuadrado (m/s^2) para vibraciones traslacionales, y en radianes por segundo al cuadrado (rad/s^2) para vibraciones rotacionales. El valor r.m.s. de la aceleración ponderada se debe calcular utilizando la siguiente ecuación o su equivalente numérico en el dominio de la frecuencia:

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t)\,dt \right]^{\frac{1}{2}}$$

donde,

aw(t) es la aceleración traslacional o rotacional ponderada como función del tiempo (variación de tiempo) en metros por segundo al cuadrado (m/s2) o en radianes por segundo al cuadrado (rad/s2) respectivamente
T es la duración de la medición en segundos.

– Aplicación a las vibraciones generadas en edificios cercanos por el paso de trenes

– Salud: Los niveles de vibración generados en el interior de edificios por el paso de trenes están siempre muy por debajo de los límites permisibles desde el punto de vista de la salud.
– Comodidad: La tabla siguiente resume los niveles globales de vibración dentro de vehículos de transporte público.

Vibración Global A_w [m/s^2]	Observaciones
≤ 0,315	No incómodo
De 0,315 a 0,63	Ligeramente incómodo
De 0,5 a 1	Bastante incómodo
De 0,8 a 1,6	Incómodo
De 1,25 a 2,5	Muy incómodo
> 2	Extremadamente incómodo

Tabla 2.3

Esta tabla no es aplicable para vibraciones en el interior de edificios.

En muchos países, la experiencia demuestra que los ocupantes de edificios probablemente se quejen si los niveles de vibración son ligeramente superiores al umbral de percepción.

Percepción: El cincuenta por ciento de las personas sanas sólo son capaces de detectar una vibración ponderada Wk con una amplitud de pico igual a 0,015 m/s2.

Existen grandes diferencias entre las personas en su capacidad para percibir las vibraciones. Mientras que el promedio del umbral de percepción se sitúa en torno a los 0,015 m/s2, la desviación intercuartil de las respuestas puede oscilar entre el 0,01 m/s2 y el 0,02 m/s2. (aceleración pico).

El umbral de percepción disminuye ligeramente si la duración de la vibración aumenta hasta un segundo. Aunque el umbral de percepción no disminuye mucho si aumenta la duración, la sensación producida por las vibraciones a intensidades mayores que el umbral aumenta adicionalmente.

· ISO 2631-2 (1989): Evaluación de la exposición humana a vibraciones globales del cuerpo – Parte 2: Vibraciones continuas e inducidas por choques en edificios (1 a 80 Hz)

En la ISO 2631-2 (1989) se definen los siguientes criterios de vibración:

Lugar	Hora	Vibración continua o intermitente [2]	Excitación de vibración transitoria con varios sucesos al día
Zonas de trabajos críticos (por ejemplo, algunos quirófanos de hospital, algunos laboratorios de precisión, etc.)	Día Noche	1	1 [2, 3]
Residencial	Día	2 a 4 [4]	30 a 90 [4, 5, 6, 7]
	Noche	1,4	1,4 a 20
Oficinas	Día Noche	4 [8]	60 a 128 [8]
Talleres [9]	Día Noche	8 [8, 10]	90 a 128 [8, 10]

Tabla 2.4

1. La tabla lleva a magnitudes de vibración por debajo de las cuales la probabilidad de reacción es baja (no se considera ningún ruido acústico provocado por paredes que vibran).

2. También incluye vibraciones cuasi estacionarias provocadas por choques repetidos. El término 'choque' se define en ISO 2041: 1975, cláusula 3, y a veces se cita como vibración transitoria (impulsiva).

3. Las magnitudes de vibración transitoria en hospitales, quirófanos y lugares donde se realicen trabajos críticos corresponden a periodos de tiempo en que se estén realizando operaciones o trabajos críticos. En otros momentos, magnitudes similares a las de las viviendas son satisfactorias siempre que exista el debido acuerdo y aviso.

4. En zonas residenciales existen grandes variaciones en la tolerancia de vibraciones. Los valores específicos dependen de factores sociales y culturales, actitudes psicológicas e interferencia esperada en la privacidad.

5. La "compensación" entre número de eventos por día y magnitudes no está bien establecida. La siguiente relación provisional se utilizará en casos de más de tres eventos al día con dependencia de estudios adicionales de la tolerancia humana a las vibraciones. Ello implica la multiplicación adicional por un factor número Fn = 1, 7 N-0.5 donde N es el número de eventos por día. Esta ecuación de "compensación" no es de aplicación cuando los valores sean inferiores a los dados por los factores para vibración continua. Cuando el intervalo de magnitudes de los eventos sea pequeño (dentro de media amplitud de la más grande se puede usar la media aritmética; en caso contrario, sólo se debe considerar la más grande).

6. Para eventos discretos con una duración que supere 1 s, los factores se pueden ajustar multiplicando adicionalmente por un factor de duración, Fd:
- Fd = T −1,22 para suelos de hormigón y T está entre 1 y 20
- Fd = T −0,32 para suelos de madera y T está entre 1 y 60

donde T es la duración del evento, en segundos, y se puede calcular a partir de los 10 puntos porcentuales (−20 dB) de los historiales de tiempo de movimiento.

7. En excavaciones en roca dura (donde las perturbaciones del subsuelo provocan vibraciones de frecuencia más alta) se ha descubierto que un factor de hasta 128 es satisfactorio para zonas residenciales en algunos países.

8. Las magnitudes para la vibración transitoria en zonas de oficinas y talleres no se deberían aumentar sin considerar la posibilidad de una interrupción importante de la actividad laboral.

9. Las vibraciones que afecten a operarios de determinados procesos (como estampación en caliente o trituración que hacen que vibren las zonas de trabajo) pueden estar en una categoría distinta a las zonas de talleres aquí consideradas. Entonces serán de aplicación las magnitudes de vibración para operarios de procesos de excitación que se especifican en ISO 2631-1.

10. Duplicar las magnitudes de vibración propuestas para vibraciones continuas o intermitentes y vibraciones transitorias repetidas (cuarta columna) puede resultar en quejas y ello puede aumentar significativamente si se cuadruplican los niveles (cuando proceda se pueden consultar las curvas de dosis/respuesta).

Cuando los factores multiplicadores que se facilitan a continuación hagan referencia a las curvas de criterios para vibraciones de dirección combinada, como se muestra a continuación:

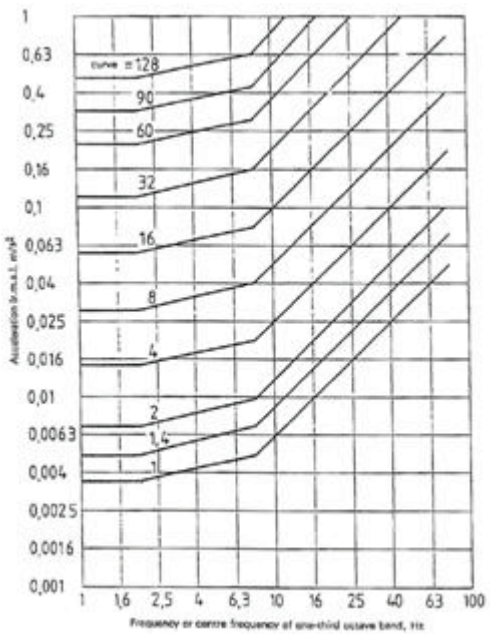


Figura 2.4

A partir de los valores anteriores es posible determinar los valores de aceleración permisibles para día y para noche en el interior de edificios.

	dirección horizontal m/s^2 RMS	dirección vertical m/s^2 RMS
día	0,0072 – 0,0144	0,01 – 0,02
noche	0,005	0,007

Tabla 2.5

· ISO 2631-2 (2000 y 2003)

Esta nueva versión ya no indica valores permisibles para vibraciones. Un estudio internacional realizado para identificar los niveles permisibles de vibración ha dado como resultado un intervalo muy amplio de valores. En consecuencia, no fue posible facilitar unas recomendaciones generales antes de recopilar información adicional.

