

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

Grado en Ingeniería Civil



**ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN DE BLOQUES DE HORMIGÓN CON RESIDUOS DE NEUMÁTICOS
COMO ELEMENTOS ANTI-ONDA EN VÍAS FERROVIARIAS. EVALUACIÓN TÉCNICO
ECONÓMICA. APLICACIÓN A LA RED DE FERROCARRILS DE LA GENERALITAT DE CATALUÑA.**

**TRABAJO FINAL DE GRADO
Curso 2015/2016**

ALUMNO:
DANIEL GALLÉN BROCH

TUTORA:
JULIA IRENE REAL HERRÁIZ

COTUTOR:
FRAN RIBES LLARIO

VALENCIA, JUNIO DE 2016

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----------|
| Resumen..... | 4 |
| Resum..... | 5 |
| Abstract | 6 |
| <i>Capítulo 1. Antecedentes, objetivos, alcance y metodología</i> | <i>8</i> |
| 1.1 Antecedentes | 9 |
| 1.2 Objetivos y alcance..... | 9 |
| 1.3 Metodología | 10 |
| <i>Capítulo 2. Estudio de las vibraciones ferroviarias</i> | <i>12</i> |
| 2.1 Introducción | 13 |
| 2.2 Mecanismos de generación | 13 |
| 2.2.1 El movimiento de la carga “cuasi-estática” | 13 |
| 2.2.2 Las fuerzas dinámicas..... | 14 |
| 2.3 Mecanismos de transmisión | 20 |
| 2.3.1 Parámetros influyentes en la transmisión | 20 |
| 2.3.2 La placa de asiento en la transmisión de vibraciones | 21 |
| 2.3.3 Atenuación de la señal vibratoria..... | 24 |
| 2.4 Mecanismos de propagación | 24 |
| 2.4.1 Propagación en un medio elástico homogéneo..... | 24 |
| 2.4.2 Propagación en un medio estratificado | 27 |
| 2.4.3 El diagrama de dispersión | 28 |
| 2.4.4 Atenuación de la señal vibratoria..... | 28 |
| 2.5 Frecuencias a los que se producen los diferentes fenómenos | 30 |
| <i>Capítulo 3. Hormigones NFU y Hormigones Reforzados con Fibras.</i> | <i>32</i> |
| 3.1 Introducción | 33 |
| 3.2 Neumáticos fuera de uso | 34 |
| 3.2.1 Composición, forma y tamaño del polvo de caucho..... | 35 |
| 3.3 Hormigones con residuos de NFU..... | 38 |
| 3.3.1 Comportamiento estructural y vibratorio del hormigón con caucho | 39 |
| 3.4 Hormigones reforzados con fibras | 42 |
| 3.4.1 Hormigón Reforzado con Fibras de Vidrio (GFRC) | 43 |



| | | |
|---|--|-----------|
| 3.4.2 | Hormigón Reforzado con Fibras de Polipropileno (PFRC)..... | 44 |
| 3.4.3 | Aplicaciones de hormigones reforzados | 47 |
| 3.5 | Conclusiones..... | 50 |
| <i>Capítulo 4. Mecanismos de mitigación.....</i> | | <i>51</i> |
| 4.1 | Introducción | 52 |
| 4.2 | Mecanismos de mitigación de frentes de ondas | 53 |
| 4.2.1 | Conceptos previos..... | 53 |
| 4.2.2 | Absorción de las ondas..... | 54 |
| 4.2.3 | Frecuencia de corte..... | 56 |
| 4.3 | Medidas de mitigación existentes en el mercado..... | 58 |
| 4.3.1 | Sujeciones..... | 59 |
| 4.3.2 | Placas de asiento | 60 |
| 4.3.3 | Suela bajo traviesa | 61 |
| 4.3.4 | Traviesas envueltas en cajones elásticos | 63 |
| 4.3.5 | Mantas elásticas..... | 63 |
| 4.3.6 | Estructuras apoyadas sobre capas rígidas..... | 65 |
| 4.3.7 | Zanjas | 66 |
| 4.3.8 | Columnas de grava | 68 |
| 4.3.9 | Vibrocompactación | 70 |
| 4.3.10 | Bloques anti-onda (Wave-Impeding Blocks “WIBS”) | 71 |
| 4.3.11 | Medidas correctoras | 72 |
| 4.3.12 | Actuaciones en el vehículo..... | 73 |
| 4.4 | Conclusiones..... | 74 |
| <i>Capítulo 5. Estudio técnico-económico de alternativas.....</i> | | <i>76</i> |
| 5.1 | Introducción | 77 |
| 5.2 | Estudio de las alternativas propuestas | 77 |
| 5.3 | Valoración de las medidas de mitigación propuestas..... | 80 |
| 5.4 | Valoración multicriterio de la solución óptima..... | 90 |
| 5.5 | Conclusiones..... | 96 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | | 100 |
| ÍNDICE DE TABLAS | | 103 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 105 |





Resumen

En los últimos años, el ferrocarril está siendo el medio de transporte que más éxito está ganando en cuotas de mercado. Con su gran capacidad de carga, así como su alta eficiencia y funcionalidad y su reducido impacto sobre el medioambiente, se ha convertido en un medio de transporte básico tanto para personas, como para el transporte de mercancías. El aumento de la demanda ha propiciado una mejora del servicio aumentando entre otras cosas las velocidades de circulación y las cargas inducidas a la vía, las cuales han provocado un aumento de la generación de vibraciones ferroviarias. En el presente Trabajo Final de Grado, vamos a estudiar la idoneidad de la inclusión del uso del hormigón con residuos de neumáticos fuera de uso como material para la materialización de bloques anti-onda en una vía ferroviaria como medida de mitigación de vibraciones. Para ello, hemos elegido como zona de estudio un tramo de vía convencional que pasa cerca de una zona urbana donde, a través de vibraciones inducidas por el tráfico ferroviario, provocan afecciones a los edificios colindantes. A partir de resultados obtenidos de otros estudios realizados en vías análogas, desarrollaremos un estudio técnico-económico de alternativas propuestas para la mitigación de estas vibraciones, entre las cuales se estudiará el material propuesto. De esta forma, hallaremos la solución más idónea que permita mantener el servicio de la vía sin que provoque problemas a los edificios de alrededor.

Palabras clave: Bloques anti-onda, Tráfico ferroviario, Estudio técnico-económico, Vibraciones, neumáticos fuera de uso

Resum

En els últims anys, el ferrocarril està sent el mitjà de transport que més èxit està guanyant en quotes de mercat. Amb la seua gran capacitat de càrrega, així com la seua alta eficiència i funcionalitat i el seu reduït impacte sobre el mediambient, s'ha convertit en un mitjà de transport bàsic tant per a persones com per al transport de mercaderies. L'augment de la demanda ha propiciat una millora del servei augmentant entre altres coses les velocitats de circulació i les càrregues induïdes a la via, les quals han provocat un augment de la generació de vibracions ferroviàries. En el present Treball Final de Grau, estudiarem l'aptitud de la inclusió de l'ús del formigó amb residus de pneumàtics fora d'ús com material per a la materialització de blocs anti-ona en una via ferroviària com a mesura de mitigació de vibracions.

Per a este fi, hem elegit com a zona d'estudi un tram de via convencional que passa prop d'una zona urbana on la propagació de les vibracions del tràfic ferroviari, provoca afeccions als edificis colindants. A partir de resultats obtinguts d'altres estudis realitzats en vies anàlogues, desenvoluparem un estudi tècnic-econòmic d'alternatives proposades per a la mitigació d'aquestes vibracions, entre les que s'estudiarà el material proposat. D'aquesta manera, trobarem la solució més apta que permeta mantindre el servei de la via sense que provoque problemes als edificis d'alrededor.

Paraules clau: Blocs anti-ona, tràfic ferroviari, estudi tècnic-econòmic, vibracions, pneumàtics fora d'ús



Abstract

In the last few years, the railway has become the most successful conveyance in the market shares. The railway has a huge load capacity and it has also a high utility that makes reduce the pollution in the environment. Nowadays, it is a basic mean of transport for people and even more, for merchandises. Due to high demand, it has led to improve the services increasing the traffic speed and the loads induced to the tracks. All of this has made a raise of railway vibration. In this Final Project, we are going to study the aptitude of including the use of concrete with waste tires as material for the creation of anti-wave blocks on a railway track as a way of reduce the vibrations.

To do this, we have chosen a study area with common tracks. It is close to an urban space where, throw rail traffic induced vibrations, cause conditions to the surrounding buildings. With the results that we have obtained from other studies, we are going to develop an economic technical study of alternative proposals for the relief of those vibrations, including our proposed material. In this specific way, we are going to find de perfect solution for maintaining the service road without causing problems in the surrounding buildings.

Keywords: wave-impeding blocks, rail traffic, economic technical study, Vibrations, disused tyres





Capítulo 1. Antecedentes, objetivos, alcance y metodología

1.1 Antecedentes

En el presente TFG se realizará un estudio teórico de un nuevo material a base de hormigón con inclusión de residuos de neumáticos fuera de uso con el fin de aumentar la capacidad amortiguadora de este. Para ello, se valorará el uso del hormigón con residuos de NFU como material para la materialización de bloques anti-onda en una vía ferroviaria y su idoneidad como elemento mitigador de vibraciones.

A partir de los datos facilitados de diferentes estudios de vías análogas estudiaremos la capacidad mitigadora que presenta este material y el de las demás alternativas que vamos a proponer.

Finalmente, se realizará un estudio técnico-económico del cual a partir de él buscaremos la solución más eficiente económicamente, al mismo tiempo que mantenga una vida útil larga con el mínimo mantenimiento de la vía. De esta forma, si es posible, evitaremos también el corte parcial o total de la línea férrea.

1.2 Objetivos y alcance

Como se ha comentado en el punto anterior, el presente TFG surge con la idea de estudiar un nuevo material a base de hormigón con inclusión de residuos de neumáticos fuera de uso con el fin de aumentar la capacidad amortiguadora de este. Se estudiará el uso del hormigón con residuos de NFU como material para la materialización de bloques anti-onda en una vía ferroviaria y su idoneidad como elemento mitigador de vibraciones.

Para el completo desarrollo del TFG, se precisa del desarrollo de un estudio técnico-económico de alternativas que puedan mitigar las vibraciones que causa el paso de los trenes a su entorno, por lo que los objetivos fundamentales quedan estructurados de la siguiente manera:

1. Realizar una evaluación de los Hormigones NFU y Hormigones Reforzados con Fibras.
2. Planteamiento de estrategias de mitigación.
3. Estudio de la capacidad de mitigación de vibraciones de la solución propuesta.
4. Estudio técnico-económico de las alternativas propuestas.
5. Análisis multicriterio.,

El alcance del presente TFG consistirá encontrar la solución más idónea a través de una valoración técnico-económica de las alternativas propuestas para la mitigación de vibraciones en un tramo de vía convencional situada en Sant Cugat del Valles, a partir de los resultados de aceleraciones obtenidos de modelos numéricos.



1.3 Metodología

Para el desarrollo completo del presente documento se parte con la idea de utilizar un nuevo material a base de hormigón con inclusión de residuos de neumáticos fuera de uso con el fin de aumentar la capacidad amortiguadora de este.

En primer lugar, realizaremos una evaluación de los hormigones NFU y los Hormigones Reforzados con Fibras y estudiaremos todos los mecanismos de mitigación más comunes en el sector ferroviario.

A continuación, a partir de datos obtenidos de otros estudios se realizara una evaluación del uso de bloques anti-onda y otras alternativas propuestas como estrategia de mitigación de vibraciones que generan los trenes a la vía y su entorno.

Finalmente, realizaremos un estudio técnico-económico de las posibles alternativas para mitigar las vibraciones, del cual sacaremos la solución más eficiente.

Capítulo I

Antecedentes, objetivos, alcance y metodología

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS**





Capítulo 2. Estudio de las vibraciones ferroviarias

2.1 Introducción

En el presente capítulo pretende servir de aproximación al estudio de la generación de vibraciones ferroviarias, dando a conocer las causas y características de su transmisión para finalmente realizar una breve introducción genérica a la mitigación de las mismas tanto para vía en placa como para vía convencional.

2.2 Mecanismos de generación

El origen de las vibraciones producidas por el paso de un vehículo ferroviario tiene lugar a partir de la interacción del propio vehículo con la vía. Más concretamente, la generación de estas excitaciones acontece en la zona de contacto de la rueda y el carril. Desde aquí, la energía transmitida por el tren a la vía se manifiesta de diferentes formas. De entre las más importantes están las vibraciones y el ruido. Centrando la atención sobre las primeras, varios son los mecanismos que las generan. Además, dependiendo de este mecanismo de generación las ondas resultantes van a tener unas determinadas características como por ejemplo diferentes valores de frecuencia. A continuación, se explicará cada uno de los diferentes mecanismos de generación.

2.2.1 El movimiento de la carga “cuasi-estática”

Las vibraciones causadas por el paso de la carga “cuasi estática” son aquellas generadas por la carga constante del tren moviéndose a lo largo del sistema flexible vía-suelo. El peso de un supuesto tren parado crea una deformación estática en los puntos sobre los cuales apoyan las ruedas. Cuando este tren se mueve, la deformación excita cada uno de estos puntos. Por ello, las zonas contiguas experimentan desplazamientos a lo largo del tiempo relacionados con este tipo de excitaciones. Estos registros del movimiento vienen explicados completamente por el paso de los diferentes ejes del tren.

Este tipo de vibraciones afecta sobre todo a las zonas cercanas a la vía. Para velocidades de tren convencionales, las ondas creadas por este mecanismo se propagan hasta un entorno cercano (aproximadamente una distancia de un cuarto de longitud de onda desde la vía, un valor aproximado de esta longitud puede ser de 10 m a partir de los carriles). Sin embargo, para vibraciones de baja frecuencia, estas longitudes de onda pueden llegar a ser elevadas. Por esto, las estructuras cercanas a la vía pueden ser afectadas por este mecanismo de generación.



Las excitaciones producidas por el paso de la carga “cuasi-estática” vienen caracterizadas por los siguientes parámetros:

- **La estructuración de ejes y de bogies**

Las frecuencias de estas excitaciones vienen asociadas al paso tanto de los bogies como de los ejes del tren. Esto es debido a que las mayores amplitudes del movimiento registradas en un punto se manifestarán justo en el momento en el que las ruedas pasen sobre él. Así pues, para trenes con velocidades comerciales habituales, las frecuencias asociadas a este tipo de mecanismo de generación son las más pequeñas que aparecen en un determinado espectro.

- **La velocidad del tren**

Junto con el anterior, este parámetro define por completo la frecuencia de las deflexiones. En este sentido, a mayor velocidad del tren mayores frecuencias se inducirán en el terreno.

- **La carga transmitida por eje**

Generalmente, puede ser asumido que las excitaciones provocadas por el mecanismo de generación de la carga “cuasi-estática” son proporcionales al valor de la carga. Es por esto que los trenes de mercancías suponen el mayor problema incluso en ausencia de velocidades de paso elevadas.

Así pues, con los tres parámetros anteriores quedan definidas las características del mecanismo de generación debido a la carga “cuasi-estática”. Otro aspecto de especial importancia es el carácter traslacional del vehículo cuando se considera este tipo de mecanismo de generación. Es decir, en este supuesto, se considera que el contacto entre la rueda y el carril es perfecto. Por lo tanto, el vehículo no se ve sometido a excitaciones verticales, solamente a un movimiento horizontal controlado por la propia velocidad del tren. Esta es la razón por la cual este mecanismo de generación de vibraciones no es tenido en cuenta en los estudios de confort del viajero.

2.2.2 Las fuerzas dinámicas

Las fuerzas dinámicas son generadas en la zona de contacto rueda-carril. Se originan a partir de la combinación del perfil irregular del carril y de las imperfecciones en la rueda. Así, este hecho produce la propagación de un nuevo tipo de vibraciones en el terreno. Éste es, de hecho, el mismo mecanismo de excitación que aquél que origina el ruido de rodadura. No obstante, la única diferencia es que en la generación de vibraciones se ven involucradas también mayores longitudes de onda de las imperfecciones.

Un ejemplo de este caso es el desgaste ondulatorio. Los segundos suponen un defecto aislado en el carril, es por esto que la excitación causada por este mecanismo es transitoria. Otras posibles clasificaciones consisten en separar los defectos del carril de los defectos de la rueda



o identificar por separado los defectos de fabricación con los defectos de servicio tanto de la rueda como del carril.

En cualquier caso, la presencia de irregularidades en las zonas donde contactarán la rueda y el carril da lugar a excitaciones dinámicas que, dependiendo de la magnitud de los desperfectos, pueden producir fuerzas de contacto de una magnitud varias veces superior al valor estático del peso del tren.

Estos niveles de fuerza aceleran el deterioro de los elementos de rodadura y de la vía, llegándose a producir incluso la rotura de las ruedas o carriles.

Como se puede apreciar en la figura 2.1, las frecuencias asociadas a los defectos de vía/ruedas se ocupan de “llenar” la parte del espectro que quedaba vacía.

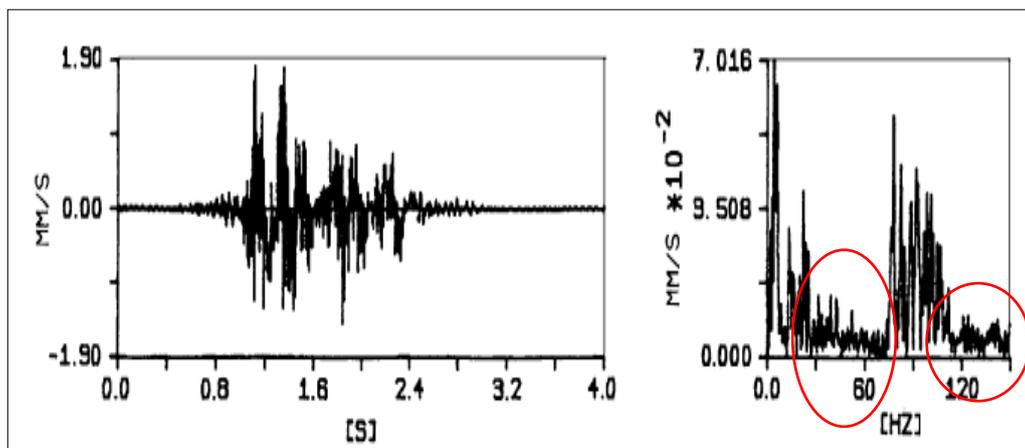


Figura 2.1. Espectro Simulación de frecuencia y de velocidad debidas a la carga cuasi-estática, a la onda de avance y a las irregularidades rueda-carril. Fuente: [2].