· ISO/DIS 14837-1.2:2005: Vibración mecánica – Ruido y vibración estructurales provocados por los sistemas de carriles

El objetivo de ISO/DIS 14837 es definir una metodología completa para la evaluación de los efectos de vibración de sistemas de carriles nuevos o modificados sobre el entorno. Está previsto que esta norma esté compuesta de las siguientes partes:

- Parte 1: Directrices generales
- Parte 2: Modelos de predicción
- Parte 3: Medición
- Parte 4: Criterios de evaluación
- Parte 5: Mitigación
- Parte 6: Gestión de activos

Hasta el momento sólo se ha publicado la parte 1. Como se ha indicado en la introducción del presente documento, "los criterios y valores límites están cubiertos sin embargo por las normas nacionales y otras normas internacionales".

· BS 6841 (1987): Medición y evaluación de la exposición humana a vibraciones mecánicas globales al cuerpo y choques repetidos

En términos generales, esta norma es muy parecida a la ISO 2631-1, salvo en las ponderaciones de las frecuencias, que son ligeramente distintas.

· BS6472 (1992): Evaluación de la exposición humana a vibraciones en edificios (1 Hz a 80 Hz)

En términos generales, esta norma es una copia de la SO2631-2 (1989), incluyendo las ponderaciones de las frecuencias. Sobre la base de las vibraciones medidas ponderadas y el número de pasos, los "Valores de dosis de vibración" (= VDV, en m/s1,75) se pueden calcular y evaluar con la siguiente tabla:

Valores de dosis de vibración ($m/s^{1.75}$) por encima de los cuales se pueden esperar distintos niveles de queja en edificios de viviendas			
Lugar	Baja probabilidad de quejas	Quejas posibles	Quejas probables
Edificios de viviendas, 16 h, día	0,2 a 0,4	0,4 a 0,8	0,8 a 1,6
Edificios de viviendas, 8 h, noche	0,13	0,26	0,51

Tabla 2.6

2.4 Normativas Nacionales

"En España, la primera disposición oficial que hace referencia al ruido lo constituye el Reglamento de Actividades Calificadas de 1961, en el que también se consideran como molestas las actividades que constituyan una incomodidad por ruidos o vibraciones, facultando a las Corporaciones Locales a exigir las medidas correctoras adecuadas en la tramitación de licencias.

Complementando la disposición anterior, el Decreto 2107/68, de 16 de agosto, de Poblaciones con altos niveles de contaminación, establece que los Ayuntamientos

adoptarán las medidas y limitaciones necesarias para prevenir las molestias por ruidos o vibraciones a través de las Ordenanzas Municipales.

No obstante, la Ley de referencia en la cual nos podemos basar para considerar el ruido como contaminante lo constituye la Ley 38/1972 de 22 de diciembre de Protección del Ambiente Atmosférico, en la que se define la contaminación atmosférica como "la presencia en el aire de materias o formas de energía que impliquen riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza", autorizando al Gobierno a establecer niveles de inmisión para cada tipo de contaminante. Sin embargo hasta el momento no se ha desarrollado a nivel nacional la reglamentación que establezca valores límite de niveles sonoros en el ambiente exterior.

El Decreto 833/75 de 6 de febrero, desarrolla la Ley anterior, y en el Art. 2. Punto D dice textualmente: Las Corporaciones Locales velarán por el cumplimiento, dentro de sus respectivas demarcaciones territoriales, de las disposiciones legales sobre la materia que regula este Reglamento, adaptando a las mismas las Ordenanzas Municipales.

Posteriormente el Decreto 1909/81 (y futuras modificaciones) que aprueba la Norma Básica de la Edificación, Condiciones Acústicas de los Edificios define los requisitos que deben reunir los edificios para garantizar un nivel acústico adecuado al uso y actividad de sus ocupantes.

Por último el Estado Español haciendo transposición de las Directivas comunitarias ha regulado mediante Reales Decretos los niveles de emisión sonora de diversos dispositivos mecánicos, como maquinaria y equipos de obras, vehículos a motor, aeronaves subsónicas, etc.

A nivel Autonómico, diversas Comunidades Autónomas, con los mismos criterios del Reglamento nacional de Actividades Calificadas, han desarrollado disposiciones sobre niveles de emisión sonora exigibles, insonorización y medidas correctoras.

En concreto en la Comunidad Valenciana la Ley 3/1989 de 2 de mayo, Reguladora de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas de la Comunidad Valenciana, califica a las actividades como "molestas" por ruidos y vibraciones en grados que varían del 1 al 5, aprobándose un nuevo nomenclátor de actividades por parte del Gobierno Valenciano.

Asimismo, la reciente Orden de 30 de diciembre de 1995 de Conselleria de Administración Pública (Generalitat Valenciana) regula los horarios de espectáculos y establecimientos públicos, en orden a preservar a los vecinos de las molestias producidas por dichos establecimientos en aras al derecho al ocio y al descanso.

A nivel Local, la Ley 7/1985 de 2 de abril, de Bases de Régimen Local establece:

Artículo 25. El Municipio ejercerá, en todo caso, competencias en los términos de la legislación del Estado y de las Comunidades Autónomas en las siguientes materias:
f) Protección del medio ambiente.

Artículo 26. Los Municipios por sí o asociados deberán prestar, en todo caso, los servicios siguientes:

a) En todos los Municipios: (un listado de servicios)
d) En los Municipios con población superior a 50.000 habitantes, además: Transporte colectivo urbano de viajeros y protección del medio ambiente.

Y la Ley 14/1986 de 22 de abril, General de Sanidad, dice textualmente:

Artículo 42, Apdo. 3. No obstante, los Ayuntamientos, sin perjuicio de las competencias de las demás Administraciones Públicas, tendrán las siguientes responsabilidades mínimas en relación al obligado cumplimiento de las normas y planes sanitarios:

b) Control sanitario de industrias, actividades y servicios, transportes, ruidos y vibraciones.

A nivel Local las principales actuaciones de prevención y control de ruido se llevan a cabo por los Ayuntamientos a través de las Ordenanzas Municipales, y en muchos casos además con la creación de departamentos municipales de medio ambiente, siendo una de sus competencias la lucha contra el ruido.

En determinados municipios, estas Ordenanzas Municipales de Ruidos y Vibraciones son parte integrante de la Ordenanza General de Protección de Medio Ambiente (Madrid, Barcelona,...), mientras que otros tienen unas Ordenanzas específicas para ello (Sevilla, Zaragoza,...), donde se contempla de una forma muy amplia los temas referentes al ruido.

Por último, otros municipios o no poseen Ordenanzas contra el ruido y las vibraciones o constituyen las mismas un apartado muy breve de las Ordenanzas de Usos y Actividades, o de otra legislación local (Plan General de Ordenación Urbana).