La longitud de onda de cualquier defecto de rueda puntual corresponderá a

$$\lambda = 2\pi R_{\text{rueda}}$$

mientras que la longitud de onda de los defectos del carril corresponderá a la distancia entre defectos. No obstante, como hay muchos defectos emplazados a la vez en una misma zona del carril, se tendrán defectos de múltiples longitudes de onda.

Así pues, estos mecanismos de generación suponen la principal causa de la emisión acústica y una de las más importantes de la emisión vibratoria sobre todo a la hora de evaluar el confort del viajero. Por ello, la manera más eficiente de reducir las vibraciones producidas por el tren, será evitando en la medida de lo posible las irregularidades tanto de la vía como del carril planteando un mantenimiento de vía más o menos continuo y un diseño específico de la vía acorde con el tipo de tráfico que va a operar en dicha vía.



La tipología de defectos en la banda de rodadura, como se ha comentado anteriormente, admite diferentes clasificaciones. En este sentido, se va a distinguir entre los lugares en los que se presentan los defectos (rueda o carril) y el carácter de estos (carácter discreto o continuo). Los diferentes puntos a tratar se plasmarán en los apartados siguientes:

1. Irregularidades discretas en rueda.

Se entiende por un defecto discreto de la banda de rodadura de una rueda aquel que puede explicarse de forma aislada considerando una sección reducida de la misma. Su tipología es amplia y sus causas complejas por lo que aquí se tratará solamente aquellos tipos que han sido observados con más frecuencia y que dan lugar o se deben a una repuesta dinámica vertical anómala.

En la tabla 2.1, se muestran los defectos discretos de la rueda, que se describen en el ITM (Instrucción Técnica de Mantenimiento, RENFE), en función de la causa que los genera.

| CAUSA | DEFECTO DISCRETO |
|--------------------|------------------|
| Desgaste | Patinaje |
| Desgaste | Deslizamiento |
| Desgaste | Plano tipo A y B |
| Fatiga térmica | Escoriación |
| Fatiga de contacto | Exfoliación |

Tabla 2.1. Defectos descritos de la rueda. Fuente: [3].

Los planos, patinajes y deslizamientos son posiblemente el tipo de defecto más estudiado ya que provocan los mayores incrementos de fuerza en el contacto rueda-carril y entonces influyen de una forma muy significativa en la generación de vibraciones. Estos tres primeros defectos corresponden a los que aparecen durante el servicio del vehículo y son debidos a faltas de adherencia anormales de forma puntual de la rueda sobre el carril.

2. Irregularidades discretas en carril.

En el presente sub-apartado, mencionamos una serie de defectos que pueden localizarse en una zona discreta del carril. Su presencia, como en el punto anterior, provoca un incremento en la fuerza dinámica de contacto al paso de un vehículo por la irregularidad. Esto supone una excitación transitoria, una nueva fuente de vibraciones a la que quedará expuesta la vía. El desgaste, la fatiga de contacto y las fuerzas de contacto rueda-carril son causa de aparición de los defectos discretos en el carril. En la tabla siguiente se clasifican los defectos discretos del carril, atendiendo a su origen.

| CAUSA | DEFECTO DISCRETO |
|--------------------|-----------------------------|
| Desgaste | Patinaje aislado |
| Desgaste | Hundimiento de junta de vía |
| Fatiga de contacto | Exfoliación |
| Fatiga térmica | Squat |

Tabla 2.2. Defectos discretos del carril. Fuente: [3].



Figura 2.2. Defectos debido al desgaste de la superficie del carril: (a) Hundimiento de junta de vía; (b) Patinaje aislado. Fuente: [3].

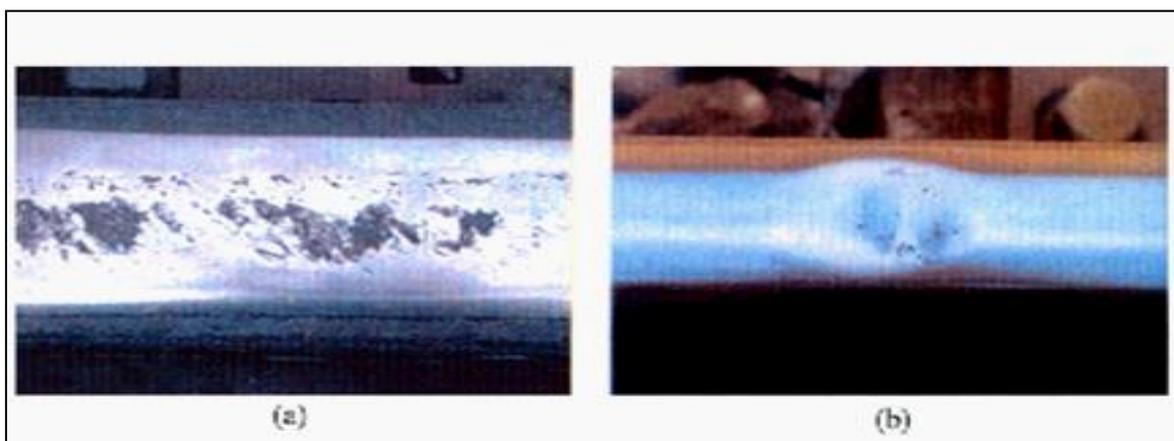


Figura 2.3. Defectos debido a la fatiga de contacto de rodadura: (a) Exfoliaciones; (b) Squats. Fuente: [3].

3. Irregularidades continuas en rueda.

Los defectos extensos en la banda de rodadura de la rueda están desarrollados a lo largo de toda la circunferencia de la rueda. Además de la excentricidad propia de errores en el montaje que inevitablemente estará presente en cualquier eje, pueden detectarse desgastes irregulares de la banda de rodadura de tipo ondulatorio.

Estas irregularidades generan una pérdida de redondez, OOR (*Out Of Roundness*), de la rueda. Los defectos extensos en las ruedas pueden clasificarse en función de la longitud de onda predominante del defecto como se muestra en la tabla 2.3.

| LONGITUD DE ONDA | DEFECTO EXTENSO |
|------------------|-------------------------|
| Larga (>150 mm) | Pérdida de redondez OOR |
| Corta | Corrugación |

Tabla 2.3. Defectos extensos de la rueda. Fuente: [4].

4. Irregularidades continuas en carril.

Se consideran defectos extensos de la banda de rodadura del carril aquellos que ocupan un tramo de vía que comprende una longitud equivalente a varios vanos. Estos defectos están incluidos dentro de las irregularidades de vía que también abarcan los defectos geométricos, tales como las desviaciones de los hilos del carril con respecto a su definición teórica y las variaciones de propiedades dinámicas de la infraestructura de la vía como, por ejemplo, las heterogeneidades del balasto bajo diferentes traviesas.

Como caso particular más representativo de este defecto, vamos a explicar el desgaste ondulatorio que es una de las patologías que afectan a los carriles.

Se trata de un desgaste diferencial que afecta a la cabeza del carril y se caracteriza por ser identificable visualmente y por mantener unas características ondulatorias relativamente constantes.

Este tipo de desgaste es una patología que aparece de un modo u otro (incluso diversas manifestaciones a la vez) en casi todas las vías férreas existentes. Este motivo ha llevado a que el desgaste ondulatorio sea uno de los fenómenos de desgaste más estudiados desde hace más de cien años pero, aún hoy en día parece no tener solución.

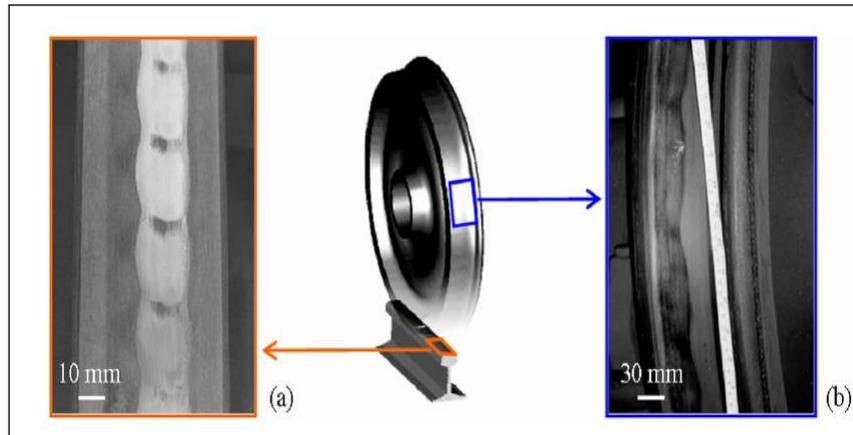


Figura 2.4. Desgaste (a) ondulatorio de una rueda sobre el área de rodadura de un carril (b). Fuente: [4].

El espaciamiento entre dos zonas similares (brillante-brillante o mate-mate) se llama longitud de onda Λ del desgaste ondulatorio y puede variar entre 25 mm y 1500 mm según las causas que la originan. Sobre un periodo, la diferencia de altura entre la zona más elevada, llamada pico, y la zona más baja, llamada valle define la amplitud δ del desgaste ondulatorio como el presentado en la figura 2.5.

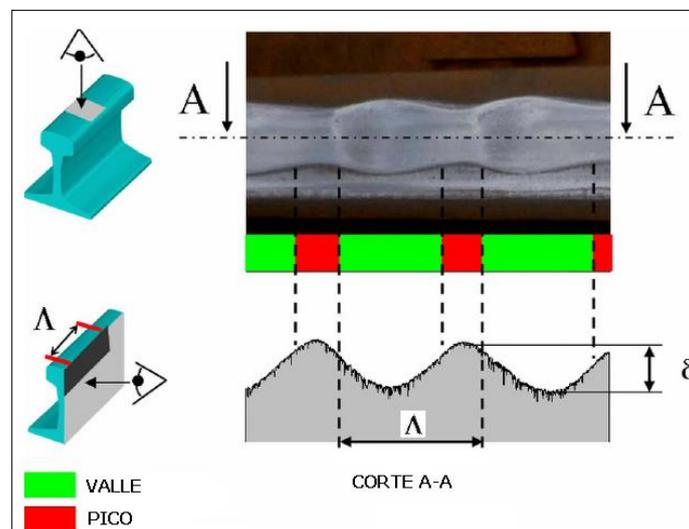


Figura 2.5. Características geométricas del desgaste ondulatorio. Fuente: [4].



Tradicionalmente, se distinguen dos tipos de desgaste ondulatorio diferenciados por su longitud de onda, el desgaste de onda corta y el de onda larga:

- **Desgaste ondulatorio de onda corta**

En este caso, las irregularidades tienen una longitud de onda comprendida entre los 3 y 8 cm y una amplitud de la ondulación cercana a 0,5 mm, aunque en algunos casos ha alcanzado casi el milímetro.

Sobre la superficie de rodadura se aprecia una sucesión de crestas brillantes y valles oscuros. Es un desgaste que suele aparecer en líneas de tráfico de pasajeros.

- **Desgaste ondulatorio de onda larga**

Las longitudes de onda oscilan entre los 8 y los 30 cm en este caso. No se presentan diferencias de aspecto entre crestas y valles pero los desniveles, más o menos acentuados de la superficie de rodadura (respecto al nivel rectilíneo ideal) sí son apreciables al ojo humano (amplitudes de unos 5 mm). Es un desgaste que suele estar asociado a las líneas de tráfico pesado.

Sin embargo, aunque esta clasificación del fenómeno en dos tipos fácilmente distinguibles es atractiva, en un análisis más profundo del problema resulta insuficiente. Su inconveniente radica en que no se puede asociar una única causa (y por tanto una única solución) a cada uno de estos dos tipos de desgaste ondulatorio. Actualmente, se acepta una clasificación del fenómeno en seis tipologías distintas en función de la forma de producirse. Así pues, cada uno de los tipos de desgaste se corresponderá con un determinado tipo de mecanismo de fijación de longitud de onda, y un mecanismo de daño que determinarán la morfología del desgaste.

2.3 Mecanismos de transmisión

Una vez generadas las vibraciones en el contacto rueda-carril, aquellas se transmiten a través de la superestructura de la vía para llegar al terreno. Esta transmisión es muy importante en el fenómeno de generación de las vibraciones puesto que es la que determina las características de la señal de vibración a la salida de la superestructura de vía.

2.3.1 Parámetros influyentes en la transmisión

Tres son los tipos de parámetros que influyen en la transmisión de las vibraciones a través de la superestructura:

1. Los parámetros constitutivos. Son indicativos de las características mecánicas de los componentes del sistema de generación rueda-carril: inercia, masa, rigidez y coeficiente de disipación. De hecho, son estos parámetros los que desempeñan un



papel predominante en la determinación de la amplitud y de la frecuencia de vibración.

2. Los parámetros estructurales. Son los que contribuyen al fenómeno en base a la configuración, tanto en el orden funcional del vagón como, sobre todo, en el conjunto de los elementos de la superestructura ferroviaria.

3. Los parámetros cinemáticos. Son los relativos a la velocidad de paso del tren, que tienen relevancia cuantitativa diferencial en el sentido en que un aumento o una disminución de dicha velocidad puede aportar, con las demás condiciones iguales, importantes variaciones en los valores de la intensidad de la vibración.

Después de esta transmisión, el fenómeno de vibraciones generadas por el ferrocarril, puede tener varios receptores como los edificios circundantes y perjudica así las estructuras de los edificios y a las personas que los ocupan.

2.3.2 La placa de asiento en la transmisión de vibraciones

El presente apartado trata de explicar cómo influyen las características de la placa de asiento en el comportamiento dinámico de la infraestructura ferroviaria. Su aspecto general puede apreciarse en la figura 2.6a. Este componente es uno de los más importantes en el fenómeno de transmisión de las vibraciones. Está compuesto por un material elastomérico que eventualmente puede ser sintético y, en algunas patentes, está reforzado con una fina lámina de acero en su interior (véase figura 2.6b). Se localiza entre el pie del carril y la superficie de las traviesas o, en el caso de vía en placa, de la losa de hormigón. Su función es principalmente la de proteger las traviesas (o la losa de hormigón) de los fuertes impactos dinámicos que sufren. En el caso de no utilizarse la placa, estos impactos podrían causar la rotura frágil del hormigón.

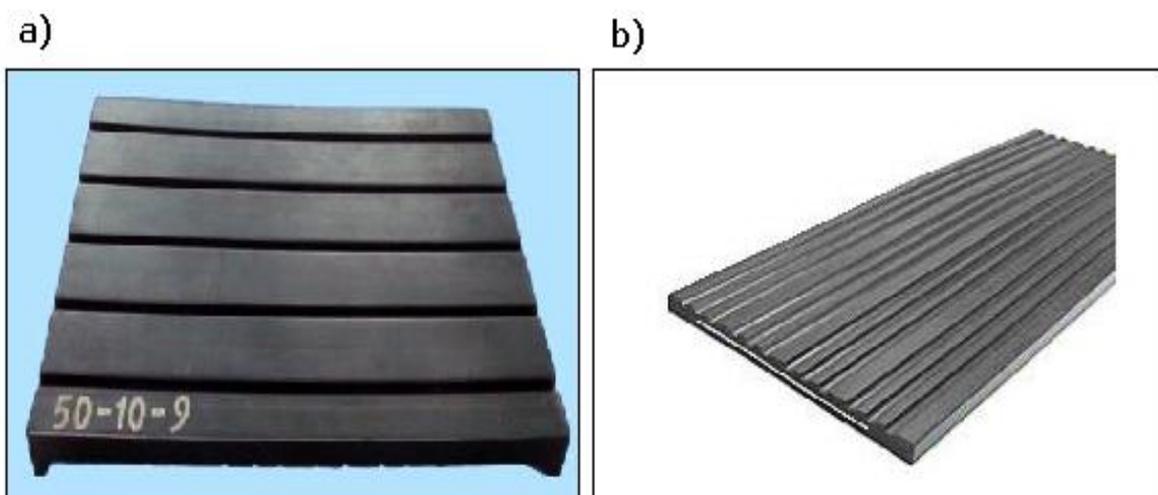


Figura 2.6. Características Diferentes tipos de placa de asiento. (a) placa de asiento convencional. (b) placa de asiento reforzada con lámina de acero. Fuentes: (a) [5] (b) [6].



Además de esta función, la placa de asiento realiza otras muchas como las que se enumeran a continuación:

- La reducción del ruido y de las vibraciones estructurales.
- La reducción del desgaste del carril y de los esfuerzos de fatiga en el contacto entre el carril y la traviesa (o losa de hormigón).
- La reducción del mantenimiento de los distintos elementos superiores de la vía.
- La absorción del irregular contacto entre el carril y la estructura de soporte.
- El incremento de la vida útil de las ruedas y los ejes.
- La distribución regular de la carga que ha de transmitirse desde el pie del carril a la traviesa.

Por otra parte, una de sus características principales es la total resistencia al agua, aceites y hongos. Lo cual le dota de la estabilidad suficiente para su utilización en vía.

Aparte de los beneficios dinámicos que aporta la placa de asiento a la vía, su rigidez vertical juega un papel muy importante en la transmisión de las vibraciones.

La rigidez de la placa de asiento afecta de una manera significativa al amortiguamiento de las vibraciones a lo largo del carril. Asimismo, este fenómeno está muy relacionado con el grado de acoplamiento entre los movimientos del carril y las traviesas. Ambos conceptos van en sentidos opuestos, es decir, cuando las ondas vibratorias debidas a las excitaciones del vehículo se propagan extensamente por el carril, las traviesas (o losa de hormigón) se comportan de una forma aislada del carril. Este hecho está totalmente relacionado con la influencia de la rigidez de las placas de asiento.

Para vías con placas de asiento flexibles, las traviesas o, en su caso, la losa de hormigón, se encuentran aisladas de las ondas generadas por el paso del vehículo, pero en consecuencia, las vibraciones se propagan libremente por el carril. En contra, para placas de asiento rígidas, el efecto es el contrario. La transmisión de vibraciones a través del carril está muy restringida, pero las traviesas o, en su caso la placa de hormigón se mueven conforme lo hace el carril. Este fenómeno se puede apreciar de una forma visual en la figura 2.7.