En la ciudad de Valencia como primer paso para la elaboración de la Ordenanza Municipal de Ruido y Vibraciones se ha estudiado en profundidad cuáles son las principales actividades generadoras de ruido en el término municipal (fuentes emisoras), para una vez conocidas éstas regular las actuaciones puntuales en orden a prevenir, vigilar y corregir esta forma de contaminación, según establece la Ley 38/1972 de Protección del Ambiente Atmosférico, en su primer artículo.

Sin lugar a duda, las fuentes de ruido ambiental en campo abierto son las más perturbadoras del ambiente exterior, ya sea por su persistencia (tráfico) o por su intensidad (pubs, discotecas, obras en vía pública, determinadas actividades industriales, etc.).
Los límites máximos de perturbación por dichas fuentes en el exterior se regulan, en la Ordenanza que se presenta, mediante niveles de recepción externos, en función del uso dominante de la zona receptora, tanto para horario diurno como nocturno.

Asimismo, la perturbación por dichas fuentes en el interior de las edificaciones se regula mediante los correspondientes niveles de recepción internos (diurnos y nocturnos).

Cada una de las fuentes generadoras de ruido ambiental, atendiendo a sus especiales características, es objeto de regulación específica en la Ordenanza presentada.

2.4.1.1. Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido

La «Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido» da definiciones generales y recomendaciones con el fin de paliar las molestias debidas al ruido aéreo generado en el medioambiente por muchos tipos distintos de Fuentes de ruido potenciales, tanto de tipo doméstico como industrial o militar. No da criterios específicos referentes a vibraciones y ruidos estructurales.

2.4.1.2. Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre

Este real decreto tiene por objeto establecer las normas necesarias para el desarrollo y ejecución de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido en lo referente a zonificación

acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.

Las áreas acústicas se clasificarán, en atención al uso predominante del suelo, en los tipos que determinen las comunidades autónomas, las cuales habrán de prever, al menos, los siguientes:

a) Sectores del territorio con predominio de suelo de uso residencial.
b) Sectores del territorio con predominio de suelo de uso industrial.
c) Sectores del territorio con predominio de suelo de uso recreativo y de espectáculos.
d) Sectores del territorio con predominio de suelo de uso terciario distinto del contemplado en el párrafo anterior.
e) Sectores del territorio con predominio de suelo de uso sanitario, docente y cultural que requiera de especial protección contra la contaminación acústica.
f) Sectores del territorio afectados a sistemas generales de infraestructuras de transporte, u otros equipamientos públicos que los reclamen.
g) Espacios naturales que requieran una especial protección contra la contaminación acústica.

Para el establecimiento y delimitación de un sector del territorio como de un tipo de área acústica determinada, se tendrán en cuenta los criterios y directrices que se describen en el apéndice V.

Si concurren, o son admisibles, dos o más usos del suelo para una determinada área acústica, se clasificará ésta con arreglo al uso predominante, determinándose este por aplicación de los criterios fijados en el apartado 1, del apéndice V.

OBJETIVOS DE CALIDAD ACÚSTICA APLICABLES AL ESPACIO INTERIOR

1. Sin perjuicio de lo establecido en el apartado 2, se establece como objetivos de calidad acústica para el ruido y para las vibraciones, la no superación en el espacio interior de las edificaciones destinadas a vivienda, usos residenciales, hospitalarios, educativos o culturales, de los correspondientes valores de los índices de inmisión de ruido y de vibraciones establecidos, respectivamente, en las tablas B y C, del apéndice II. Estos valores tendrán la consideración de valores límite.

2. Cuando en el espacio interior de las edificaciones a que se refiere el apartado anterior,

localizadas en áreas urbanizadas existentes, se superen los valores límite, se les aplicará como el objetivo de calidad acústica alcanzar los valores de los índices de inmisión de ruido y de vibraciones establecidos, respectivamente, en las tablas B y C, del apéndice II.

CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD ACÚSTICA APLICABLES AL ESPACIO INTERIOR

1. Se considerará que se respetan los objetivos de calidad acústica establecidos en el artículo 16, cuando:

a) Para cada uno de los índices de inmisión de ruido, Ld, Le, o Ln, los valores evaluados conforme a los procedimientos establecidos en el apéndice IV, cumplen, para el periodo de un año, que:

i) Ningún valor supera los valores fijados en la correspondiente tabla B, del apéndice II.
ii) El 97 % de todos los valores diarios no superan en 3 dB los valores fijados en la correspondiente tabla B, del apéndice II.

b) Los valores del índice de vibraciones Law, evaluados conforme a los procedimientos establecidos en el apéndice IV, cumplen lo siguiente:

i) Vibraciones estacionarias:
Ningún valor del índice supera los valores fijados en la tabla C, del apéndice II.
ii) Vibraciones transitorias.
Los valores fijados en la tabla C, del apéndice II podrán superarse para un número de eventos determinado de conformidad con el procedimiento siguiente:
- Se consideran los dos periodos temporales de evaluación siguientes: periodo día, comprendido entre las 07:00-23:00 horas y periodo noche, comprendido entre las 23:00-07:00 horas.
- En el periodo nocturno no se permite ningún exceso.
- En ningún caso se permiten excesos superiores a 5 dB.
- El conjunto de superaciones no debe ser mayor de 9. A estos efectos cada evento cuyo exceso no supere los 3 dB será contabilizado como 1 y si los supera como 3.

2. Se considerará que, una edificación es conforme con las exigencias acústicas derivadas de la aplicación de objetivos de calidad acústica al espacio interior de las edificaciones, a que se refiere el artículo 20, y la disposición adicional quinta de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, cuando al aplicar el sistema de verificación acústica de las edificaciones, establecido conforme a la disposición adicional cuarta de dicha Ley, se cumplan las exigencias acústicas básicas impuestas por el Código Técnico de la Edificación, aprobado mediante Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo.

VALORES LÍMITE DE INMISIÓN DE RUIDOS APLICABLES A NUEVAS INFRAESTRUCTURAS VIARIAS, FERROVIARIAS Y AEROPORTUARIAS

1. Las nuevas infraestructuras viarias, ferroviarias o aeroportuarias deberán adoptar las medidas necesarias para que no transmitan al medio ambiente exterior de las correspondientes áreas acústicas, niveles de ruido superiores a los valores límite de inmisión establecidos en la tabla A1, del apéndice III, evaluados conforme a los procedimientos del apéndice IV.

2. Así mismo, las nuevas infraestructuras ferroviarias o aeroportuarias no podrán transmitir al medio ambiente exterior de las correspondientes áreas acústicas niveles de ruido superiores a los establecidos como valores límite de inmisión máximos en la tabla A2, del apéndice III, evaluados conforme a los procedimientos del apéndice IV.

3. De igual manera, las nuevas infraestructuras viarias, ferroviarias o aeroportuarias deberán adoptar las medidas necesarias para evitar que, por efectos aditivos derivados directa o indirectamente de su funcionamiento, se superen los objetivos de calidad acústica para ruido establecidos en los artículos 14 y 16.

4. Lo dispuesto en este artículo se aplicará únicamente fuera de las zonas de servidumbre acústica.

VALORES LÍMITE DE VIBRACIONES APLICABLES A LOS EMISORES ACÚSTICOS

Los nuevos emisores acústicos, de los relacionados en el artículo 12.2 de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, deberán adoptar las medidas necesarias para no transmitir al espacio interior de las edificaciones destinadas a vivienda, usos residenciales, hospitalarios,

educativos o culturales, vibraciones que contribuyan a superar los objetivos de calidad acústica para vibraciones que les sean de aplicación de acuerdo con el artículo 16, evaluadas conforme al procedimiento establecido en el apéndice IV.