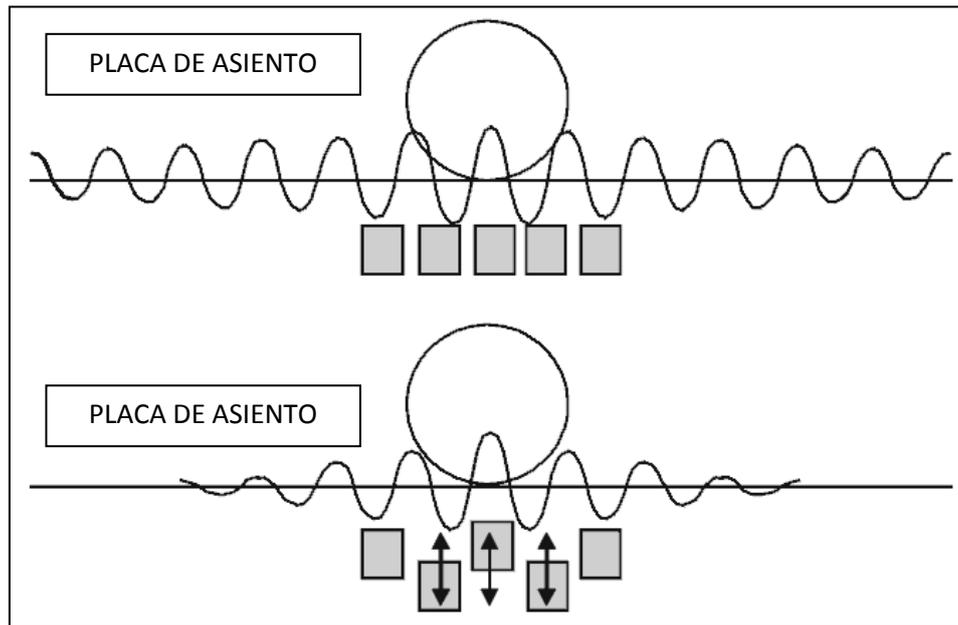


Figura 2.7. Ilustración del efecto de la rigidez de la placa de asiento en relación con el acoplamiento del movimiento del carril y las traviesas y el amortiguamiento de las ondas propagadas por el carril. Fuente: D. Thompson (2009) y aportación propia.

Antes de nada, aclarar que este fenómeno explicado en la figura 2.7 también tiene validez para la vía en placa. La única diferencia es que el apoyo del elastómero se realiza de un modo continuo en lugar de discreto, pero el efecto es el mismo.

De lo anterior se puede extraer otra conclusión muy interesante, por un lado, el empleo de placas de asiento flexibles conlleva excitaciones mayores en el carril. Esto provoca una transmisión de abajo hacia arriba de las vibraciones, el carril excitará en mayor medida a las masas no suspendidas, éstas a las semi-suspendidas, etc. Finalmente, estas excitaciones llegarán a perjudicar el confort del pasajero. De este modo, la elección de placas de asiento flexibles conduce a entender el efecto de las vibraciones más como una internalidad que como una externalidad.

Por otro lado, la elección de placas de asiento rígidas conlleva a excitaciones mayores en el resto del paquete de vía. Esto provoca una transmisión de las vibraciones hacia abajo, las traviesas excitarán en mayor medida al balasto (o placa de hormigón) y éste al resto de la vía. Estas excitaciones llegarán, pues, a perjudicar de una forma más grave a estructuras cercanas a la vía y a terceras personas externas al transporte. Así, se dice que el empleo de placas de asiento rígidas conduce a considerar el efecto de las vibraciones más como una externalidad que como una internalidad.



2.3.3 Atenuación de la señal vibratoria

Las vibraciones del vehículo son transmitidas al terreno a través de la superestructura ferroviaria, en concreto y para vía no convencional, son transmitidas por las traviesas a la placa, a la plataforma, etc. Todos estos pasos por distintas capas y elementos provocan que la amplitud de vibración vaya atenuándose a medida que se alejan del punto de generación que es, como se ha dicho, el contacto rueda-carril. En general, salvo en el caso de fenómeno de resonancia, las vibraciones sufren una atenuación debido a los amortiguadores colocados en la vía, los elastómeros. Posteriormente también se reducirán debido al terreno situado por debajo de la vía antes de llegar a las edificaciones próximas.

No obstante, debe tenerse en cuenta que esta disminución de la amplitud no se produce para todas las frecuencias por igual, sino que algunas de ellas pueden atenuarse más en una menor distancia.

A partir de las medidas tomadas en diferentes puntos a determinadas distancias de la vía, Auersch [7] determinó que las frecuencias muy bajas (correspondientes a la carga cuasi-estática, ~0Hz) se atenuaban rápidamente al paso por el suelo. De este modo, las cargas correspondientes a los pasos de los ejes del vehículo resultan importantes, por su magnitud, en la superestructura y zonas cercanas a la vía.

Del mismo modo, cuando hablamos de amplitudes de vibración, cabe destacar un parámetro característico de la vía que afecta directamente a la resonancia de la masa no suspendida y, en consecuencia, al movimiento vibratorio de la misma. Las rigideces de la vía afectan a que se tenga mayor o menor libertad de movimiento y determinan una frecuencia propia para el conjunto superestructura-eje montada, frecuencia que, de activarse, puede ocasionar la amplificación dinámica antes mencionada.

2.4 Mecanismos de propagación

Como ya se comentó en el apartado de introducción de este capítulo, las vibraciones inducidas por los trenes son transmitidas a través del terreno, las cuales pueden convertirse en un problema para el confort y seguridad de los ciudadanos y edificios cercanos. A continuación se va a tratar de estudiar el fenómeno de propagación a través del terreno, dependiendo de la naturaleza del mismo.

2.4.1 Propagación en un medio elástico homogéneo

En el caso ideal de que el terreno este compuesto por materiales infinitamente elásticos, las vibraciones pueden propagarse fundamentalmente mediante dos mecanismos, mediante dilatación o mediante movimientos de corte. Existen, por tanto, para cada una de estos mecanismos de propagación, dos velocidades fundamentales de propagación, las cuales están

directamente relacionadas con las propiedades del material del que está compuesto el terreno. Estas velocidades son:

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

$$c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Donde λ y μ son las constantes de Lamé:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} = G$$

E es el módulo de Young, ν es el coeficiente de Poisson y ρ es la densidad del material.

Estas dos velocidades corresponden a las ondas de compresión o dilatación, también conocidas como ondas P y a las ondas de corte u ondas S. En términos científicos también se les conoce como Ondas Primarias y Ondas Secundarias. Las ondas P son más rápidas, de tal manera que $c_1 > c_2$.

El comportamiento de un terreno de superficie libre normalmente es idealizado como un semi-espacio de material homogéneo elástico. En el semi-espacio, pueden propagarse además de las ondas S y P, sobre la superficie las llamadas ondas de Rayleigh, las cuales combinan movimientos de dilatación y de corte, a causa de la condición de libertad en la superficie del terreno. La onda de Rayleigh destaca por tener una menor velocidad de propagación, la cual transmite la mayor cantidad de energía, sobre todo a largas distancias a través de la superficie del terreno. Debe reseñarse que la propagación de la energía depende en gran medida de las características de los materiales que componen el terreno.

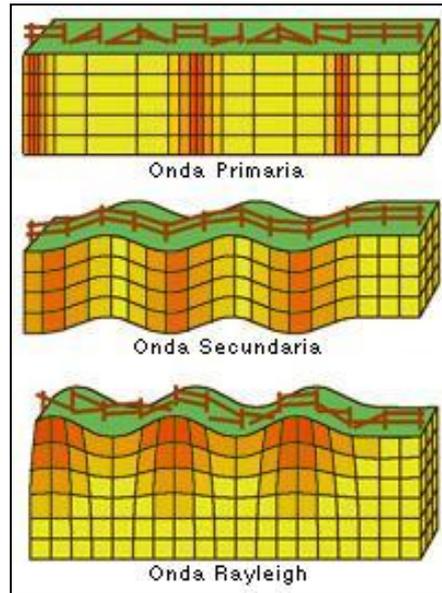


Figura 2.8. Diferencias entre las ondas primarias, ondas secundarias y ondas de Rayleigh. Fuente: [8].

Si hacemos un análisis de los desplazamientos experimentados por las partículas para un instante de tiempo determinado, como se muestra en la Figura 2.9, se observa como los mayores desplazamientos tienen lugar en la superficie, disminuyendo este a medida que nos vamos alejando de la superficie.

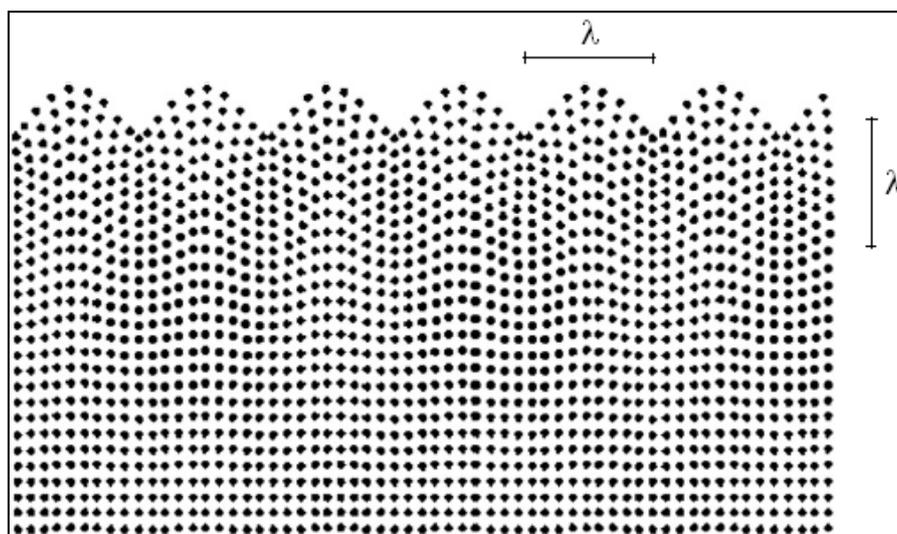


Figura 2.9. Desplazamiento instantáneo de las partículas debido a la propagación de las Ondas de Rayleigh. Fuente: [1].



2.4.2 Propagación en un medio estratificado

En la realidad, el suelo es un semi-espacio homogéneo. Normalmente, los suelos suelen presentar una composición de varias capas, en las que las capas superiores están compuestas por materiales más blandos de potencias pequeñas (desde 0,5 m hasta 3 m) que los que se encuentran en profundidad. El hecho de que el suelo se encuentre estratificado induce un efecto importante en la propagación superficial de las vibraciones dentro del rango de estudio.

En un terreno estratificado, las vibraciones se propagan paralelamente a la superficie a través de unos tipos o modos de ondas. Este tipo de ondas de Rayleigh son conocidas a menudo como ondas P-SV, ya que combinan movimientos de tipo compresivo (P) y de corte vertical (SV). Otro tipo de ondas superficiales que se dan en la superficie de este tipo de terrenos son las ondas de Love, las cuales únicamente producen movimientos de corte horizontal. Es por ello que se las suele conocer como ondas SH.

Debido a que el fenómeno vibratorio de la vía está dominado por movimientos verticales, este tipo de ondas no influyen en el mismo.

Si analizamos el movimiento de las partículas en un instante de tiempo, se puede observar como el movimiento se centra en la parte superior, en el estrato más blando; mientras que en el estrato inferior las partículas se quedan prácticamente fijas. Dentro del estrato superior, a su vez el desplazamiento se centra en la zona de menor profundidad en la capa de terreno.

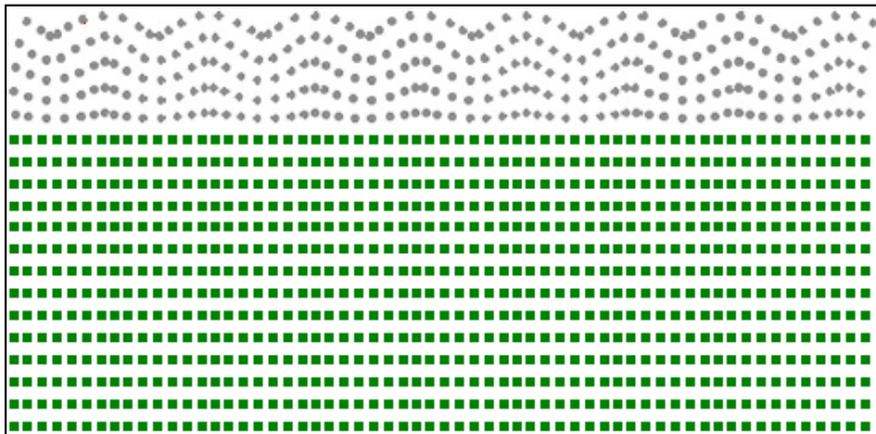


Figura 2.10. Desplazamiento instantáneo de las partículas de un terreno estratificado para el movimiento correspondiente a la propagación de las ondas del primer modo de vibración; círculos grises, partículas del primer estrato; cuadrados verdes, partículas del estrato inferior. Fuente: [1].

De este análisis se puede concluir que, en un terreno estratificado, para el primer modo de vibración y siendo el estrato superior más blando que el estrato inferior, las vibraciones se propagarán por el estrato superior menos rígido.



2.4.3 El diagrama de dispersión

La longitud de onda circular para cada modo de vibración viene definida por la expresión:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Si representamos esta longitud de onda circular en función de la frecuencia de excitación a la que estemos sometiendo el terreno, obtenemos lo que se denomina un diagrama de dispersión. Cada línea del diagrama de dispersión representa un modo de onda asociadas a los modos de vibración de un terreno estratificado.

Del diagrama de dispersión se puede extraer una cantidad de información acerca del mecanismo de propagación de las ondas a través del suelo. Además se puede deducir que los diferentes modos de vibración no se dan para todas las frecuencias. Para un rango de bajas frecuencias, sólo se desarrolla el primer modo de vibración y éste tiene una velocidad de propagación cercana a la velocidad de las ondas S en el estrato inferior. Por tanto, mediante el diagrama de dispersión, para una determinada frecuencia de excitación, es posible conocer:

- La longitud de onda de cada una de las ondas correspondientes a cada modo de vibración.
- Los modos de vibración que se activarán como consecuencia de dicha excitación.
- La velocidad de fase de las ondas que resultan de dicha excitación.
- La velocidad de grupo de las ondas que resultan de dicha excitación.

2.4.4 Atenuación de la señal vibratoria

Como se ha explicado anteriormente, cuando se genera en la vía una fuente de excitación dinámica, esta se convierte en una fuente de vibración que genera varios tipos de onda, unas superficiales (Rayleigh) y otras volumétricas (ondas superficiales y ondas transversales). En el caso de las vibraciones ferroviarias, la mayor parte de la energía generada por la vibración se propaga en forma de ondas superficiales sobre el estrato superior, el cual suele ser el más blando. Todas ellas tienen diferentes velocidades de propagación en función del tipo de onda que además varían en función del medio elástico que atraviesan.

En la práctica ocurre que el suelo no es homogéneo, existen huecos que pueden estar o no ocupados por agua, rocas, así como condiciones de contorno tales como las paredes de túneles, las cimentaciones de los edificios, etc. A causa de todos estos elementos, durante el fenómeno de la propagación de las ondas se produce una cierta pérdida de energía por unidad de volumen como consecuencia del aumento del tamaño del frente de ondas, aunque dentro de cada frente de ondas como conjunto esta permanezca constante. Este efecto se resume en el parámetro γ .

Esta pérdida de energía dependerá de la geometría y situación de la fuente de emisión de ondas (en este caso, la vía) así como la distancia de propagación. Si se considera la vía férrea como una fuente lineal, la energía de las ondas de vibración decaerá según la inversa de la distancia a las vías.

Además de las pérdidas debidas a la geometría, se deben considerar otras, debido al carácter viscoelástico de los materiales atravesados por la onda de propagación. Esta disipación de energía debida a la fricción entre las distintas partículas del terreno se ajusta a una expresión exponencial dependiente del tipo de terreno y de las distancias a la fuente receptora. De esta manera la expresión que rige este fenómeno es:

$$\frac{a_b}{a_a} = \left(\frac{r_a}{r_b}\right)^\gamma e^{\rho\pi f(r_a-r_b)}$$

Donde:

- a_a y a_b son los valores eficaces de aceleración en los puntos a y b , en m/s^2 .
- r_a y r_b son las distancias a la vía de los puntos a y b , en metros.
- Γ es el coeficiente de atenuación geométrica.
- P es la constante de cada material que relaciona el factor de pérdida con la velocidad de propagación de la onda.
- f es la frecuencia de la onda, en Hz.

De esta manera, podemos concluir con que cuanto mayor sea la distancia entre la fuente de vibración y el elemento receptor, mayor grado de atenuación de la onda se producirá.

2.5 Frecuencias a los que se producen los diferentes fenómenos

En este apartado, una vez estudiados los mecanismos de generación, transmisión y propagación de vibraciones, se va a recapitalizar cuales son las frecuencias de vibración asociada a los distintos fenómenos y patologías que se pueden producir en la propia vía.

En la Figura 2.11, se observa de forma muy gráfica cuales son los rangos de frecuencias para los distintos mecanismos generados.

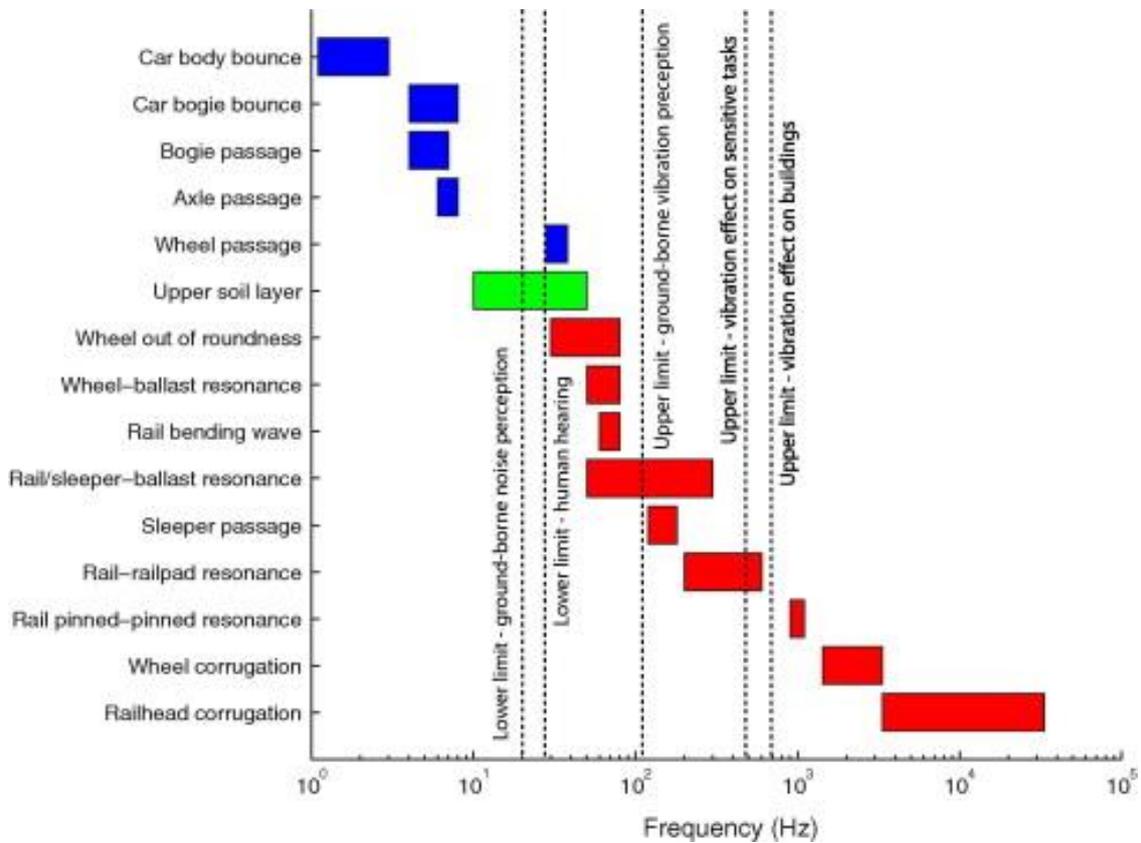


Figura 2.11. Rangos de frecuencias de excitación. Fuente: [9].

Como se observa las frecuencias más bajas se deben al balanceo del vehículo y el paso de ejes y bogies, es decir, son las debidas al paso del vehículo. Las frecuencias intermedias, que serán las que más efecto va a tener en las personas e infraestructuras cercanas, se deben a fenómenos de resonancia entre rueda y carril, al paso de las traviesas y defectos de rueda como planos y ruedas ovales. Finalmente las frecuencias más altas se deben a la corrugación, tanto de la rueda como de la cabeza del carril.





Capítulo 3. Hormigones NFU y Hormigones **Reforzados con Fibras.**

3.1 Introducción

Es cierto que en principio los neumáticos usados no generan ningún peligro inmediato, pero su eliminación de manera inapropiada o su producción en grandes cantidades, puede contaminar gravemente el medioambiente u ocasionar problemas a la hora de eliminarlos. No obstante, los neumáticos han sido diseñados para resistir condiciones mecánicas y meteorológicas adversas lo que les hace prácticamente indestructibles con el paso del tiempo. Además, el almacenamiento en el vertedero no permite recuperar ni energía ni materia.

La producción de nuevos hormigones con residuos precedente de neumático fuera de uso (de ahora en adelante los llamaremos hormigones NFU) presenta un avance significativo, no solo de cara a una mejor gestión de residuos, sino también para la producción de hormigones con prestaciones optimizadas. Mediante un estudio detallado del esqueleto granular, de las características del polvo de NFU empleado, del diseño de la micro estructura y de la zona de transición entre la pasta y el polvo de NFU, sería factible lograr una nueva gama de hormigones con una mayor capacidad como aislante térmico y acústico, una mayor ductilidad y una mayor resistencia al fuego, a los ciclos de hielo-deshielo y a la fatiga.

En este capítulo se desarrollara en primer lugar un estudio acerca de las propiedades tanto del hormigón como de los neumáticos fuera de uso, necesarios para el desarrollo de nuestro TFG. A continuación se recopilara toda la información disponible acerca del uso de hormigones con caucho proveniente de neumáticos fuera de uso. Posteriormente también se hará una exposición de las propiedades de los hormigones reforzados con fibras así como sus posibles usos como elemento mitigador de vibraciones.

3.2 Neumáticos fuera de uso

Los neumáticos son estructuras toroidales muy complejas elaboradas con más de 200 componentes, si bien están compuestos básicamente por cauchos naturales y sintéticos, cargas reforzantes (negros de carbono y sílices), antioxidantes, materiales metálicos, textiles y otros ingredientes necesarios para el proceso de vulcanización del caucho. Las proporciones de estos componentes pueden diferir en función del fabricante y del tipo de neumático, aunque en general se aproximan a las que figuran en la tabla siguiente.

| Tipo de material | Composición en peso por cada neumático utilizado en vehículos turismos (%) | Composición en peso por cada neumático utilizado en camiones y autobuses (%) |
|--------------------------|--|--|
| Caucho/Elastómero | 41-48 | 41-45 |
| Carbón negro | 22-28 | 20-28 |
| Metal/Acero | 13-16 | 20-27 |
| Textil | 4-6 | 0-10 |
| Aditivos | 10-12 | 7-10 |

Tabla 3.1. Composición en peso de los materiales utilizados para la fabricación de neumáticos. Fuente: [10]

En la tabla se distingue entre los neumáticos de turismo y camión por su distinto contenido de caucho, pero además se diferencian por las proporciones relativas de caucho natural y sintético, que afecta a las propiedades finales del producto. En los neumáticos de turismo el contenido de caucho natural es del orden del 65% del caucho total, mientras que en los de camión es del 72% aproximadamente.

La composición de los neumáticos puede variar según el tipo de vehículo para los que se utilizan como se mostraba en la tabla 3.1. Los valores presentes en dicha tabla son para los neumáticos empleados en la Unión Europea, los neumáticos americanos presentan una composición ligeramente diferente, no obstante se toma la composición de la UE como referencia válida.

El polvo de caucho reciclado se obtiene triturando los neumáticos enteros hasta el tamaño deseado y separando los metales y tejidos que pueda incorporar. La forma de trituración, la granulometría de las partículas y el contenido remanente de contaminantes metálico y textil afectan a las propiedades del polvo de caucho obtenido. La utilización en mezclas bituminosas precisa que el caucho reciclado esté en forma de partículas finas de tamaños inferiores a 2 mm, o 0,5 mm, según las aplicaciones.

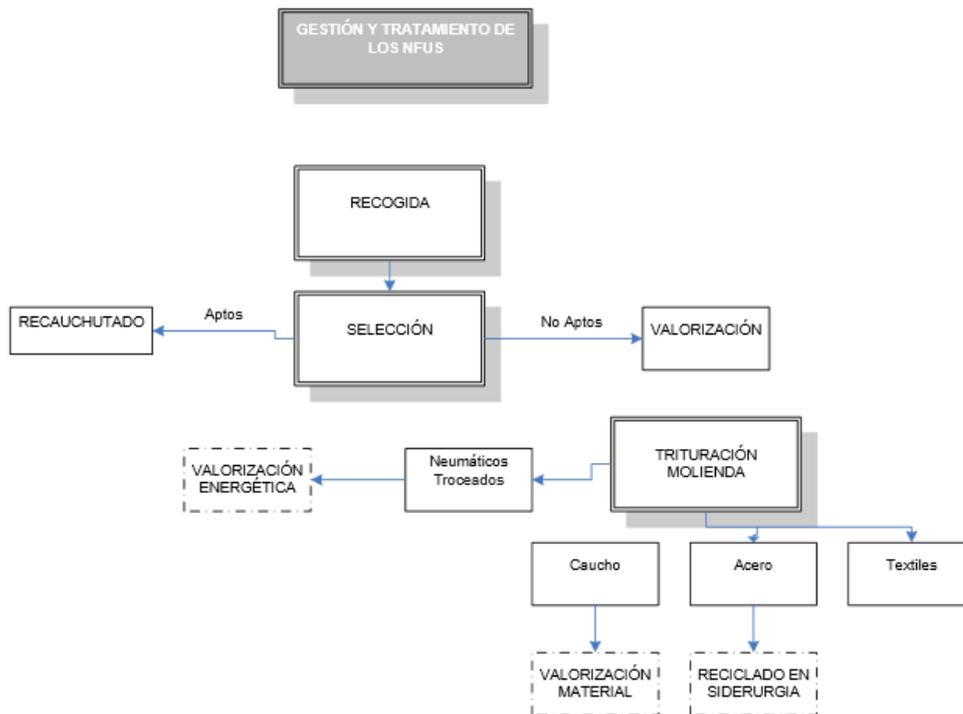


Figura 3.1. Esquema de gestión de los NFU. Fuente: [11]

3.2.1 Composición, forma y tamaño del polvo de caucho

En relación a la forma y al tamaño del caucho, éstas dependen del proceso de trituración del mismo, y puede realizarse de las siguientes formas:

- **Proceso de trituración a temperatura ambiente.** Se trata de hacer pasar los componentes triturados por molinos clásicos. Todo el proceso se realiza a temperatura ambiente, aunque la temperatura del caucho pueda elevarse hasta los 130°C por la energía transmitida en el proceso.

El tamaño final obtenido depende del tipo de molino y la secuencia de trituración, siendo posible alcanzar tamaños del orden de 200 micras. Cabe señalar que se trata del método más económico y sencillo.

- **Proceso de trituración a temperatura ambiente en mojado.** En este caso, el caucho se enfría durante el proceso de triturado con un sistema de *spray*. Posteriormente, éste se seca, obteniéndose el caucho como producto final.
- **Proceso de trituración a alta temperatura.** En este caso, se realiza el proceso a una temperatura de 130°C y se acompaña de una desvulcanización. Con este método, es posible obtener partículas de entre 1 y 6 mm de tamaño y, adicionalmente, si se le añade agua para reducir la temperatura del proceso, es posible obtener tamaños menores a 150 micras.



- **Proceso de trituración por criogenización.** En este proceso se pone en contacto el neumático troceado con nitrógeno líquido, a una temperatura entre -30°C y -80°C , con lo que se consigue mayor rigidez. A estas temperaturas, los trozos de neumático se pueden moler con molinos clásicos de impacto y bolas.

La principal característica del caucho obtenido de esta forma es la mayor cantidad de caras de fractura existentes, lo cual provoca un incremento de la superficie específica, con la consecuencia de requerir mayor cantidad de ligante y presentar ventajas en relación a la adherencia con el aglutinante.

- **Proceso de trituración por chorro de agua a presión.** Se trata de un método alternativo o pretratamiento para la obtención de partículas de NFU muy finas con la ayuda de agua presurizada. Sin embargo, el procedimiento de aplicación de este pretratamiento es todavía muy novedoso, con lo que su uso a nivel industrializado no es común, ni ampliamente conocido, por lo que su extensión en uso se encuentra actualmente limitada.

Una vez descritos los distintos procesos existentes de trituración y molienda del caucho, cabe indicar que durante estos procesos se realiza la separación del acero y de las fibras textiles.

Así, por un lado, para la separación del acero se hace pasar los trozos de caucho cerca de separadores magnéticos situados encima de las cintas que transportan el material.

Por otro lado, las fibras textiles se separan empleando dispositivos especiales, como es el caso de una cinta transportadora dotada de movimiento de vibración perpendicular al deslizamiento que, combinado con una inclinación adecuada, permite que el material se separe. También se pueden emplear bandejas vibratorias combinadas con dispositivos fluido-dinámicos basados en corrientes de aire o ciclones.

Por lo tanto, tras el proceso de trituración del caucho se obtienen trozos de diferentes medidas, que son utilizados para la fabricación de diferentes materiales. Los tamaños que se comercializan normalmente han sido consultados en páginas de diversos proveedores, y las granulometrías pueden ser diferentes según las demande el cliente del producto final.

Otro de los componentes que se pueden reutilizar de los NFU es el negro de humo. En relación a composición del negro de humo, es de destacar que los contenidos en cenizas son en todos los casos superiores al 7%, con contenidos de C comprendidos entre 82 y 86%, variando la proporción de volátiles en función del tipo de neumático tratado. Estos resultados se corresponden con los valores analíticos de algunos tipos de negro de humo pirolítico obtenido en varias instalaciones españolas de tratamiento de NFUs.

En la tabla siguiente se recogen las composiciones químicas y poderes caloríficos de negro de humo pirolítico procedente de las plantas españolas de RMD y UNILEÓN (En la actualidad, ambas instalaciones están en fuera de uso industrial). Se observa que los contenidos en cenizas están alrededor del 14%, con 3% de S y un 3.6% de materiales volátiles. Los contenidos en C se encuentran entre 81 y 82%.

| ANÁLISIS ELEMENTAL | NEGRO DE HUMO PIROLÍTICO INDUSTRIAL | | | |
|--|-------------------------------------|----------|----------|-------|
| | RMD | Unileon1 | Unileon2 | Media |
| Procedencia → | | | | |
| Materias volátiles | 4.13 | 2.93 | 3.59 | 3.55 |
| Cenizas (815°C) | 13.42 | 14.42 | 13.78 | 13.87 |
| Carbono fijo (calculado) | 82.45 | - | - | - |
| Carbono | 82.22 | 81.22 | 82.08 | 81.84 |
| Hidrogeno | 0.63 | 0.6 | 0.52 | 0.58 |
| Nitrógeno | 0.29 | 0.26 | 0.26 | 0.27 |
| Azufre | 3.38 | 3.25 | 3.02 | 3.22 |
| Cloro | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.15 |
| Fluor (ppm) | 75 | - | - | 75.00 |
| Fósforo | - | - | - | - |
| Oxígeno (% calculado) | 0 | 0.05 | 0.04 | 0.03 |
| Poder calorífico superior, PCSv (kJ/kg.) | 28800 | 28670 | 28860 | 28777 |
| Poder calorífico inferior, PCIv (kJ/kg.) | 28666 | 28580 | 28720 | 28655 |
| Poder calorífico inferior, PCIp (kJ/kg.) | 28662 | 28580 | 28720 | 28654 |

Tabla 3.2. Composición química de negro de humo pirolítico procedente de diversas instalaciones españolas de tratamiento de NFU. Fuente: [11]



3.3 Hormigones con residuos de NFU

La incorporación de materiales procedentes de los neumáticos fuera de uso (NFU) para la fabricación de hormigones con nuevas propiedades tiene su planteamiento básico en la sustitución de los áridos por estos materiales reciclados.

Como consecuencia de esta sustitución, se pueden obtener hormigones más sostenibles, al evitar por una parte el consumo de recursos no renovables y, por otra, por la utilización de materiales reciclados. Además, debido a la diferencia existente entre las densidades de ambos materiales se puede obtener hormigones más ligeros.

La existencia de un gran número de variables que pueden dar lugar a distintas líneas de trabajo en el campo de los hormigones con materiales procedentes de NFU, hacen que generalmente exista un gran abanico de posibles combinaciones a la hora de generar nuevas dosificaciones y productos.

En los últimos años en tanto en el contexto internacional como nacional, se ha producido un creciente interés por el desarrollo de proyectos que estudian el comportamiento de las mezclas de hormigón con materiales procedentes de NFU, tanto por parte de entidades públicas la investigación como procedentes de la empresa privada.

La mayoría de los estudios investigan nuevas formulaciones que incluyen el granulado de NFU en la composición del hormigón fundamentalmente las granulometrías inferiores, donde la característica común a destacar es la pérdida de resistencia a compresión y la elaboración de hormigones más ligeros. La pérdida de la resistencia es debida a una menor resistencia de los caucho respecto del material sustituido y a la falta de adhesividad entre el caucho-hormigón.

Las mezclas con las granulometrías más gruesas son las menos estudiadas por el momento, ya que su sustitución implica la pérdida del esqueleto mineral además de un mayor porcentaje de material sustituido. Dado que la función del mismo es el reparto de las cargas de forma solidaria en la mezcla a través del conjunto formado por los áridos gruesos y el contacto entre ellos, esta pérdida de resistencia resulta lógica.

Las diferencias entre los resultados obtenidos en los diferentes estudios son debidas a las distintas fórmulas de trabajo, que afectan a todo tipo de variables: material sustituido, porcentajes, adicción de aditivos, programa de trabajo, objetivo final de uso del producto, etc.

3.3.1 Comportamiento estructural y vibratorio del hormigón con caucho

En este sub apartado se va a realizar una revisión de la bibliografía existente referente a la utilización del hormigón con residuos de NFU, especialmente centrada en las propiedades mecánicas y en la capacidad reductora de vibraciones.

- **Resistencia a compresión**

En diferentes estudios científicos realizados, Guneyisi et al. [12], Ghaly y Cahill [13] y Valadares [14] mencionan que una sustitución del caucho con pequeñas dimensiones reduce la pérdida de resistencia a compresión. Freitas et al. [15] y Ganjian et al. [16], también demostraron una disminución en la resistencia a compresión. Sin embargo, estos autores demostraron un suave incremento en la resistencia a compresión cuando se sustituye un 5% de los áridos gruesos por caucho astillado, probablemente debido a una mejor graduación de la mezcla.

- **Resistencia a tracción.**

Guneyisi et al. [12] analizó la resistencia a tracción de hormigones con humo negro y caucho reciclado, observándose una disminución de la resistencia a tracción. Los resultados también demostraron que la presencia del humo negro es beneficiosa ya que aumenta el efecto filler, reduciendo esta la disminución de la resistencia a tracción. No obstante, la presencia de caucho procedente de NFU es menos influyente en la reducción de la resistencia a tracción que a compresión. Valadares [14] obtuvo un aumento de resistencia con la presencia de partículas de caucho de mayores dimensiones, lo que concuerda con las conclusiones anteriores. La resistencia a tracción del hormigón con caucho reciclado está muy influenciada por las características de dicho caucho. Algunos producen una pérdida de resistencia, mientras que otros la incrementan.

- **Módulo de elasticidad**

Teniendo en cuenta que el hormigón con NFU presenta una disminución de la resistencia a compresión, y existe una relación directa entre la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad se espera una disminución de este. Sin embargo, Skripkiunass et al [17] comparó hormigones con resistencias a compresión similares obteniendo distintos módulos de elasticidad (29.6 y 33.2 Gpa, para un 3.3% de caucho). La explicación de este hecho es el bajo módulo de elasticidad que presenta el neumático reciclado [18]. Otros autores [19] obtienen reducciones del módulo de elasticidad en un 40% cuando se tiene un mismo porcentaje de reducción de la resistencia. Khaloo et al. [20] confirmaron que la inclusión de partículas de caucho llevaba a obtener hormigones de alta ductilidad.

- **Vibraciones**

El nuevo material pretende mitigar vibraciones mediante dos mecanismos distintos. Uno de ellos vendrá dado por la adición de estos residuos de caucho procedentes del NFU.

El coeficiente de amortiguación es un parámetro comúnmente usado para medir la capacidad de un material para disminuir la amplitud de las vibraciones en un cuerpo. Cing-Yao Lin et al. [21] estudiaron en coeficiente de amortiguamiento para un hormigón con polvo de caucho procedente de NFU (0.42mm). Los resultados revelaron que, con una sustitución del árido por caucho en un 2.5%, el coeficiente de amortiguación aumenta en un 94%. También notaron un aumento del coeficiente de amortiguamiento en un 56% con una sustitución del 2.5% de polvo de caucho que pase por el tamiz #10. La siguiente figura muestra las diferencias en el coeficiente de amortiguación en función de la cantidad de árido sustituido para un hormigón de 8 semanas.