Disposición adicional segunda "Actividades e infraestructuras nuevas"

1. A los efectos de lo previsto en este Real Decreto tendrán la consideración de actividades nuevas aquéllas que inicien la tramitación de las actuaciones de intervención administrativa previstas en los párrafos a), b) y c) del art. 18.1 de la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del ruido, con posterioridad a la entrada en vigor de este Real Decreto.

2. Asimismo, lo dispuesto en este Real Decreto para las infraestructuras nuevas será de aplicación, teniendo en cuenta lo dispuesto en la disposición adicional tercera, a aquellas de competencia de la Administración General del Estado, cuya tramitación de la declaración de impacto ambiental se inicie con posterioridad a la entrada en vigor de este Real Decreto. A estos efectos, se entenderá como inicio de la tramitación la recepción porel órgano ambiental del documento inicial del proyecto, procedente del órgano sustantivo, conforme a lo dispuesto en la legislación en materia de evaluación de impacto ambiental.

3. Las actividades e infraestructuras nuevas se someterán a los valores límite de inmisión establecidos en el Apéndice III, teniendo en cuenta lo dispuesto en el artículo 10 en caso de tratarse de una zona de servidumbre acústica de una infraestructura.

Según la disposición adicional segunda, el proyecto en estudio no se considera como nuevo y por eso los valores limites del apéndice III no son de aplicación.

APÉNDICE I

A. Índices de ruido

1. Periodos temporales de evaluación.
Se establecen los tres periodos temporales de evaluación diarios siguientes:
- Periodo día (d): al periodo día le corresponden 12 horas;
- Periodo tarde (e): al periodo tarde le corresponden 4 horas;

- Periodo noche (n): al periodo noche le corresponden 8 horas.

Los valores horarios de comienzo y fin de los distintos periodos temporales de evaluación son: periodo día de 7.00 a 19.00; periodo tarde de19.00 a 23.00 y periodo noche de 23.00 a 7.00, hora local.

B. Índices de vibración

Definición del índice de vibración Law .
El índice de vibración, L_{aw} en decibelios (dB), se determina aplicando la fórmula siguiente:

$$L_{aw} = 20 \lg \frac{a_w}{a_0}$$

Siendo: a_w: el máximo del valor eficaz (RMS) de la señal de aceleración, con ponderación en frecuencia wm, en el tiempo t, a_w (t), en m/s^2.

a_0: la aceleración de referencia ($a_0 = 10^{-6}$ m/s^2).
Donde:

- La ponderación en frecuencia se realiza según la curva de atenuación wm definida en la norma ISO 2631-2:2003: Vibraciones mecánicas y choque – evaluación de la exposición de las personas a las vibraciones globales del cuerpo – Parte 2 Vibraciones en edificios 1 – 80 Hz.

- El valor eficaz aw (t) se obtiene mediante promediado exponencial con constante de tiempo 1s (lento). Se considerará el valor máximo de la medición aw. Este parámetro está definido en la norma ISO 2631-1:1997 como MTVV (Maximum Transient Vibration Value), dentro del método de evaluación denominado "running RMS".

APÉNDICE II

Objetivos de calidad acústica

Fila	Tipo de emplazamiento / uso	Día			Noche		
		Au	Ao	Ar	Au	Ao	Ar
1	Polígonos industriales	0,4	6	0,2	0,3	0,6	0,15
2	Zonas con predominio de tiendas y talleres frente a viviendas	0,3	6	0,15	0,2	0,4	0,1
3	Zonas mixtas	0,2	5	0,1	0,15	0,3	0,07
4	Zonas con predominio de viviendas frente a tiendas y talleres	0,15	3	0,07	0,1	0,2	0,05

Tabla 2.12 Tabla B – Objetivos de calidad acústica para ruido aplicables al espacio interior habitable de edificaciones destinadas a vivienda, usos residenciales, hospitalarios, educativos o culturales. (1)

(1) Los valores de la tabla B, se refieren a los valores del índice de inmisión resultantes del conjunto de emisores acústicos que inciden en el interior del recinto (instalaciones del propio edificio, actividades que se desarrollan en el propio edificio o colindantes, ruido ambiental transmitido al interior).

Nota: Los objetivos de calidad aplicables en el espacio interior están referenciados a una altura de entre 1,2 y 1,5 m.

Uso del edificio	Índice de vibración L_{aw}
Vivienda o uso residencial	75
Hospitalario	72
Educativo o cultural	72

Tabla 2.13 Tabla C – Objetivos de calidad acústica para vibraciones aplicables al espacio interior habitabla de edificaciones destinadas a vivienda, usos residenciales, hospitalarios, educativos o culturales

Ley 5/1999, de 8 de abril, de Evaluación del Impacto Ambiental

Recoge pues esta Ley, las exigencias establecidas por la Directiva 97/11/CE del Consejo, de 3 de marzo de 1997, por la que se modifica la Directiva 85/337/CEE, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente.

Proyectos sujetos al régimen general de evaluación del impacto ambiental:

10. Construcción de infraestructuras de transporte:

a) Vías ferroviarias para tráfico de largo recorrido.
Proyectos sujetos a evaluación del impacto ambiental para los que reglamentariamente debe establecerse un régimen simplificado de evaluación:

9. Proyectos de infraestructuras.

c) Construcción de vías ferroviarias, y de instalaciones de transbordo ínter modal, y de terminales ínter modales (proyectos no incluidos en el Anejo 1).

k) Tranvías, metros aéreos y subterráneos, líneas suspendidas o líneas similares destinadas principalmente al transporte de viajeros.

3. Revisión de la literatura

3.1. Breve repaso a la evolución del conocimiento.

Las vibraciones ocasionadas por el tránsito de trenes han sido estudiadas experimentalmente desde mediados del siglo XIX. En 1864, South publicó los estudios realizados en 1846 acerca del nivel de vibraciones inducidas por el ferrocarril a su paso por el túnel de Watford. En 1929, Hyde y Lintern se refirieron a estudios llevados a cabo por Mallock en 1901 sobre la caracterización de las vibraciones ocasionadas en la estación Central de Londres y su propagación hasta viviendas cercanas a Hyde Park.

Más recientemente se han realizado varios estudios sobre las vibraciones ocasionadas por trenes circulando a velocidades medias. Dawn y Stanworth midieron el nivel de vibraciones en una estructura situadas a 42 m de la vía, estudiando el efecto de la velocidad y el tipo de tren. Estos autores concluyeron que no siempre mayor velocidad del tren supone un aumento en el nivel de vibraciones. Dawn estudió además el efecto que la frecuencia de paso por traviesas tiene en el nivel de las vibraciones inducidas en el terreno. Melke y Kraemer midieron las aceleraciones de vibración originadas por un tranvía en vía, suelo y en un túnel. Jones y Block obtuvieron experimentalmente la respuesta vertical de traviesas y la respuesta vertical y transversal de un punto del terreno debidas al paso de un tren de mercancías a 50 Km/h, comparando los resultados obtenidos con los predichos por un modelo analítico (limitado a bajas frecuencias) desarrollado por ellos mismos. Lai et al. realizaron una serie de medidas con las cuales valorar el efecto del paso de trenes de alta velocidad por la línea italiana tanto en el terreno, como en el interior de algunas estructuras cercanas a la vías. Schillemans estudió el soterramiento de la línea férrea en la ciudad de Amberes para tener en cuenta su efecto sobre algunos edificios cuyas cimentaciones se encontraban a sólo 4 m del punto más alto del túnel proyectado. El análisis de los registros experimentales le condujo a recomendar el uso de vía en placa flotante para reducir el nivel de las vibraciones. Zhai et al. estudiaron el comportamiento dinámico del balasto midiendo la respuesta inducida por trenes de pasajeros y mercancías circulando a velocidades de 90 y 60 km/h, respectivamente. Los resultados de esta investigación mostraron que la respuesta del

balasto está caracterizada principalmente por frecuencias comprendidas entre 80 y 110 Hz. Xia et al. caracterizaron las vibraciones en el terreno inducidas por el paso sobre un viaducto de un tren de mercancías. El nivel de las vibraciones ocasionadas por el paso del tren aumentaba con la velocidad del tren y se atenuaba rápidamente con la distancia a las pilas de la estructura. En este trabajo también se obtuvieron las respuestas ante el paso del ferrocarril de dos edificios cercanos a la vía. Como era de prever, la amplitud de las vibraciones aumentaba con el número de plantas del edificio.