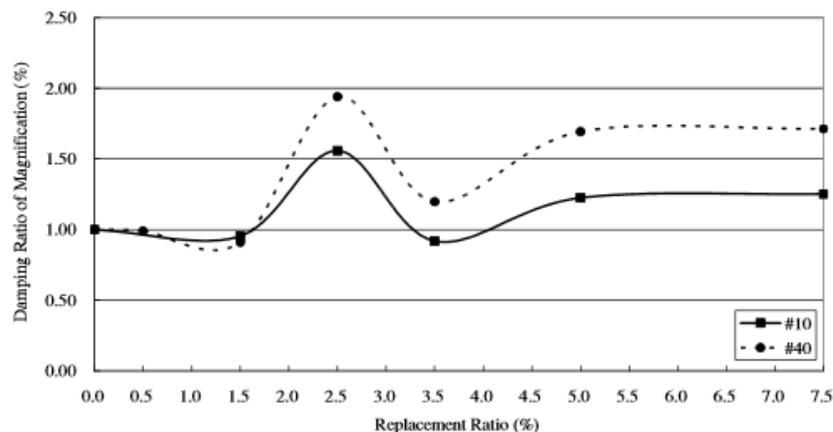


Figura 3.2. Coeficiente de amortiguamiento para distintos porcentajes de NFU para un hormigón de 8 semanas.

Fuente: [21]

Se observaron diferencias en función del tiempo en el coeficiente de amortiguación para los especímenes. Para estudiar estas variaciones se ensayaron las muestras para el hormigón de 8 y 24 semanas, revelando diferencias significativas como se muestra en la figura siguiente.

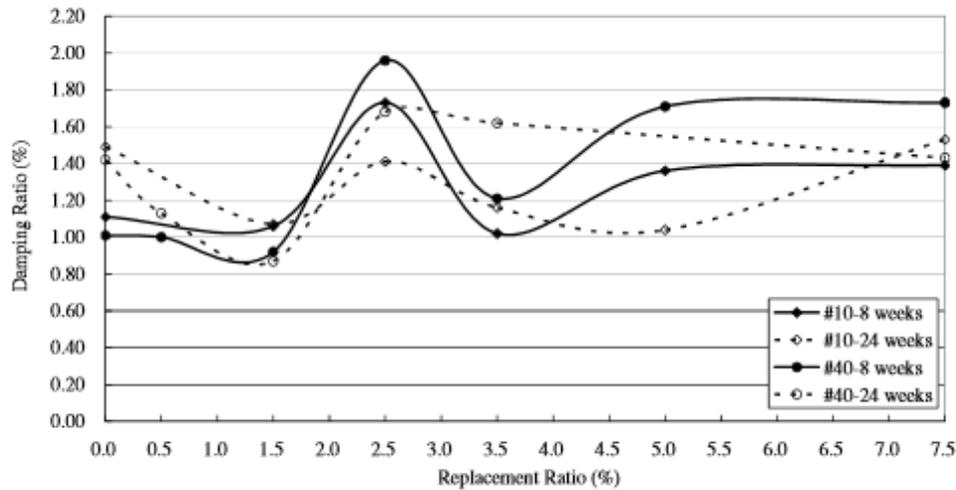


Figura 3.3. Coeficiente de amortiguamiento para distintos porcentajes de NFU para hormigones de 8 y 24 semanas.
Fuente: [21]

Según, Khalid y Matthew [22], quienes estudiaron las propiedades mecánicas y dinámicas de hormigones autocompactables modificados con polvo de caucho, el coeficiente de amortiguamiento de un hormigón de dichas características aumenta proporcionalmente al porcentaje de árido convencional sustituido por residuo procedente de NFU. La siguiente tabla muestra los distintos

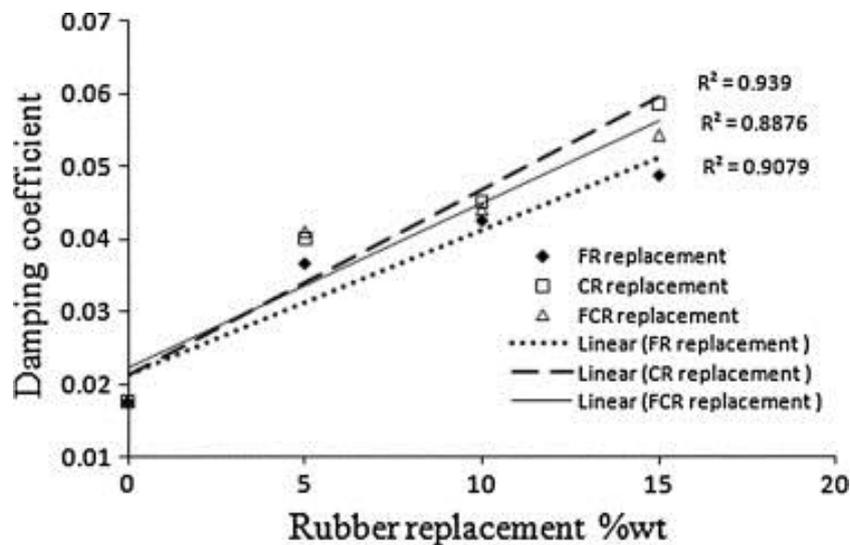


Figura 3.4. Evolución del coeficiente de amortiguamiento en función del porcentaje de sustitución de áridos. Fuente: [22]



Goulias y Ali [23], reportaron una gran disminución del coeficiente de amortiguamiento del hormigón con NFU cuando aumentaban la cantidad de polvo de caucho.

Topcu [24] y Fauthi y Clarck [25] recomendaron el uso de hormigón con polvo de caucho en aplicaciones donde se requería una gran capacidad de atenuación, como estaciones de ferrocarril o cimentaciones de maquinaria. Topcu [24] y Ali [26] también observaron una resistencia del hormigón frente a impactos con el aumento de las mezclas.

Como se observa de los resultados obtenidos anteriormente por los distintos autores, el uso de residuos procedentes de NFU implica una reducción de todas las características mecánicas del hormigón. No obstante, estas mezclas presentan un gran potencial para aplicaciones no estructurales, especialmente para atenuación de vibraciones. A lo largo del desarrollo de las siguientes fases del proyecto, lo que buscaremos es mantener un buen nivel de rigidez que permita una buena colocación en la estructura de vía, y que además permita reducir drásticamente las vibraciones en un determinado rango de frecuencias y una absorción de vibraciones significativa en el resto del espectro de frecuencias.

El uso del hormigón con residuos procedentes de neumáticos reciclados es un campo de investigación creciente, no obstante, aún son escasas las aplicaciones prácticas en las que se puede usar de forma masiva.

La solución comúnmente aceptada es su uso como base aislante para estructuras. Al presentar el hormigón con NFU una rotura dúctil, una gran capacidad de absorción de energía plástica y ser capaz de resistir mayores deformaciones, lo hace favorable para absorber vibraciones que puedan afectar a edificios a través de sus cimentaciones. Especialmente útiles en edificaciones situadas en zonas sísmicas o donde soporten vibraciones debido a grandes cargas de tráfico pesado.

3.4 Hormigones reforzados con fibras

Los hormigones reforzados con fibras se definen como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa [27].

Las fibras son elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la masa del hormigón a fin de conferirle ciertas propiedades específicas [27].

Como fines estructurales proporcionan una mayor energía de rotura pudiendo implicar la sustitución parcial o total de armadura en algunas aplicaciones; en el caso en que las fibras no tengan función estructural suponen una mejora ante determinadas propiedades como por ejemplo el control de la fisuración por retracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto y otros.



Las fibras son empleadas en aplicaciones estructurales en busca de beneficios adicionales en cuanto a reducción de mano de obra, incremento de la durabilidad, y reducción o eliminación del refuerzo tradicional [28]. El hormigón soporta esfuerzos a tracción que son transmitidos por adherencia a las fibras una vez se ha producido micro-fisura, controlan la fisuración y reducen la intensidad de la misma a la vez que mejoran la tenacidad.

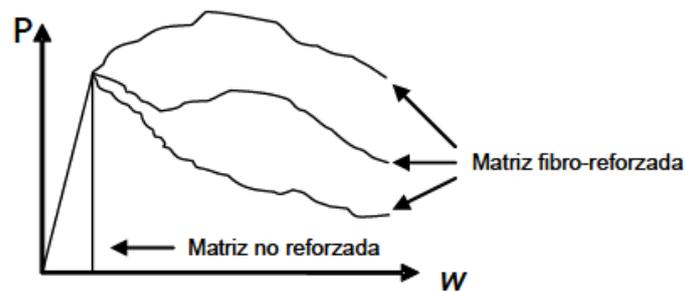


Figura 3.5. Curvas típicas carga-abertura de fisura, para matrices con y sin fibras. Fuente [29]

Esencialmente, la naturaleza y el tipo de fibras determinan la efectividad de la acción reforzante y la eficacia de la transmisión. En la actualidad se utilizan diversos tipos de fibras.

3.4.1 Hormigón Reforzado con Fibras de Vidrio (GFRC)

El GFRC se ideó por vez primera en Rusia, en la década de 1940, en un intento por reducir el grosor de las piezas de hormigón y hacerlas aptas para su uso en cerramientos de fachada. Para ello se sustituyó el refuerzo de acero por hebras de fibra de vidrio, que no requieren de dicha protección, obteniendo así paneles más finos. A partir de la década de los 60, se empezó a utilizar fibra de vidrio en sustitución del asbesto, por el potencial cancerígeno de este último [30].

La fibra de vidrio es un material consistente en fibras continuas o discontinuas de vidrio [31]. El GFRC es un material compuesto: las fibras de vidrio se proyectan sobre una base de mortero de cemento en varias capas, creando un material final que reúne las cualidades de ambos. Debido a que normalmente la finalidad de las piezas de GRC es la creación de paneles de cara vista, en el mortero se suele emplear hormigón blanco, y arenas de granulometría fina; razón por la que también se le denomina micro-hormigón. Además se suelen utilizar distintos aditivos en la mezcla para facilitar el desencofrado del molde, o para controlar mejor la evaporación de agua y evitar así la fisuración de las piezas. También admite el empleo de colorantes en la mezcla. Se ha descubierto que la fibra de vidrio reacciona con los álcalis del hormigón, por lo que se prefiere un cemento de bajo porcentaje de álcalis, y se emplea un tipo de fibra de vidrio resistente a los álcalis.



Son empleados principalmente en paneles de fachada para edificaciones, tuberías, depósitos de líquidos, separaciones como paredes y puertas, elementos resistentes al fuego, tejas, mobiliario urbano, pavimentos, encofrados, reparaciones arquitectónicas, generalmente prefabricados.

La longitud de este tipo de fibras es, de hasta 40 mm y los contenidos usuales son de menos del 5% en volumen.

Su mezclado es diferente al de las fibras de acero, por ejemplo cuando se trata de capas delgadas, las fibras en madeja se alimentan dentro de una pistola de aire comprimido que las corta y las rocía con la lechada de cemento. Es lo que se denomina colocación por proyección.

El montaje es en seco, realizándose las uniones sobre espumas de polietileno y el sellado de juntas con silicona neutra o poliuretano. La fibra de vidrio resistente a los álcalis se utiliza generalmente en el nivel 3-5% en la fabricación de productos prefabricados, ya sea por el proceso de pulverización o por el uso de los métodos tradicionales. También se utiliza en el rango de 1-2%.

Existe una asociación internacional para regular el uso de este material, denominada GRCA [32].

- **Características Mecánicas del GFRC**

Las características mecánicas del G.F.R.C. deben estar comprendidas entre los valores mostrados en la tabla 3.3 (valores usuales de las propiedades principales del GFRC a 28 días de edad): ([33]).

| Prop | Unid | Valores |
|----------------------------------|------|---------|
| Resistencia a la compresión | Mpa | 50 - 80 |
| Módulo de elasticidad | GPa | 10 - 20 |
| Límite de Proporcionalidad (LOP) | Mpa | 7 - 11 |
| Módulo de Rotura (MOR) | Mpa | 15 - 25 |

Tabla 3.3. Características mecánicas del hormigón con fibra de vidrio. Fuente: elaboración propia

3.4.2 Hormigón Reforzado con Fibras de Polipropileno (PFRC)

Las fibras poliméricas atrajeron la atención de los investigadores para reforzar el hormigón en la primera mitad de los años 60.

Éstas, están formadas por un material polimérico (polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon, poliéster) extrusionado y posteriormente cortado [34].



Un polímero es una molécula de peso molecular elevado con una estructura compleja, fruto de la repetición de una estructura menor llamada monómero, el cual es un producto generalmente orgánico. La mayor parte de los polímeros usados en ingeniería se basan en los hidrocarburos, que son moléculas formadas fundamentalmente a partir de átomos de hidrógeno y carbono, dispuestas en distintas formas estructurales.

Uno de los principales aspectos a destacar es que polímeros como el polipropileno, además de ser muy económicos con respecto a otras fibras como las de acero, son químicamente inertes, muy estables en el medio alcalino que supone el hormigón, presentando una superficie hidrófoba, por lo que no absorbe agua durante la mezcla ni el posterior fraguado. Sin embargo, este mismo aspecto supone a su vez un inconveniente en cuanto a la adherencia de las fibras a la matriz cementosa. Otra desventaja de las fibras de polipropileno que merece mención es su bajo módulo de elasticidad.

Las fibras de polipropileno cumplen una doble tarea como plástico y como fibra y esto es así, porque no funden hasta los 160°C. Su resistencia a tracción, dureza y rigidez son mayores que las de los polietilenos (que además funden a los 100°C), pero menor su resistencia al impacto. Tiene una desventaja importante: es susceptible a la degradación por luz, calor y oxígeno; debido a esto, es necesario añadirle un antioxidante y un estabilizador a la luz ultravioleta, lo que encarece la producción.



Figura 3.6. Distintas Fibras de polipropileno existentes. Fuente: [35]

Según su proceso de fabricación las podemos clasificar en [36]:

- Monofilamentos extruidos (tipo I)
- Láminas fibriladas (tipo II)



Hay que destacar las fibras multifilamento, que nacen como reemplazo de las variedades de fibras monofilamento y que están encontrando una gran aceptación en el mercado de las fibras poliméricas dado que parece que con ellas se resuelve la falta de adherencia de las fibras con la matriz.

Las dimensiones de las fibras son variables, igual que su diámetro y forma. Pueden clasificarse en:

- Microfibras: $< 0,30\text{mm}$ diámetro
- Macrofibras: $\geq 0,30\text{mm}$ diámetro

Las microfibras se emplean en general para reducir la fisuración por retracción plástica del hormigón, especialmente en pavimentos y soleras, pero no asume funciones estructurales. También se utilizan para mejorar el comportamiento frente al fuego, siendo conveniente un elevado número de fibras por kg. Las microfibras se caracterizan no sólo por sus características físico-químicas sino también por su volumen de fibra, que indica el número de fibras presentes en un kg de hormigón, dato que, a su vez, depende de la longitud de la fibra y muy especialmente de su diámetro.

Las macrofibras pueden colaborar estructuralmente, siendo su longitud variable (desde 20mm a 60mm), la cual debe guardar relación con el tamaño máximo del árido.

La adición combinada de micro y macro fibras puede aportar, mejorando no sólo la resistencia a tracción del hormigón sino también el comportamiento post-pico de éste [37].

En el caso de fibras con longitudes relativamente elevadas (alrededor de 50mm), se observa una importante pérdida de trabajabilidad del hormigón, incluso con bajos contenidos de fibras, llegando a afectar los resultados del cono de Abrams en hasta 75mm.

Las fibras de polipropileno al añadirse al hormigón se dispersan perfectamente en todo el volumen de éste. Esto confiere a dicha matriz un armado en tres dimensiones. Cabe destacar que, a pesar de ser un elemento discreto, aporta continuidad al volumen de la pieza de modo tal que al fracturarse no se separa. Todo ello, sumado a las características de la fibra (geometría y módulo elástico), repercute en un incremento de la tenacidad (capacidad de absorción de energía) y mejor recuperación en la zona post-elástica.

Otra consecuencia lógica del empleo de fibra de polipropileno en sustitución del acero, es el aligeramiento de piezas y estructuras, dada la marcada diferencia entre sus densidades. Esa misma densidad hace que la fibra quede embebida en el hormigón durante el vibrado, de forma que no aflora a la superficie en contacto con el molde: la estética de la pieza permanece inalterada.

Por último, como todas las fibras, confiere una aportación extra resistente a la abrasión e impacto. Ello sigue siendo una consecuencia de su gran capacidad de absorción energética, puesto que para extraer una fibra de la matriz se ha de consumir la energía equivalente que active los procesos de desunión, estiramiento y extracción o deslizamiento.



3.4.3 Aplicaciones de hormigones reforzados

Los hormigones reforzados con fibras de polipropileno se ha utilizado en campos tan diversos como la pavimentación de tableros de puentes, pavimentos industriales, de contenedores, de puertos (Figura 3.7), revestimientos de túneles, prefabricados, etc. En el campo militar también ha sido utilizada esta solución con buenos resultados en la pavimentación de hangares y recintos protegidos frente a impactos de proyectiles.



Figura 3.7. Pavimento de puerto realizado con hormigón reforzado con fibras. Fuente: [38]

El hormigón para pavimentos difiere del hormigón tradicional, principalmente, en que la losa debe transmitir las cargas que recibe del tráfico a la base o el terreno, por ello debe de presentar una elevada resistencia a flexotracción. Otro punto importante a considerar es necesidad de alta resistencia a fatiga que se requiere debido a la repetición de actuación de cargas.

Para los elementos prefabricados, cuyas dimensiones y espesores están optimizados, las fibras han sido desde la década de los setenta un elemento muy usados. El transporte de estos elementos hace que sean susceptibles a desportillamientos, agrietamientos y descarrilamientos. Las fibras en estos casos resultan muy útiles debido a que el agrietamiento de los elementos se reduce, y, en caso de que esta se produzca, permiten la utilización de las piezas.

En el caso de los elementos aligerados de bajas densidades, las microfibras sirven para disminuir la fisuración en estado fresco, además de para mejorar el monolitismo del material, aumentando la capacidad de deformación.

Al igual que ocurría en los pisos y pavimentos, en el hormigón proyectado, las macrofibras sustituyen a la malla electrosoldada. Los tiempos de ahorro de la malla justifican ampliamente la diferencia en el coste por metro cuadrado de material colocado.