En los últimos años, la aparición de los trenes de alta velocidad ha llevado a que se realicen varias campañas de medidas experimentales con el objeto de obtener la amplitud de las vibraciones inducidas por trenes desplazándose a alta velocidad. La alarma causada por el problema en el ferrocarril sueco citado anteriormente dio a los investigadores la primera oportunidad de medir la respuesta dinámica del rail, del balasto y del terreno solicitados por el paso de un tren de alta velocidad. Fue durante el otoño de 1997 y la primavera de 1998, cuando la Administradora del Ferrocarril Sueco (Banverket) organizó ensayos en los cuales se pudieron medir los desplazamientos de traviesas, desplazamiento del rail, aceleraciones de vibración en puntos del suelo y velocidades de vibración de balasto y en el terreno, consecuencia del paso de un tren tipo X-2000 a velocidades comprendidas entre el 10 y 202 Km/h. A velocidades menores de 70 Km/h, la respuesta del terreno era similar a la estática. Sin embargo, cuando la velocidad del tren se aproximaba a los 200 Km/h, los desplazamientos se amplificaban notablemente temiéndose incluso el descarrilamiento del tren. Al poco tiempo Madshus y Kaynia presentaron un modelo numérico en el que se introducían las propiedades dinámicas del sistema vía – balasto – suelo que permitió explicar este nuevo fenómeno.

En diciembre de 1997, la compañía belga del ferrocarril también organizó ensayos para la homologación de la línea de alta velocidad entre las ciudades de Bruselas y París. Degrande y Schillemans midieron las aceleraciones de vibración ocasionadas en el rail, traviesas y terreno, hasta en puntos situados a 72 m de la vía, durante el paso de un tren Thalys circulando a velocidades comprendidas entre 160 y 330 Km/h. Los resultados de estos ensayos mostraron que las vibraciones estaban caracterizadas por la frecuencia de paso por ejes y la frecuencia de paso por bogues, y sus armónicos de orden superior, y por la frecuencia de paso por traviesas y, para el rango de velocidades estudiado, sólo se presentó una leve dependencia del nivel de vibración con la velocidad del tren.

Auersch realizó una exhaustiva investigación experimental en la línea de alta velocidad alemana, midiendo aceleraciones de vibración en vehículo, vía y suelo. Estudió diferentes convoyes circulando entre 100 y 300 Km/h, y concluyó que el efecto de la carga cuasi-estática sólo resultaba importante para la vía y para las zonas próximas a ésta, atenuándose su efecto rápidamente con la distancia. Auersch atribuyó a la variabilidad espacial de las propiedades del suelo el contenido en media frecuencia de la respuesta.

Galvín y Domínguez registraron las vibraciones en la línea de alta velocidad entre las ciudades de Córdoba y Málaga cuando sobre ella circulaban trenes AVE de las series 100, 102 y 103. Este estudio incluye el análisis del viaducto sobre el Arroyo de las Piedras de 93,4 m de altura.

Por último, también cabe mencionar las aportaciones realizadas por Xia et al., que estudiaron el comportamiento de viaductos para trenes de alta velocidad, y Lombaert et al, que estudiaron el nivel de vibraciones inducido por el paso de trenes de alta velocidad en la línea entre Bruselas y Colonia, usando los registros obtenidos durante los ensayos de homologación realizados con un tren ICE circulando a velocidades comprendidas entre 155,9 y 225,3 Km/h, y un tren Thalys circulando a velocidades comprendidas entre 218,1 y 326,1 Km/h.

3.2. Aproximaciones actuales al problema de impacto vibratorio.

En la última década, debido a la proliferación de las líneas de alta velocidad, muchos investigadores se han dedicado al estudio de las vibraciones ocasionadas por el tráfico ferroviario. A continuación, se presenta el estado actual del conocimiento, revisando los modelos analíticos y numéricos propuestos para caracterizar las vibraciones.

3.3. Modelos para predecir las vibraciones inducidas por trenes de alta velocidad.

El estudio de las vibraciones inducidas por el tráfico ferroviario requiere un modelo tridimensional que permita considerar la interacción vía-suelo-estructura. En este modelo se podrían distinguir tres partes: la caracterización de la fuente de vibración, la propagación de las ondas y la respuesta de las estructuras. La generación de las vibraciones está caracterizada por las propiedades dinámicas del suelo, incluyendo sus mecanismos de amortiguamiento. Por último, la estructura que se encuentra solicitada por las vibraciones ocasionadas por el tren está caracterizada por su cimentación y el suelo que la rodea, su rigidez y su masa. Todos estos factores deberían ser considerados en los modelos desarrollados con el propósito de estudiar el problema en cuestión.

Los primeros modelos para predecir el nivel de vibraciones ocasionadas por el tráfico ferroviario aparecieron a mediados de los años setenta. Gutowski y Dym propusieron un modelo en el que el tren se representaba o bien como una carga puntual, o bien como una línea de cargas. Estos autores estudiaron los mecanismos de atenuación del nivel de vibraciones en el suelo para ambos modelos de cargas y concluyeron que si se usa un modelo en el que el tren se modela como una carga lineal, el mecanismo de amortiguamiento del suelo puede limitarse al interno del material, despreciando el amortiguamiento geométrico. Sin embargo, pocos años después Verhas comparó los resultados obtenidos empleando ambos modelos de carga concluyendo que para obtener de un modo preciso el nivel de vibraciones inducidas por el paso del tren, ambos mecanismos de atenuación deben ser considerados. Durante los años setenta y ochenta también se prestó atención al tráfico de metropolitanos. Por ejemplo, Kurzweil propuso una expresión analítica para obtener el nivel de vibraciones ocasionado por el paso del convoy en estructuras cercanas al túnel, mientras que Melke presentó un procedimiento para obtener la amplitud de las vibraciones inducidas teniendo en cuenta toda cadena de transmisión.