No obstante, la principal ventaja es que el hormigón con fibras permite un ahorro muy importante en la cantidad del hormigón lanzado debido a que pueden seguirse estrictamente los espesores del hormigón colocado. Seguir estrictamente el perfil de la excavación sin preocuparse por cubrir la malla, supone un ahorro evidente, tanto de material como de tiempo.

En aplicaciones de carácter hidráulico las fibras sintéticas han logrado una acogida importante debido a que no se oxidan, ni generan residuos de óxido que en algunas ocasiones manchan la superficie de hormigón.

Otra ventaja, especialmente útil en túneles, es la resistencia al fuego. Los incendios en túneles suponen una de las situaciones de riesgo más complejas para esta tipología de estructuras, especialmente propiciado por la difícil renovación del aire, de la acumulación del calor, y al hecho de que el hormigón a partir de cierta temperatura empieza a disparar trozos superficiales de material.

La resistencia del hormigón frente a explosiones también es uno de los puntos fuertes del hormigón reforzado con fibras. Un elemento de hormigón convencional, al recibir cargas explosivas (dinámicas y cíclicas) puede colapsar, debido a su resistencia mecánica y a su capacidad de deformación. Estas dos respuestas absorben la energía de esta carga hasta sus límites. Un hormigón convencional tiene una capacidad de deformación muy limitada (0.02 %), mientras que un hormigón reforzado con fibras le permite al material llegar a su máxima resistencia a tensión, y seguir funcionando mientras se deforma debido a la fisuración, de modo que el elemento no colapsa.

Los depósitos de explosivos, así como las estructuras que pueden ser susceptibles de ataques externos suelen incorporar macrofibras en la composición del material, mejorando la resistencia frente al impacto del material.

La figura 3.8 muestra la relación Carga/deflexión de una viga sometida a impactos a diferentes velocidades. Los resultados muestran que para una misma velocidad de carga, el hormigón reforzado con fibras de acero presentaba una capacidad de deformación superior, no solo antes de la primera fisura, sino también el comportamiento después de la fisuración es muy superior al hormigón sin fibras. La absorción de energía se incrementa de una forma dramática.

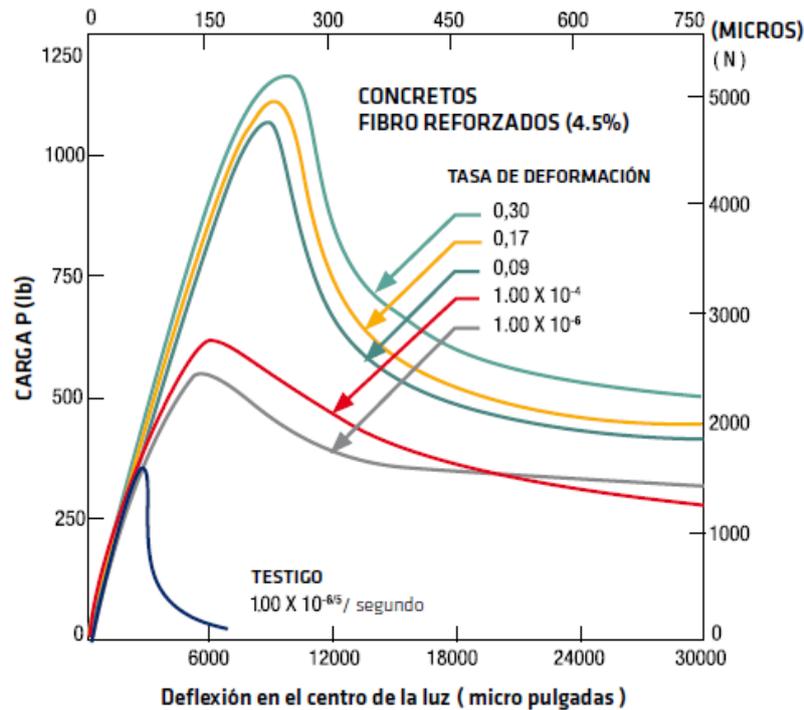


Figura 3.8. Pavimento de puerto realizado con hormigón reforzado con fibras. Fuente: [39]

Si se aumenta la velocidad de la carga, la resistencia dinámica del hormigón reforzado con fibras aumenta en más de un 100%, y la capacidad de absorción de energía hasta en un 70% para la velocidad más alta de 300.000 microdeformaciones/segundo. [39].

Otros estudios como [40] también muestran los beneficios de la adición de fibras para el aumento de la resistencia a compresión y su respuesta frente a explosiones. En este caso, se realiza un estudio de campo centrado en dos parámetros principales, el efecto de las fibras y la resistencia a compresión, estudiando su efecto frente a explosiones. El ensayo mostró una mejoría notable en la respuesta de las muestras sometidas a explosiones.

Hay que remarcar, que además de las características mecánicas que se requieren para el desarrollo del producto objeto del presente TFG. La principal característica que se busca es que presente una gran capacidad de mitigación de vibraciones. Esto se conseguirá a partir del mecanismo de pérdida de energía vibratoria por mecanismos de los deslizamientos relativos entre la unión mecánica que se da entre las fibras sintéticas y la matriz de hormigón. Esta pérdida de energía se debe a la aparición de micro roturas que se cierran y abren durante la vibración del material, provocando una reducción en la amplitud del material. Este comportamiento ha sido estudiado por Yan et al. [41], quienes estudiaban este mecanismo de atenuación de vibraciones con hormigones reforzados con fibras sintéticas como un mecanismo que permitía aumentar la energía de disipación durante los ciclos vibratorios sin penalizar significativamente otras propiedades mecánicas del material.

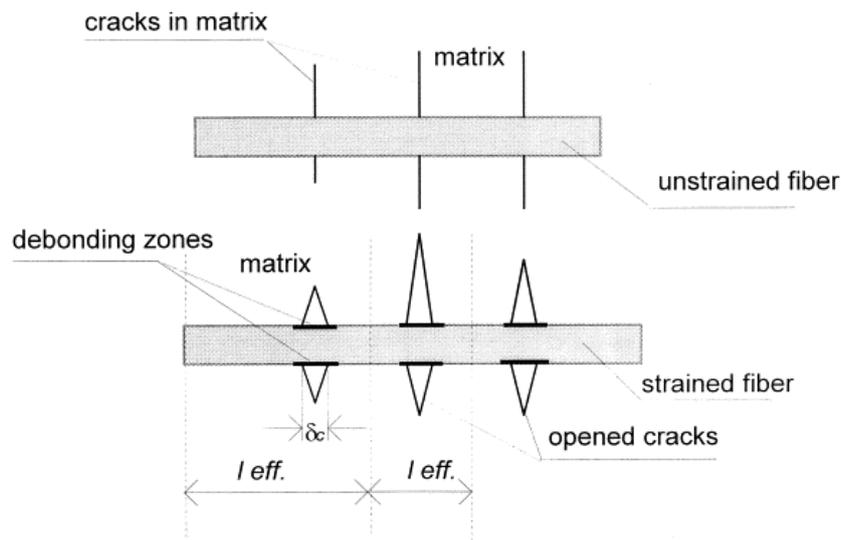


Figura 3.9. Ilustración de la apertura de las fisuras en la matriz cementante en las fibras bajo condiciones tensio-deformacionales. Fuente: [41]

3.5 Conclusiones

En este capítulo se ha recopilado el conocimiento y la experiencia que se tiene hasta el momento de los diferentes residuos obtenidos de la revalorización de neumáticos usados, experiencias del uso de hormigones con estos residuos, así como los mecanismos y experiencias con hormigones reforzados con fibras sintéticas.

Para ello, en primer lugar se explica cuál es la metodología de obtención de los residuos provenientes de neumáticos fuera de uso, así como la composición, forma y tamaño del polvo de caucho. Posteriormente se expone el uso que este material presenta al ser incluido en la dosificación del hormigón, además de explicar detalladamente cuáles son sus propiedades mecánicas, así como usos potenciales.

Posteriormente se hace un repaso a las características y composiciones del hormigón reforzado con fibras sintéticas. Y para finalizar se exponen las experiencias que se tienen hasta el momento con distintas aplicaciones en este tipo de hormigones.

Así pues, con la información expuesta se está en disposición de obtener un conocimiento teórico de los distintos materiales que serán usados en el material mitigador de vibraciones, permitiendo la continuación del TFG entrando a definir el material en más profundidad.



Capítulo 4. Mecanismos de mitigación



4.1 Introducción

Un movimiento ondulatorio consiste en la propagación de una perturbación (que puede ser de naturaleza muy variada) por un medio determinado, material o no. Básicamente, podemos estudiar el movimiento ondulatorio como una transmisión de energía, que se propaga de una partícula del medio a otra.

Dentro de los movimientos ondulatorios se definen como vibraciones, o más concretamente como vibraciones mecánicas, a los movimientos de vaivén que realizan las partículas de un cuerpo elástico debido a una determinada excitación de carácter más o menos intermitente en el tiempo que dan lugar a deformaciones y tensiones en los medios continuos. Dichas excitaciones, que no son más que el suministro de energía al sistema vibratorio, pueden ser instantáneas (como las generadas por el golpeteo de una placa, el rasgueo de las cuerdas de una guitarra o también, un desplazamiento respecto a la posición de equilibrio de cualquier sistema que se pueda esquematizar como una masa resorte) o periódicas (como aquellas generadas por el paso de una persona o un vehículo sobre un puente o el funcionamiento continuo de un motor).

De este modo, surge un concepto clave en el estudio de las vibraciones: el frente de onda, definido como la superficie (o línea) formada por todos los puntos del medio que tienen la misma fase (el mismo valor de la perturbación) en un instante determinado.

Como cabe esperar, las consecuencias de las vibraciones pueden ser muy variadas y comportar problemas de diversa índole. Así pues, desde el punto de vista estrictamente ferroviario, las vibraciones pueden generar tanto daños a la propia infraestructura y superestructura (haciendo entrar en resonancia a las obras de paso, dañando ciertos elementos de la vía como las traviesas o alterando el comportamiento de la capa de balasto por la aparición de fenómenos de licuefacción) como daños al vehículo (generando un aumento en el daño de ciertas partes del mismo como las ruedas) e incluso daños al propio cuerpo humano. De este modo, aquellas personas que receptoras de dichas vibraciones pueden presentar desde simples problemas de malestar hasta graves problemas de salud. Tanto es así, que en determinados casos ciertas frecuencias y niveles de vibración pueden dañar crónicamente algunos de los órganos vitales internos.

Por estos motivos se hace fundamental proponer y evaluar un sistema capaz de mitigar las vibraciones generadas. Para ello en este capítulo se va a estudiar desde un punto de vista teórico cómo funcionan los mecanismos de mitigación de vibraciones, haciendo hincapié en el mecanismo de frecuencia de corte y en la absorción de ondas.

Las conclusiones del presente capítulo servirán para obtener una visión clara a cerca de la situación actual de los mecanismos de mitigación de vibraciones dentro del campo de la ingeniería ferroviaria, y así ser capaces de ofrecer una solución competitiva que marque las necesidades del nuevo producto a desarrollar.

4.2 Mecanismos de mitigación de frentes de ondas

El problema del análisis vibratorio, como tantos otros campos de la vida cotidiana, requiere de un análisis matemático adecuado que permita su comprensión y estudio. Para ello se utilizan modelos teóricos de cálculo de gran versatilidad que permiten analizar el efecto que produce en la señal vibratoria en diferentes escenarios (como pudiera ser la implementación de medidas preventivas o correctivas).

De esta forma, el diseño de elementos estructurales se puede abordar siguiendo una serie de criterios desde dos puntos de vista totalmente diferentes: estáticos o dinámicos. Un elemento sometido a cargas estáticas se analiza siguiendo métodos de cálculo clásicos. En el caso estático, se puede decir que la solución sigue una intuición natural que indica a mayor carga, mayores dimensiones de una estructura. Sin embargo, cuando las vibraciones estructurales entran en juego, la fase de diseño cambia radicalmente, pues la magnitud de las fuerzas pierde protagonismo mientras que la frecuencia con la que la fuerza se repite pasa a ocupar una mayor importancia. La intuición en estos casos puede ser causa de errores, pues fuerzas periódicas pequeñas pueden tener efectos mucho más devastadores que fuerzas estáticas de magnitud superior.

El valor de las frecuencias que más perjudicarán a una estructura dependerá de las características geométricas y mecánicas de ésta. Generalmente, estas frecuencias adquieren el nombre de modos de vibración propios del sistema. Así pues, el criterio de diseño en cuanto a sistemas antivibratorios se refiere dependerá en gran medida, además de la propia capacidad amortiguadora que posea cada material, del rango de frecuencias que se desee atenuar.

4.2.1 Conceptos previos

A continuación, se explicarán una serie de conceptos fundamentales previos sobre las características de las ondas para poder comprender y aplicar posteriormente la teoría de las vibraciones.

De forma general, un movimiento vibratorio armónico simple, (cuya trayectoria sigue una senoide) tiene dos características fundamentales: su frecuencia y su amplitud. Mediante el análisis de ambas, el movimiento de una partícula que vibra quedará totalmente determinado. Seguidamente, se explicarán estos dos conceptos básicos.

- **Amplitud:** la amplitud A de un movimiento oscilatorio es una medida de la variación máxima del desplazamiento u otra magnitud física que varía periódicamente en el tiempo. Es la distancia máxima entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio. Tiene iguales dimensiones que la magnitud que se está tratando.

- **Frecuencia:** la frecuencia f es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico. Según el Sistema Internacional, la frecuencia se mide en Hz (Hercios), cuyo significado teórico es el intervalo de tiempo transcurrido entre dos repeticiones consecutivas cuya distancia de separación es la longitud de onda λ . Otra manera muy utilizada a la hora de expresar la frecuencia es en radianes por segundo. En el caso concreto de las vibraciones armónicas simples, la frecuencia es el número de ciclos o repeticiones que un punto de un sólido realiza en su movimiento por unidad de tiempo.

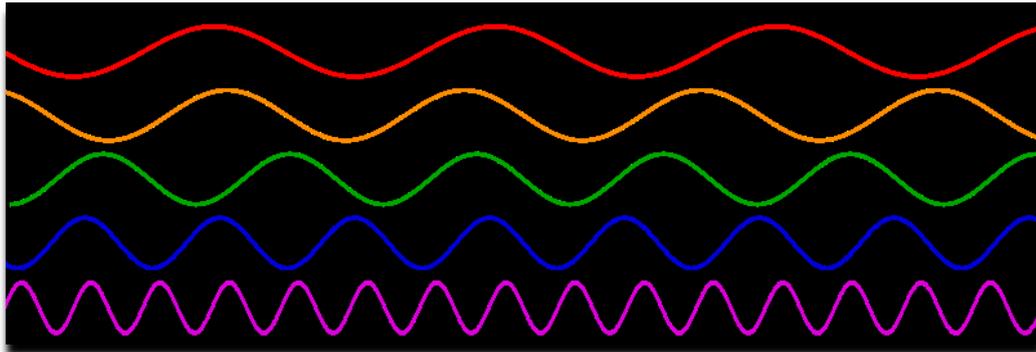


Figura 4.1. Ejemplos de ondas de distintas frecuencias. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Absorción de las ondas

Los elementos de disipación de los sistemas vibratorios son los que fuerzan la pérdida de energía del mismo. Además, estos elementos poseen como característica una relación entre una fuerza aplicada y la respuesta correspondiente de velocidad.

Este tipo de elementos posee unas ciertas características especiales ya que se considera que no tienen inercia, ni medios de almacenar o liberar energía potencial. El movimiento mecánico impartido a estos elementos se convierte en calor o sonido y, por tanto, se les denomina no conservativos o disipativos porque el sistema mecánico no puede recuperar esta energía. Existen distintos tipos comunes de mecanismos de amortiguamiento que se usan para modelar los sistemas vibratorios. Entre ellos, el que se utiliza normalmente es el amortiguamiento viscoso debido a su simplicidad. A continuación, se explicará brevemente su fundamentación.

El fundamento de este tipo de amortiguamiento se puede asimilar al que ofrece un líquido viscoso que fluye a través de una ranura o alrededor de un émbolo en un cilindro. Entonces, la fuerza de amortiguamiento que se genera es proporcional a la velocidad relativa entre los dos límites que confinan al líquido. La magnitud de la fuerza del amortiguador $F(\dot{x})$ siempre actúa en la dirección opuesta a la de la velocidad y es una función no lineal de la velocidad (aunque en determinadas ocasiones puede considerarse cuasi-lineal, lo cual depende del sistema en sí o del rango de la velocidad). En el caso lineal, la relación se expresa como

$$F(\dot{x}) = c\dot{x}$$

Donde c es la constante de proporcionalidad denominada “coeficiente de amortiguamiento”.

Por su parte, para un sistema en el que tengan lugar vibraciones traslacionales de un solo grado de libertad, el factor de amortiguamiento o relación de amortiguamiento ξ se define de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{2\sqrt{km}} = \frac{c\omega_n}{2k}$$

Donde c es el coeficiente de amortiguamiento anteriormente mencionado, k es la rigidez del sistema y m es la masa del sistema. El factor de amortiguamiento resulta por tanto un parámetro adimensional.

Dentro de la ecuación anterior, se denomina amortiguamiento crítico c_c a la expresión del denominador como se muestra a continuación:

$$c_c = 2m\omega_n = 2\sqrt{km}$$

Por lo tanto, la razón de amortiguamiento se puede expresar de nuevo de la siguiente forma:

$$\xi = \frac{c}{c_c}$$

Cuyo valor marcará una nueva manera de clasificar los sistemas discretos que se están estudiando en este apartado. De esta forma, se denominará sistema subamortiguado a aquél cuyo factor de amortiguamiento se encuentre en el intervalo $0 < \xi < 1$; se denominará sistema sobreamortiguado a aquél cuyo factor de amortiguamiento $\xi > 1$ y se denominará sistema críticamente amortiguado aquél cuyo factor de amortiguamiento sea $\xi = 1$.

Finalmente, se verán algunas maneras alternativas de representar la razón de amortiguamiento en función de los parámetros de frecuencia natural y factor de amortiguamiento. En este sentido, sustituyendo las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x = \frac{f(t)}{m}$$

Como puede verse en esta ecuación, las diferentes soluciones que se calculan a partir de ella dependen fundamentalmente de la forma de la función $f(t)$ y de las cantidades ω_n y ξ , por ello, estos dos últimos parámetros son muy importantes a la hora de considerar los diferentes casos a estudiar a partir de dicha ecuación diferencial.

Asimismo, es de gran utilidad la introducción del tiempo adimensional $T = \omega nt$ puede expresarse como:

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} + 2\xi \frac{dx}{d\tau} + x = \frac{f(\tau)}{k}$$

Esta manera de dejar indicada la ecuación que gobierna los movimientos de los sistemas discretos de un grado de libertad es muy útil a la hora de extraer las distintas soluciones.

4.2.3 Frecuencia de corte

Desde el punto de vista de las excitaciones dinámicas (como aquellas producidas por un vehículo ferroviario), resulta especialmente interesante estudiar cómo varía la respuesta del sistema dependiendo de la frecuencia a la que actúa la excitación. De este modo, se debe tener en cuenta que cuando esta frecuencia se aproxime a la frecuencia natural de vibración del sistema, se alcanzará un máximo en los desplazamientos que dependerá en gran medida del tipo de sistema existente. De este modo, el pico será mayor cuanto menor sea el factor de amortiguamiento, llegando a infinito cuando $\xi = 0$ y pasando desapercibido cuando este parámetro se aproxime a la unidad. Este hecho se puede apreciar en la siguiente figura, donde $H(\Omega)$ es la amplitud máxima que se registra para el movimiento y Ω es el cociente entre la frecuencia de la fuerza excitadora $f(t)$ y de la frecuencia natural de vibración del sistema.

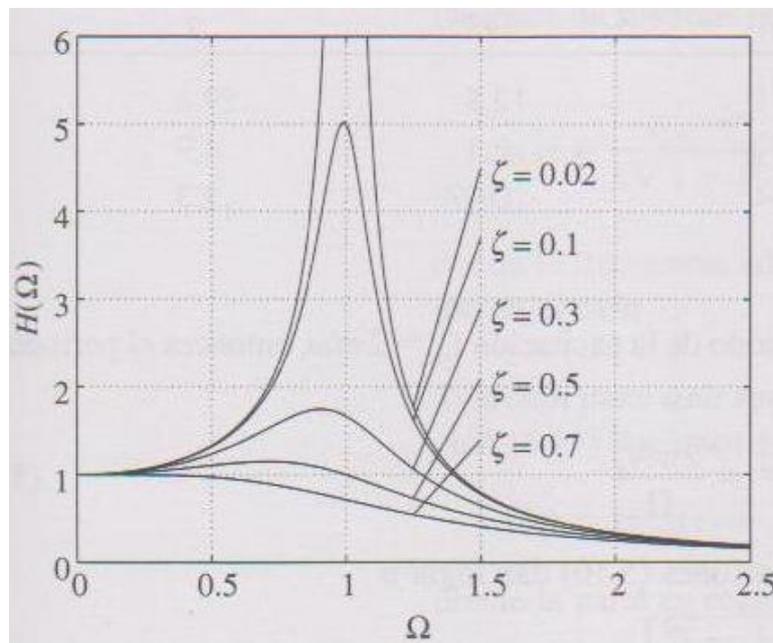


Figura 4.2. Respuesta sistema de 1 gl frente a una excitación armónica. Fuente: [42]

Por tanto, es evidente que si el coeficiente de amortiguación será diferente para cada frecuencia, habrá bandas de frecuencia que se amortiguarán más que otras. Esta variabilidad, además, se verá influenciada por los distintos materiales que compongan el sistema, ya que cada uno tendrá una amortiguación distinta a distintas frecuencias. No obstante, no se trata de un comportamiento arbitrario, existen ciertos patrones que siguen algunas estructuras y/o materiales, en lo que a mitigación de vibraciones se refiere, que puede ser aprovechados a la hora ser usados como elemento mitigador.

Según observaciones realizadas en ensayos experimentales que han estudiado el comportamiento de la transmisión de vibraciones de un estrato de terreno sobre un estrato rocoso, y de acuerdo con Wolf [43], existe una frecuencia de corte por debajo de la cual no se puede inducir ninguna vibración en el estrato de suelo, definida por ejemplo como $c/4H$, donde H representa la profundidad y c la velocidad de propagación de la onda. Basándose en esa hipótesis, se han diseñado bases rígidas artificiales (compuestas de hormigón) que provocan un efecto similar al de los lechos rocosos. De esta manera en el suelo no se reproducirán frecuencias por debajo de esta frecuencia de corte o frecuencia de paso bajo. Este efecto es bastante deseable en el caso de las vibraciones inducidas por el ferrocarril, ya que son el rango de frecuencias bajo el que mayor importancia tiene en el fenómeno ya que es aquel que más afecta a las personas.

Si analizamos el amortiguamiento radial desde un punto de vista matemático (Wolf & Song [10]) para situaciones generales en las que la rigidez del suelo aumenta con la profundidad podemos asumir que el módulo de cortante y la densidad varían de la siguiente forma:

$$G(r) = G_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^g$$

$$\rho(r) = \rho_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^m$$

Donde r es la coordenada radial medida desde el origen y G_0 y ρ_0 son los valores correspondientes a la interfaz suelo estructura. Los valores g y m son valores reales. La velocidad de las ondas de corte la podríamos escribir como:

$$c_s(r) = \sqrt{\frac{G(r)}{\rho(r)}} = c_{s0} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{g-m}{2}}$$

with

$$c_{s0} = \sqrt{\frac{G_0}{\rho_0}}$$



Si dividimos el semiespacio infinito en infinitas celdas de tamaño ínfimo, cuando el límite r tiende a infinito, las fuerzas inerciales serán las que dominaran sobre las fuerzas elásticas de recuperación en cada una de las celdas, por tanto, la energía se propagara pero se irá mitigando debido a la radiación radial. Este fenómeno se satisface por la siguiente ecuación para todas las frecuencias:

$$c_s(r) < c_{s0} \frac{r}{r_0}$$

Cuando las fuerzas restaurantes elásticas dominan sobre las inerciales, no se propaga energía y la radiación radial se desvanece. Esto ocurre cuando:

$$c_s(r) > c_{s0} \frac{r}{r_0}$$

No obstante, existe un caso intermedio, en el que:

$$c_s(r) = c_{s0} \frac{r}{r_0}$$

En este caso las fuerzas restaurantes elásticas y las fuerzas de inercia dominan para las frecuencias suficientemente pequeñas y suficientemente grandes respectivamente. Por tanto, queda demostrado que existe una frecuencia de corte, por debajo de la cual no se transmiten las ondas.

4.3 Medidas de mitigación existentes en el mercado

Debido al crecimiento que ha experimentado la industria del ferrocarril en las últimas décadas, se han empezado a desarrollar una gran cantidad de nuevas tecnologías para la solución de problemas específicos como es el caso de las vibraciones inducidas por el tráfico ferroviario.

En muchos países, de forma habitual se incorporan elementos elásticos o rígidos que permiten o facilitan la introducción de mayores cargas o velocidades, evitando así fenómenos producidos por las vibraciones que puedan degenerar en patologías. Las posibilidades de disposición de estos elementos es múltiple (pues permiten adaptarse tanto a vías convencionales como a vías en placa) y se pueden situar entre diversos elementos del paquete de vía.

De partida, decir que no existe un método de mitigación general aplicable a todos los casos que se puedan presentar en la realidad. El tratamiento de cada uno las estrategias depende de muchos factores, de entre los cuales destacan:

- El mecanismo de generación dominante (ya sea el paso de la carga cuasi-estática o las fuerzas dinámicas).
- La interacción entre el terreno y la estructura de vía.

De una forma general, se puede afirmar lo siguiente. Si el mecanismo de generación dominante son las fuerzas dinámicas originadas por los defectos de vía, entonces la mejor estrategia será la corrección de dichos defectos y la alineación de los carriles. Un ejemplo de esto que ayudaría mucho a reducir el problema es la eliminación de los defectos de onda larga en el perfil longitudinal de los carriles.

Por el contrario, si el mecanismo de generación predominante es el paso de la carga cuasi-estática, la corrección de los defectos del carril no supone ningún beneficio. Por esto, deberán plantearse otras estrategias de mitigación como las que se verán seguidamente.

En este capítulo se va a realizar pues un resumen a las distintas soluciones más comúnmente utilizadas para la mitigación de vibraciones, citando tanto estudios experimentales como soluciones comerciales implementadas en vía.

4.3.1 Sujeciones

Se denomina sujeción al conjunto de elementos cuyo objeto es dar continuidad estructural a la vía. La sujeción se constituye a partir de los elementos que fijan el carril asegurando una posición estable del mismo sobre la traviesa. La importancia de la función de la sujeción se ha ido incrementando con el transcurso del tiempo a medida que las velocidades y cargas por eje aumentaban y, consecuentemente, crecían los esfuerzos a transmitir de los carriles a las traviesas, así como las exigencias del estricto mantenimiento del ancho de vía y de aislamiento eléctrico entre los dos hilos del carril

Existen dos tipologías distintas de sujeciones: las rígidas y las elásticas. La ventaja fundamental de las sujeciones de carril elásticas sobre las rígidas consiste en permitir movimientos verticales del carril al paso de las circulaciones, amortiguándose la energía de los choques que se producen. Estos movimientos deben existir sin ningún juego entre el carril y la traviesa y, para ello, se diseñan unos componentes elásticos (grapas, clips) encargados de apretar el carril sobre la traviesa que funcionan como un muelle, absorbiendo las deformaciones de las placas de asiento de los carriles así como generando una disminución de las vibraciones que se transmiten al resto de la infraestructura. Si conseguimos incrementar la flexibilidad de estos elementos conseguiremos aumentar su capacidad para amortiguar vibraciones y por tanto disminuir su transmisión al entorno. Esto resulta fundamental especialmente en el caso de vía en placa, puesto que la gran rigidez de las mismas provoca picos en las aceleraciones que pueden resultar inaceptables.



Las sujeciones de alta resiliencia son una solución bastante estandarizada a la hora de obtener menores niveles sonoros y vibratorios. Estudios muestran que, comparando con sujeciones rígidas, el uso de sujeciones de alta resiliencia proporciona reducciones en el ruido emitido de entre 3 y 6db [44]. El uso de sujeciones de alta resiliencia del carril con su soporte precargados con muelles especialmente diseñados con una carga del orden del 80% la estática de proyecto, de tal manera que cuando el tren circula sobre los mismos éstos se descargan y absorben las vibraciones generadas. Estos elementos son especialmente eficaces en el rango de frecuencias entre 30 y 100 Hz [45].

4.3.2 Placas de asiento

El uso de las traviesas de hormigón frente a soluciones más convencionales como las traviesas de madera ha derivado en un notable incremento en la rigidez del paquete de vía [46]. Este hecho ha obligado a proyectar el uso de un elemento elástico adicional entre el carril y la traviesa capaz de reducir este aumento de rigidez, evitando así en la medida de lo posible la transmisión de grandes tensiones y vibraciones a los demás elementos.

En este sentido, las placas de asiento proporcionan la elasticidad necesaria, permitiendo entre otras cosas la amortiguación de vibraciones “del carril hacia abajo” (lo cual repercute positivamente en todos los elementos del paquete de vía a excepción del propio carril donde puede llegar a incrementarlas). De esta forma, si el valor de elasticidad resulta muy alto, se puede producir un aumento de vibraciones en el propio vehículo que afectará a los usuarios del servicio.

Atendiendo a su rigidez, las placas de asiento se pueden clasificar en blandas ($K < 80$ kN/mm), medias ($80 < K < 150$ kN/mm) y en duras ($K > 150$ kN/mm) [47].

Como puede deducirse de lo explicado hasta el momento, resulta complejo encontrar el valor óptimo de rigidez que permita la menor afección a todos los elementos integrantes del paquete de vía. En este sentido surgen diversas investigaciones como la llevada a cabo en [10] donde se plantea la cuestión de saber hasta cuánto se podría disminuir la rigidez de la placa para conseguir la mayor amortiguación sin que surjan dificultades provenientes del comportamiento dinámico del sistema vehículo-estructura, concluyendo que la rigidez óptima para vías de alta velocidad se sitúa en los 60 kN/mm. Otros estudios, como los realizados en [48], relacionan la energía disipada y la rigidez vertical en base a dos criterios principales: que al disminuir la rigidez se consigue una reducción de los esfuerzos dinámicos y que el aumento de la rigidez producirá mayor fatiga y menor energía disipada en los distintos elementos. Bajo estas circunstancias, se concluyó que el valor óptimo de la placa de asiento se encuentra en los 60 kN/mm.



4.3.3 Suela bajo traviesa

Otra solución muy estandarizada a la hora de mitigar vibraciones son las suelas elásticas bajo traviesas de hormigón, cuyo poder de mitigación de vibraciones es relativamente bajo [49]. Estos elementos se emplean como sustituto del aumento del espesor de la capa de subbalasto (lo que acaba dificultando la ejecución de la superestructura al tener que incrementar la compactación [50]) y suelen disponerse en elementos singulares como desvíos, transiciones o zonas donde se requiera una reducción de las vibraciones y nivel sonoro [51].



Figura 4.3. Suela elástica bajo traviesa. Fuente: [9]

La utilización de suelas elásticas reduce claramente el espectro de valores que adopta la velocidad de las partículas de balasto, comparándolo con valores registrados en una vía convencional [52], disminuyendo las vibraciones transmitidas por este. No obstante también tiene otros beneficios, pues su utilización genera una mejor distribución de las cargas que se transmiten hacia capas inferiores y menor efecto de abrasión del balasto. De este modo, las traviesas que apoyan directamente sobre el balasto usan solo el 3-4% de su superficie, sin embargo, las traviesas dotadas de suelas elásticas aumentan su superficie de contacto hasta un 30% [53].

Estas suelas elásticas se utilizan desde hace más de 20 años, obteniéndose buenos resultados. No obstante, ha sido durante la última década cuando se ha incrementado su desarrollo en Europa debido a que los principales ámbitos de actuación de este elemento son las vías de alta velocidad, trayectos con elevadas cargas por eje y vías que necesitan una restauración.

Para su fabricación se utilizan generalmente láminas con un espesor de 10-20 mm compuestas principalmente por elastómeros como poliuretano, caucho y EVA [53,54]. Estas pueden estar materializadas por dos capas: un núcleo situado en el interior de la traviesa que proporciona las características necesarias para la amortiguación y una capa elástica en la parte inferior cuya misión es proteger el núcleo resistente. Se emplea tanto en traviesas monobloque como bibloque [55] con espesores entre 6 y 20 mm.



Figura 4.4. Suela bajo traviesa. Fuente: [55]

Gracias a la utilización de este tipo de material se puede reducir la frecuencia de resonancia de la vía, consiguiendo disminuir aún más las vibraciones transmitidas al resto de la vía.

En definitiva, las principales funciones de las suelas son:

- Reducir la rigidez del contacto entre traviesa de hormigón y balasto.
- Aumentar la superficie efectiva de apoyo de la traviesa.
- Reducir los niveles de presión sobre la superficie del balasto.
- Incrementar la elasticidad vertical de la vía.
- Reducir el espesor de la capa de balasto.
- Reducir las vibraciones con frecuencias mayores a 40 Hz entre 8 y 15 dB.

Existen tres materiales disponibles para tres grados distintos de rigidez que cubren por completo el espectro de posibles aplicaciones, desde la protección altamente eficaz contra vibraciones hasta la mejora de la calidad del asiento de vía. Los tres materiales existentes son:

- SLB – material elastoplástico.
- SLS – material elástico con componente amortiguadora.
- SLN – material altamente elástico sin componente amortiguadora.

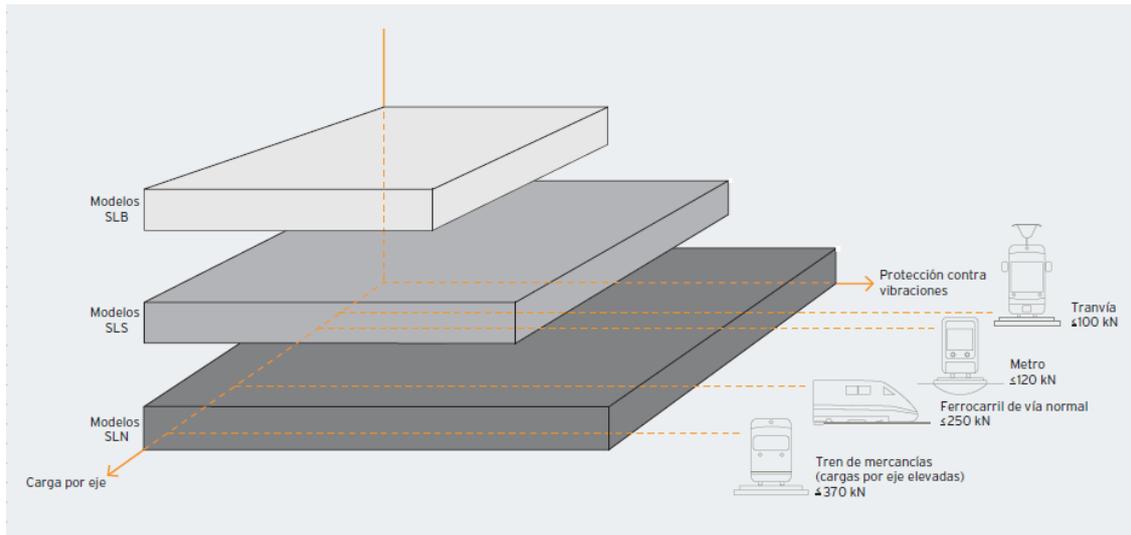


Figura 4.5. Modelos y cargas soportadas de la suela bajo traviesa SLS-USP. Fuente: [56]

Este sistema ha sido usado con la finalidad de mitigar vibraciones en líneas ferroviarias emplazadas en distintos países como el Metro Ámsterdam, el Túnel Bruchsal en Alemania, Umega Oka Lineen Japón, Britomart Station en Nueva Zelanda, el Matstetten-Rothrist en Suiza y el Feldkirch y Hallwan en Austria.

4.3.4 Traviesas envueltas en cajones elásticos

Otra tipología de elementos de naturaleza similar a las anteriormente comentados son las traviesas envueltas en cajones elásticos. Se trata de bloques independientes de hormigón armado, envuelto mediante una capa elastomérica que es acoplada en un cajón. Esto proporciona dos niveles elásticos a la vía, lo que genera dos niveles distintos de atenuación. Estos son especialmente utilizados en entornos urbanos donde se necesita un buen nivel de asilamiento debido a la presencia de edificaciones colindantes.

4.3.5 Mantas elásticas

Otra medida adoptada para la amortiguación de vibraciones y absorción de energía procedente del paso de trenes es la introducción de una manta elástica entre la capa de balasto y la subestructura. Esta medida resulta de gran aplicación en zonas donde se requiera una reducción de vibraciones y niveles sonoros [57], pero su composición y diseño puede ser muy variado en función de las necesidades particulares.