En la última década, debido a la rápida expansión de las líneas de alta velocidad, se han desarrollado varios modelos analíticos, semi-analíticos y numéricos para obtener el nivel de vibraciones inducido en el suelo por el paso de trenes. Como se dijo anteriormente, la caracterización de la fuente de vibración, es uno de los aspectos a tratar del problema. Una de las aportaciones mas brillantes en lo que a esto respecta fue realizada por Krylov y sus colaboradores. En estos trabajos se presenta un método analítico para representar la parte cuasi-estática de la fuerza transmitida por el tren al suelo, a través del rail y las traviesas. El rail se representa como una viga de Euler-Bernoulli sobre un semiespacio elástico que puede ser homogéneo o estratificado. En primer lugar, los autores consideran un tren desplazándose a velocidad constante sobre la vía, lo cual genera su deflexión. Después, las traviesas que se encuentran en la parte flectada, dependiendo de las propiedades de rail y traviesas, el sistema de fijación y la rigidez del terreno sobre el que descansa la vía, transmiten la carga al suelo. Por último, las vibraciones verticales del terreno son obtenidas empleando funciones de Green, considerando únicamente la contribución de las ondas de Rayleigh.

Posteriormente, Dieterman y Metrikine y Metrikine y Popp extendieron el modelo de Krylov y colaboradores, y desarrollaron un modelo que permite considerar la interacción entre la vía y el suelo. En este caso, la vía se representa como una viga elástica que se encuentra situada sobre un semiespacio elástico. Estos autores suponen que la geometría del problema es homogénea en la dirección longitudinal de la vía, lo cual les permite realizar la transformada de Fourier en dicha dirección y en la coordenada temporal y, de este modo, desarrollar la formulación en el dominio de la frecuencia y número de onda. Para simplificar la complejidad del problema, en los primeros

trabajos de Metrikine y sus colaboradores, despreciaron las tensiones tangenciales en la interfase entre la vía y el suelo y supusieron una distribución uniforme de las tensiones normales a lo largo de la sección transversal de la vía. Además, sólo requirieron la compatibilidad de los desplazamientos en la línea media de la viga mediante la cual la vía es modelada. No obstante, recientemente Steenbergen y Metrikine han revisado las hipótesis iniciales de los trabajos de Metrikine, y han concluido que solamente resultan válidas cuando el tren circula a velocidades moderadas. En estos trabajos se calcula analíticamente la rigidez del sistema vía-suelo para el caso de un semiespacio homogéneo, y para el caso de un suelo estratificado.

Las simplificaciones propuestas por Metrikine también han sido empleadas en los trabajos de Jones y colaboradores. Entre estas investigaciones caben destacar las presentadas por Jones et al., Sheng et al. y Sheng et al., en las que se representa la vía empleando elementos viga y elementos muelle, que son acoplados a un modelo que representa el comportamiento dinámico de un terreno estratificado. En los trabajos realizados por Jones y Sheng se usa un modelo de generación de vibraciones en el que se separan las vibraciones inducidas por el paso del tren en dos partes. En la primera, se tiene en cuenta la carga cuasi-estática, de un modo similar al propuesto por Krylov y colaboradores, mientras que en la segunda se incluye el efecto de las irregularidades del rail y las ruedas. Jones y sus colaboradores realizaron una completa validación del modelo numérico propuesto en sus trabajos, comparando los resultados computados con los resultados experimentales obtenidos en tres localizacioines diferentes: Ledsgard, Via Tedalda y Burton Joyce. A partir de este estudio, Sheng et al. concluyeron que cuando la velocidad del tren es mucho menor que la velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh en el suelo, las vibraciones generadas como consecuencia de las irregularidades del rail y las ruedas son tan importantes como las generadas debido al efecto cuasi-estático de la carga. Sin embargo, cuando la velocidad del tren se aproxima a la velocidad de propagación de las ondas en el suelo, las vibraciones en el terreno se deben principalmente al efecto de un tren de cargas de valor constante que se desplaza a una cierta velocidad (carga cuasi-estática).

Del mismo modo que en los trabajos de Jones y colaboradores, Takemiya ha propuesto un modelo en el que se considera que las vibraciones generadas por el paso del tren pueden representarse como la suma de un modelo que tenga en cuenta el efecto de una carga cuasi-estática y un modelo que considere el efecto de las irregularidades. El modelo propuesto por Takemiya también está formulado en el dominio de la frecuencia y número de onda, y en él la vía se representa como una viga de Euler-Bernoulli, mientras que pueden considerarse topografías irregulares mediante una formulación en el dominio 2.5-D del método de los elementos finitos.

En Europa, varios investigadores han contribuido al desarrollo de las líneas de alta velocidad de sus respectivos países. La línea de alta velocidad noruega se diseñó teniendo en cuenta los resultados computados con un modelo semiempírico (limitado a bajas frecuencias) desarrollado por Madshus et al. Más tarde, Madshus y Kaynia estudiaron también la línea de alta velocidad sueca en las proximidades de Ledsgard. En estos trabajos presentaron un modelo numérico en el que se introducían las propiedades dinámicas del sistema vía-balasto-suelo usando la formulación del método de los elementos finitos y las funciones de Green para un terreno estratificado propuesta por Kausel y Roësset en el dominio de la frecuencia y número de onda, que permitió explicar el elevado nivel de vibraciones que inducía el paso de un tren cuando su velocidad se acercaba a 200 Km/h.

La línea de alta velocidad alemana ha sido estudiada profusamente por Auersch empleando un modelo propuesto por él mismo que tiene en cuenta la interacción vehículo-vía-suelo. En este trabajo el comportamiento dinámico del vehículo se representa mediante un modelo multi-cuerpo, la vía se considera empleando el método de los elementos finitos y el suelo mediante el método de los elementos de contorno en el dominio de la frecuencia y del número de onda.

Degrande et al. han llevado a cabo varios estudios, tanto numéricos como experimentales, en la línea de alta velocidad belga. Degrande ha empleado el modelo presentado por Lombaert et al. para tráfico rodado y extendido a tráfico ferroviario por Clouteau et al., junto con el modelo analítico de Krylov para representar la carga inducida en el suelo por un eje de carga a través de las traviesas, para predecir el nivel de las vibraciones en diferentes puntos del suelo situados hasta a 72 m de la vía, inducidas por el paso de un tren de alta velocidad Thalys, y ha validado el modelo propuesto experimentalmente comparando los resultados computados con los medidos. Recientemente, Lombaert et al. han realizado una destacable contribución en lo referido a la representación del mecanismo de generación de vibraciones desarrollando y validando, mediante medidas experimentales, un completo modelo numérico que tiene en cuenta la interacción dinámica entre el vehículo, la vía y el suelo.

En España, Galvín y Domínguez han desarrollado y validado experimentalmente registros tomados en la línea de Alta Velocidad Córdoba-Málaga, un modelo numérico basado en formulaciones del tiempo del método de los elementos de contorno y el método de los elementos finitos en el dominio, que permite obtener directamente la respuesta transitoria del suelo y de las estructuras cercanas a la vía.

3.4. Requerimientos actuales.

El estado del conocimiento revisado en el punto anterior pone de manifiesto que se ha hecho un esfuerzo considerable durante la última década para desarrollar modelos analíticos y numéricos con los que predecir las vibraciones ocasionadas por el paso de trenes de alta velocidad. La mayor parte de estos modelos están formulados en el dominio de la frecuencia y número de onda, usando las funciones de Green obtenidas por Kausel y Roësset, lo que conlleva a suponer una geometría del problema homogénea en la dirección de la vía. De este modo, no considerándose la naturaleza tridimensional del problema, no pueden tenerse en cuenta cambios en la rigidez vertical de la vía, como los que se deben a inclusiones en el terreno, obras de drenaje, pasos inferiores o túneles. Además, estos modelos no permiten la discretización real del problema, por lo que la geometría de la vía, los efectos del balasto o la placa y otros efectos locales sólo pueden ser tenidos en cuenta de un modo aproximado. Otro aspecto importante no recogido en los modelos presentados hasta la fecha, concierne al estudio de las vibraciones inducidas por el tráfico ferroviario en las estructuras cercanas a la vía, considerando la interacción dinámica suelo-estructura y el comportamiento no lineal de las estructuras. Esto hace que los modelos existentes no puedan ser usados en la etapa de diseño de estructuras que se prevean puedan estar afectadas por el paso del ferrocarril, o que permitan, en su caso de estructuras en servicio con elevados niveles de vibraciones, identificar las causas de dichos niveles y valorar posibles medidas de mitigación.

4. Análisis de estrategias

4.1. Introducción

En el presente apartado se analizan parte de los proyectos llevados a cabo tanto a nivel nacional como internacional. Los distintos documentos analizados plantean el problema de las vibraciones tanto para métodos empíricos, como analíticos y numéricos.

Cabe destacar que gran parte de los estudios realizados en el campo de las vibraciones inducidas por el ferrocarril se han desarrollado en las universidades técnicas de los distintos países, constituyéndose éstas como los grandes centros de conocimiento en este campo.

4.2. Trabajos a nivel internacional.

A continuación, se muestran algunos de los proyectos llevados a cabo dentro del campo de las vibraciones provocadas por el ferrocarril a nivel internacional:

PAÍSES BAJOS

Han sido varios los estudios llevados a cabo en el campo de las vibraciones destacando el denominado "A method of multiple reflections for modelling soil vibration induced by train in tunnel" desarrollado por M. Shamalta y A. V. Metrikine en la Delft University of Technology. En dicho estudio se analiza un modelo básico tridimensional con el que se estudian las vibraciones provocadas por el ferrocarril en túneles considerando el túnel como un elemento elástico y el suelo como una capa viscoelástica. La carga del ferrocarril se considera como una carga armónica que se desplaza a velocidad constante en el interior del túnel.

Por otro lado se lleva a cabo el "Hybrid method for measurement and predictions of vibrations in Railwaytunnels in the Netherlands", desarrollado por Peter Roelands y por Win Soede, dónde se concluye que un modelo híbrido basado en el conocimiento científico y apoyado en mediciones reales puede ser una herramienta mas que satisfactoria para la predicción de los niveles de vibración provocadas por el ferrocarril.

JAPÓN

En Japón Kiwamu Tsuno desarrolló en colaboración con Kojiro Fujii y Yasushi Takei dentro del Tunnel Engineering Laboratory de la Structures Technology Division el estudio denominado "Propagation properties of train-induced vibration from Tunnels", donde se analizaron y compararon mediciones reales en túneles con los resultados obtenidos con un método de elementos finitos (FEM) bidimensional de interacción suelo-túnel.

CHINA

En China dentro de la Zhejiang University, Departament of Civil Enginnering se desarrolló a cargo de Bian Xue-cheng y de Chen Yun-min el informe denominado "Analysis of moving load induced ground vibrations based on thin-layer method" donde se analiza dentro del dominio del tiempo la solución al problema de las vibraciones en el suelo debidas a cargas móviles mediante métodos de capa delgada.

SUECIA

Recientemente se ha llevado a cabo en Suecia, a cargo de Andreas Eitzenberger de la Luleå University of Technology, un informe sobre las vibraciones causadas por el ferrocarril en túneles ("Train-induced Vibrations in Tunnels – A review") donde se analiza la propagación de las vibraciones ocasionadas por el ferrocarril en los túneles, principalmente en suelos en roca.

En dicho informe se hace un análisis sobre el estado general del arte en el ámbito de las vibraciones causadas por el ferrocarril y se hace especial énfasis en la necesidad de ampliar las investigaciones dentro de este campo en el futuro dado que no existe una metodología homogénea de medición y de predicción de las vibraciones causadas por el ferrocarril en las edificaciones aledañas.

REINO UNIDO

En Reino Unido, a través de la University of Southampton, el Dr. Chris Jones investiga el campo de las vibraciones provocadas por el ferrocarril así como las posibles soluciones de mitigación que se llevan actualmente a cabo dentro del informe "Ground vibration the issues the railways face analysis mitigation".

4.3. Trabajos a nivel nacional.

Tal y como se ha mencionado anteriormente en España son las principales universidades politécnicas del país las que centran los estudios llevados a cabo dentro del campo de las vibraciones.

Se hace también mención a continuación, al proyecto CATdBTren, que actualmente se está llevando a cabo a través de un consorcio de empresas y centros de investigación encabezados por SENER Ingeniería y Sistemas S.A.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

La Universidad Politécnica de Madrid, a través de su Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial (FFII), y en colaboración con el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio ha desarrollado varios trabajos relativos a las vibraciones causadas por el ferrocarril, destacando los trabajos relativos a los modelos de predicción y sistemas de evaluación de indicadores a través de Alberto Fraile de Lerma.

El CEMIM (Centro de Modelado de Ingeniería Mecánica) ha desarrollado un modelo de predicción del nivel esperado de las vibraciones para el paso de trenes de alta velocidad, basándose en la metodología empleada por E.E. Ungar y E.K. Bender para trenes subterráneos, con diversas correcciones en función principalmente del tipo de suelo sobre el que se asienta el ferrocarril.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

En la Universidad Politécnica de Cataluña, dentro del Departamento de Ingeniería Mecánica, se han desarrollado varios proyectos sobre las vibraciones causadas por el ferrocarril.

El primero de ellos es el desarrollado por el grupo de investigadores formado por Ángel Sánchez, Joan Carmona, Meritxell Genescà y Teresa Pàmies del LEAM (Laboratorio de Ingeniería Acústica y Mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Aeronáuticos de Terrasa, ETSEIAT). El resultado de dicho proyecto queda reflejado dentro del informe de "Propagación de vibraciones de trenes en el terreno".

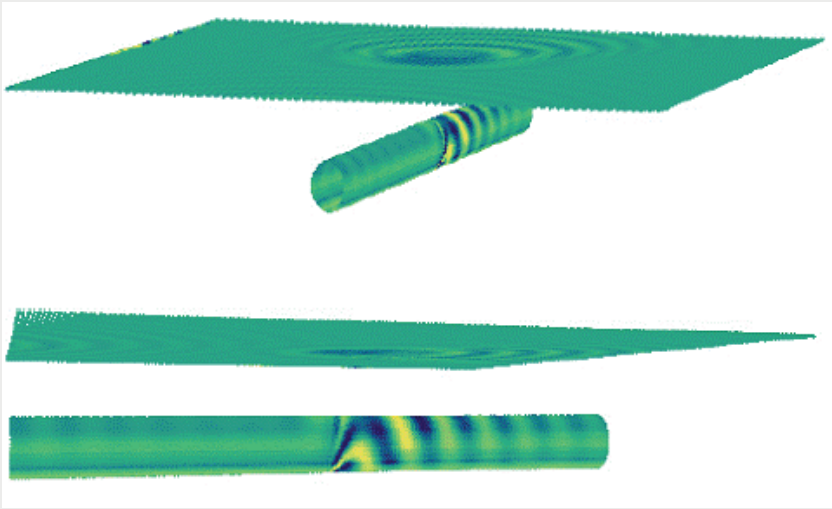
Dentro de estas actividades también se desarrollaron los "Modelos semiempíricos de predicción basados en expresiones analíticas" a cargo de Jordi Romeo Garbí, Joan Cardona, Ángel Sánchez, Andreu Balastegui y Robert Arcos.

Por otra parte se ha desarrollado también el informe de "Modelos para la generación y transmisión de vibraciones al paso de un tren" a cargo de Jesús Otero, Jordi Martínez, Mª Antonia de los Santos y Salvador Cardona.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE LA UNIVERSIDAD DE GRANADA

Actualmente en dicho centro se llevan a cabo, dentro el Grupo de Mecánica de Sólidos y Estructuras y encabezado por Rafael Gallego Sevilla (como investigador principal), los trabajos referidos a las "Vibraciones inducidas por cargas dinámicas, fijas o móviles, en estructuras aledañas superficiales o soterradas: una metodología avanzada de cálculo".

Dentro de dicho proyecto se desarrolla una metodología basada en modelos 2.5D que pretende dar solución al problema de las vibraciones causadas por el paso de ferrocarril mediante métodos de Elementos de Contorno.



Superficie libre y soterrada sometidas a una carga móvil.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE SEVILLA

Dentro de la Universidad de Sevilla, y en especial dentro de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros, se han desarrollado varios trabajos relacionados con las vibraciones generadas por el ferrocarril Las investigaciones están encabezadas por Pedro Galvín, Andrés Sáez y José Domínguez que han presentado los trabajos de "Modelos de Elementos Finitos y de Contorno. Acoplamiento", en el que se propone un modelo numérico para predecir el nivel de las vibraciones inducidas en el suelo y en estructuras cercanas a la vía por el paso de trenes de alta velocidad y "Validación de modelos numéricos mediante ensayos. Aplicaciones" para el que se realizó un análisis experimental de las vibraciones ocasionadas por el paso de trenes de alta velocidad en la línea Córdoba – Málaga.

PROYECTO CATDBTREN

La empresa española SENER, Ingeniería y Sistemas S.A, encabeza un consorcio de empresas y centros de investigación financiados por las Ayudas a la investigación concedidas por ACC1Ó, que pretende desarrollar un software de predicción de vibraciones para infraestructuras ferroviarias.

El consorcio de empresas, encabezado por SENER, esta constituido por las empresas:

- Railtech
- Quantech
- Railgrup

Y los centros de investigación:

- LEAM (Laboratorio de Ingeniería Acústica y Mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Aeronáuticos de Terrasa, ETSIIAT)
- CTM (Centro de Investigación de Manresa)

Dicho proyecto tiene fijado como principales objetivos el desarrollo de un entorno de simulación que permita prever el impacto vibratorio de una infraestructura ferroviaria en fase de proyecto así como el desarrollo de superestructuras ferroviarias de baja transmisión vibratoria.

5. Conclusiones

Aunque tradicionalmente el concepto de contaminación acústica engloba la presencia en el medio ambiente tanto de ruido como de vibraciones, y siendo fenómenos de análoga naturaleza, la realidad es que desde todos los puntos de vista se ha prestado mucha más atención al ruido que a las vibraciones y esto es así, aún teniendo en cuenta que en la mayoría de las ordenanzas municipales sobre contaminación acústica se vienen regulando ambos fenómenos.

En España, con la publicación de la Ley del Ruido y su desarrollo reglamentario se ha abordado un nuevo enfoque en la evaluación y control de la contaminación acústica y en particular en el apartado de las vibraciones como problema ambiental, estableciendo una nueva regulación que incluye la evaluación a través de indicadores y procedimientos de evaluación novedosos, así como el establecimiento de nuevos objetivos de calidad para vibraciones en el interior de edificaciones.

A día de hoy, y durante la última década especialmente, se ha hecho un esfuerzo considerable para desarrollar modelos analíticos y numéricos con los que predecir las vibraciones ocasionadas por el paso de los trenes. Estos modelos dada la complejidad del sistema no consideran la naturaleza tridimensional del problema y no pueden tenerse en cuenta cambios en la rigidez vertical de la vía, como los debidos a la existencia de obras de drenaje, pasos inferiores o túneles. Además, no se ha llegado a la discretización real de las secciones, por lo que la geometría de la vía, los efectos del balasto o las fijaciones y placas de asiento sólo son tenidos en cuenta de forma aproximada.

A pesar de esto, tanto a nivel nacional como internacional, se han realizado grandes avances en la elaboración de modelos de predicción basados en modelos de elementos finitos y modelos de elementos de contorno, apoyados en el incesante avance de la tecnología.

No obstante, en España son cada vez más las ciudades que cuentan con sistemas tranviarios y de metro, por lo que la necesidad de un estudio específico para la predicción y atenuamiento de las vibraciones generadas por estos sistemas de transporte se hace más que necesaria.

6. Referencias

A continuación se enumeran las principales referencias bibliográficas consultadas:

- Bian Xue-Cheng, Chen Yun-min. "Analysis of moving load induced ground vibrations based on thin-layer method". Departament of Civil Engineering. Zhejiang University, Hangzhou, China, 2006.

- Eitzenberger A. "Train-induced vibrations in Tunnels – A review". Department of Civil, Mining and Environmental Engineering. Luleå University of Technology, Sweden, 2008.

- Fujii K. Takei Y. Tsuno K. "Propagation Properties of Train-Induced Vibration from Tunnels". Tunnel Engineering Laboratory, Structures Technology Division. Japan, 2005.

- Gallego Sevilla R. "Vibraciones inducidas por cargas dinámicas, fijas o móviles, en estructuras aledañas superficiales o soterradas: una metodología avanzada de cálculo". Grupo de Mecánica de Sólidos y Estructuras. Universidad de Granada, España.

- Galvín P. Domínguez J. "Análisis numérico y experimental de las vibraciones ocasionadas por el paso de trenes de alta velocidad en el suelo y en estructuras cercanas a la vía". PhD Thesis, Universidad de Sevilla, España, 2007.

- Galvín P. Domínguez J. "Experimental and Numerical Analysis of vibrations induced by high-speed trains on the Cordoba-Malaga Line. Soil dynamics and earthquake engineering". Universidad de Sevilla, España.

- Galvín P. Sáez A. Domínguez J. "Modelos de elementos finitos y contorno. Acoplamiento". Universidad de Sevilla, España.

- Galvín P., Domínguez J. "Validación de modelos numéricos mediante ensayos. Aplicaciones". Universidad de Sevilla, España, 2008.

- Instituto Técnico de la Vialidad y del Transporte, INTEVIA. Jornada "Vibraciones causadas por el ferrocarril. Análisis y soluciones correctoras". Madrid, abril de 2008.

- Roelands P. Soede W. "Hybrid method for measurement and predictions of vibrations in railwaytunnels in the Netherlands". Infra-tunnel 2001, Paper 20. Amsterdam, Paises Bajos, abril 2001 .

- Romeu J. Cardona J. Sánchez A. Balastegui A. Arcos R. "Modelos semiempíricos de predicción basados en expresiones analíticas". Laboratorio de Ingeniería Acústica y Mecánica, LEAM. Universidad Politécnica de Cataluña, España.

- Sánchez A. Cardona J. Genescà M Pàmies T. "Propagación de vibraciones de trenes en el terreno". Laboratorio de Ingeniería Acústica y Mecánica, LEAM. Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2005.

- Sanz Sa J. "Normativa. Reglamento de la ley del Ruido". Ministerio de Medio Ambiente.

- Shamalta M. Metrikine A.V. A method of multiple reflections for modelling soil vibration induced by a train in tunnel. Delft University of Technology, Netherlands.

Fundación
Fidias