Su funcionamiento se basa en la capacidad de deformación y disipación de energía que le confieren tanto los materiales que la componen como su espesor y su densidad [58]. En este sentido, dentro de los distintos tipos de mantas que se pueden encontrar actualmente en el mercado destacan las siguientes:

- Mantas fabricadas mediante presión de mezcla homogénea de granulados de neumático fuera de uso (NFU) ligados mediante una resina de matriz polimérica, con la posibilidad de incorporar algún aditivo o compuesto complementario que mejore las prestaciones del producto, las cuales tienen especial aplicación en aquellas zonas sensibles de sufrir fenómenos de vibración debido a la proximidad de edificios [59].
- Mantas constituidas con gránulos de caucho, pero que además se han incorporado fibras que dan lugar a una amplia gama de especificaciones mecánicas [60].
- Mantas elásticas bi-capa [61] formadas por una capa de distribución de carga que se sitúa en la parte superior de la manta y que está formada por un geotextil de alta resistencia (que permite la distribución de cargas y un reparto más uniforme en las capas inferiores) y otra capa elástica compuesta por materiales de poliuretano microcelular (que permite la deformación y amortiguación de cargas).



Figura 4.6. Manta elástica bajo capa de balasto. Fuente: [62]

En resumen, las principales características de las mantas elásticas son:

- Reducción de cargas transmitidas a capas inferiores.
- Rigidez baja incluso a bajas temperaturas.
- Auto-drenaje
- Reduce la vibración transmitida.
- Pérdida de hasta 15-25 dB según la rigidez.
- Aumento vida útil del balasto.

La reducción de rigidez de las placas de asiento, así como la introducción de balasto más resistente a la abrasión, ha conseguido limitar el deterioro del balasto sin la necesidad de recurrir a estas mantas bajo balasto. No obstante, las mantas elásticas siguen siendo necesarias para impedir la propagación de las vibraciones hacia el exterior de la plataforma [52].



4.3.6 Estructuras apoyadas sobre capas rígidas

En estos sistemas de vía en placa, las traviesas se disponen directamente sobre la placa principal sin estar embutidas. De este modo se aumenta la elasticidad del sistema con respecto a los sistemas monolíticos aunque el grueso de ésta es proporcionada por la sujeción salvo en el caso de que la placa principal sea de asfalto. Hasta ahora todos los sistemas de fijación de la traviesa a la losa consisten en la disposición de algún elemento metálico de acople a través de un orificio situado en centro de la traviesa

Dentro de esta familia las vías más características son la Getrac y la ATD, ambas con placa principal asfáltica.

GETRAC A3 [63] es un sistema de vía que presenta soporte directo de las anchas traviesas de hormigón con una base multicapa formada por materiales asfálticos. La seguridad y posicionamiento de la vía se asegura manteniendo las traviesas pretensadas de hormigón en contacto con la capas superior de asfalto, anclándose cada 2 o 3 traviesas. Esta configuración permite la transferencia de fuerzas transversales de la vía a las capas inferiores. El gran peso que presentan las traviesas contrarresta la tendencia al levantamiento que presenta el emparrillado. Se trata de una vía muy efectiva con un mantenimiento muy reducido y con tiempos de construcción reducidos.

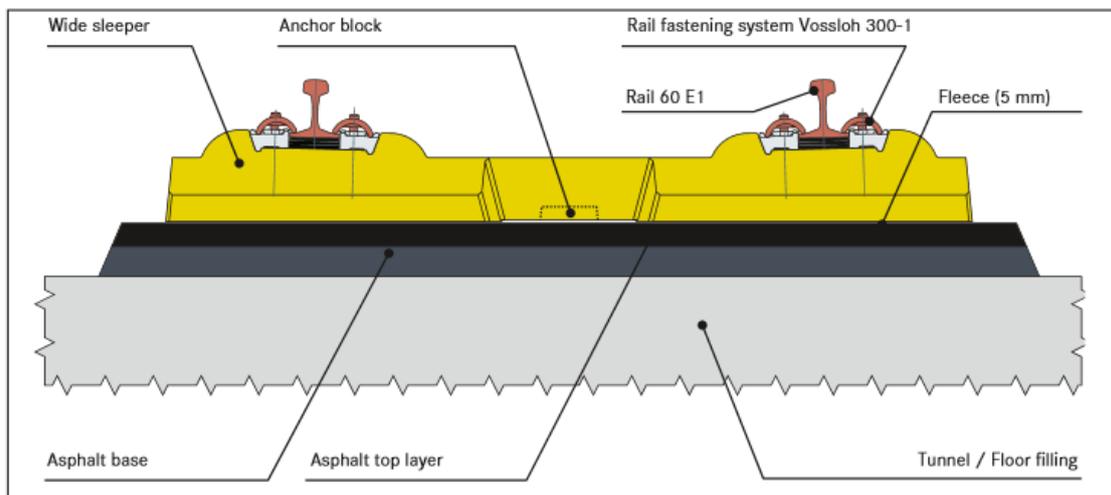


Figura 4.7. Sección transversal del sistema GETRAC A3 .Fuente: [63]

Para esta vía se han determinado reducciones de 5 dB para frecuencias de 40 a 50 Hz, no obstante, se pueden producir aumentos de vibraciones para frecuencias que no están dentro de este rango.

Otro sistema similar, también desarrollado por Railone es el sistema ATD [64]. Este sistema se presenta como una vía en placa, formado por traviesas bi-bloque apoyados sobre una capa asfáltica. Se trata de un sistema muy similar al anterior, pero orientado a su instalación en entornos urbanos.



Figura 4.8. Sistema ATD de RAILONE .Fuente: [64]

4.3.7 Zanjas

Las zanjas se presentan como una alternativa factible a los elementos anteriormente explicados que puede ser adoptada durante la fase de explotación para reducir las vibraciones. De este modo se facilita la posibilidad de adaptar esta medida una vez la vía ha sido puesta en servicio sin necesidad de recurrir al levantamiento de la misma (lo cual puede ser especialmente útil en vías en placa).

El estudio de las zanjas ha sido ampliamente analizado desde dos puntos de vista: experimental y numérico. De entre los ensayos experimentales destacan los realizados por Leilei [65] que ensayó el efecto mitigador de zanjas de distintos grosores rellenas con espuma de células; Murillo et al. [66] quienes llevaron a cabo ensayos centrífugos para determinar la eficacia del poliestireno expandido (EPS) como material de relleno en las zanjas o Çelebi et al. [67] quienes realizaron ensayos de campo con zanjas vacías o rellenas con distintos materiales (bentonita, hormigón y agua). En cuanto a los modelos numéricos empleados para estudiar el efecto de las zanjas destaca el realizado por Ju [68] para vías de alta velocidad basado en el método de elementos finitos con contornos absorbentes; Yang y Hung [69] y Hung et al. [70] que emplearon un modelo bidimensional de elementos finitos e infinitos desarrollado por ellos mismos para analizar el efecto de las zanjas y de las cimentaciones elásticas en la reducción de vibraciones o el modelo de elementos finitos realizado por El Naggar y Chebab [71] para evaluar el comportamiento de distintas tipologías de zanjas en un suelo homogéneo descansando sobre un lecho rocoso.

Como se ha comentado anteriormente existen dos tipos de zanjas (vacías y rellenas) que puede ser clasificadas en:

- Zanjas de aislamiento activo. Son zanjas muy próximas a la fuente de excitación, es decir, muy cercanas a la vía del tren.
- Zanjas de aislamiento pasivo. Son zanjas a una distancia considerable de la fuente de excitación, pero relativamente cercanas al lugar donde se pretende reducir las vibraciones.

La principal diferencia entre ambas tipologías reside en el tipo de onda frente al cual van a tener que actuar. En el caso de aislamiento pasivo, las ondas incidentes consisten fundamentalmente en ondas de tipo Rayleigh. No obstante, las zanjas de aislamiento activo han de funcionar frente a varios tipos de onda; Ondas-S, Ondas-P y Ondas de Rayleigh. Así pues, las zanjas de aislamiento activo van a verse sometidas a mayores energías incidentes que las pasivas.

La discusión sobre cuál de estas dos metodologías es más eficiente es complicada. Sin embargo, a no ser que se pretenda proteger un lugar específico del territorio algo alejado de la vía, en general las posturas adoptadas en la literatura consultada coinciden; el método más eficiente a la vez que económico es el de adoptar un aislamiento activo. Por tanto, en un caso general siempre se intentará construir las zanjas lo más cerca posible a la vía.

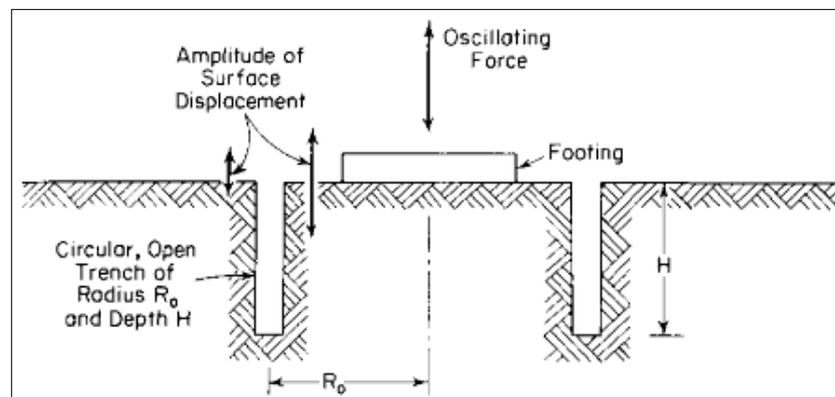


Figura 4.9. Ejemplo de un aislamiento activo mediante zanjas vacías para una fuerza armónica puntual. Fuente: [72]

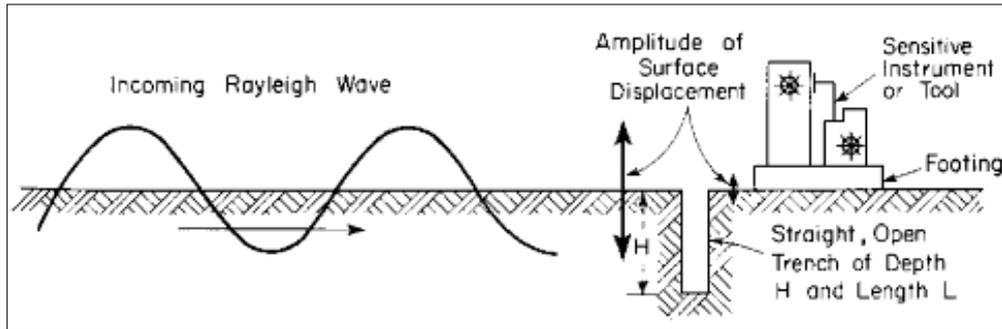


Figura 4.10. Ejemplo de un aislamiento pasivo mediante zanjas vacías situadas lejos de la fuente de excitación.

Fuente: [72]

4.3.8 Columnas de grava

Otra metodología usada para la mitigación de vibraciones ferroviarias es la utilización de las columnas de grava, cuyo objetivo es el de obtener un suelo tratado con características geotécnicas equivalentes: módulo de deformación, ángulo de rozamiento y cohesión resultantes de sumar los efectos de las propias características del suelo sin tratar más las que aporta la columna de grava. Aunque el comportamiento del suelo mejorado con columnas de grava no es homogéneo en toda la superficie tratada, desde un punto de vista teórico esta aproximación es válida. La superposición de características geotécnicas se muestra en la siguiente imagen.

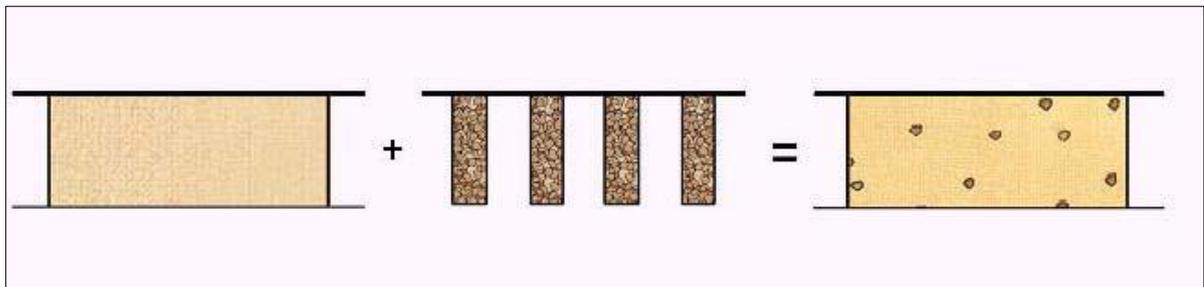


Figura 4.11. Esquema para mostrar el efecto teórico de la mejora de suelos mediante columnas de grava. Fuente:

[73]



Figura 4.12. Mejora de las propiedades del terreno sobre el que se emplaza la vía mediante columnas de grava.
Fuente: [74]

La técnica del Jet-Grouting es otro sistema de tratamiento de suelo que consiste en la inyección que aplica presiones altas en origen, lo que se traduce en velocidades altas de salida en toberas. Las altas velocidades de corte consiguen romper el suelo, desplazar parte de las partículas hacia fuera y mezclar el suelo restante con una lechada de cemento. El resultado final es un cuerpo sólido de suelo-cemento cuya resistencia y permeabilidad son diferentes a las del suelo original.

El tratamiento de los suelos por medio del *Jet Grouting* normalmente tiene dos objetivos esenciales, aumentar la resistencia y la capacidad portante del terreno, por un lado, y disminuir la permeabilidad, por otro. Para aumentar la resistencia se puede utilizar cementos de alta resistencia y lechadas de menor proporción agua/cemento.

Para la ejecución de esta actividad se requiere maquinaria y personal altamente cualificado, debido a las características particulares de esta técnica y a los riesgos que implica utilizar altas presiones y velocidades de los fluidos: agua, aire y lechada.



Figura 4.13. Sección de un suelo tratado con Jet Grouting. Fuente: [74]

4.3.9 Vibrocompactación

Por otra parte, la vibrocompactación es una técnica de mejora de suelos mediante vibración profunda. Es aplicable en suelos sin cohesión o poco cohesivos (generalmente con un contenido en finos inferior al 10%). La mejora de resistencia a corte del terreno se consigue por la reducción de huecos entre partículas gracias a la vibración producida por el vibrador en su proceso de entrar y salir del suelo tratado. Durante el tratamiento, que se ejecuta en forma de malla, se obtiene una compactación del terreno que deriva en una disminución del espesor de la capa tratada. Además, es una solución ideal para cargas dinámicas como las que supone el movimiento del tren. Asimismo, su procedimiento es muy respetuoso con el medio ambiente ya que no se necesita aporte de material a no ser que se pretenda recuperar la cota de terreno perdida durante el proceso de vibrado.

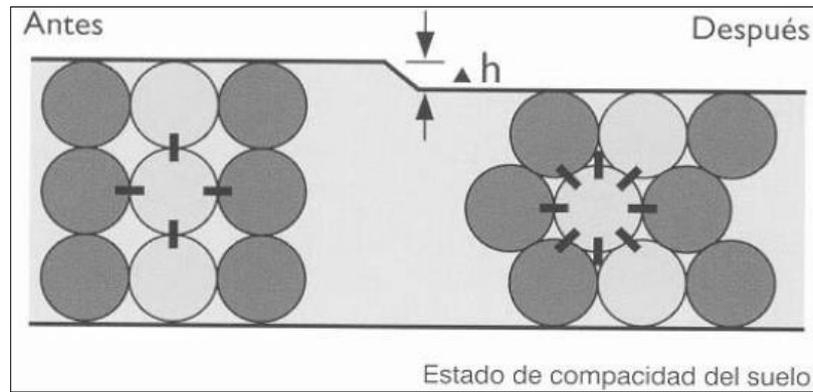


Figura 4.14. Efecto producido por la vibrocompactación en el estado de compactación del suelo. Fuente: [74]



Figura 4.15. Proceso de vibrocompactado de un suelo no cohesivo. Fuente: [75]

4.3.10 Bloques anti-onda (Wave-Impeding Blocks “WIBS”)

Como se ha visto en capítulos anteriores, las componentes principales de las vibraciones vienen controladas por los estratos de suelo más blandos y en general los más superficiales. El empleo de estos bloques anti-onda viene motivado por el mismo principio que las estrategias del apartado anterior, sin embargo, esta medida está más enfocada a actuar justo debajo de la vía.

El método consiste en rigidizar el apoyo de la vía mediante la sustitución directa del terreno mediante bloques macizos de hormigón. El objetivo es similar, como se ha dicho, al del apartado anterior. Se pretende modificar el régimen de propagación de los modos de vibración del estrato más blando. Esto se entiende desde el punto de vista de los diagramas de dispersión ya que, si se aumenta la rigidez de un terreno, sus curvas de dispersión se trasladan hacia la derecha y hacia abajo. Por tanto, el problema vendrá resuelto si la velocidad del tren es tal que su recta de velocidad ya no interseca a ninguna curva de dispersión después de que esta haya sufrido estos cambios debidos a la rigidización del suelo.

El inconveniente de esta estrategia es que únicamente presenta una reducción significativa de las vibraciones de muy baja frecuencia.

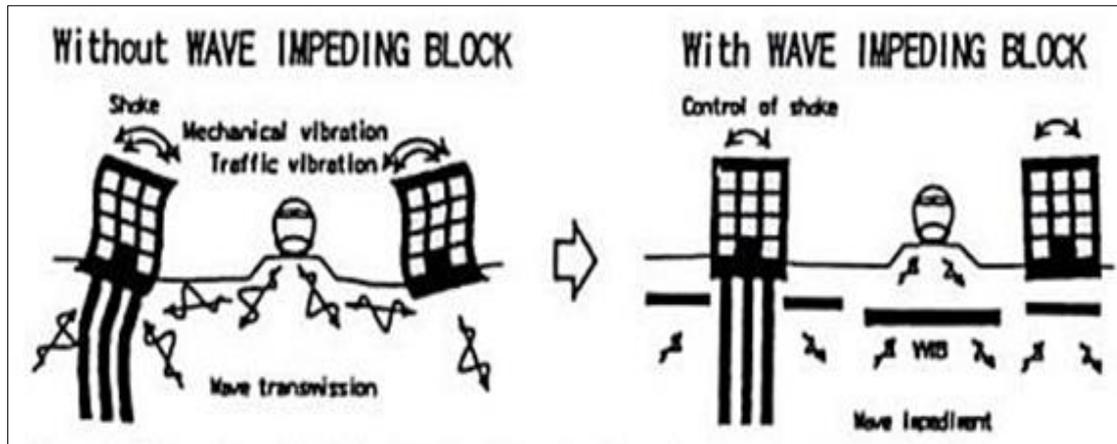


Figura 4.16. Efecto en la propagación de los bloques anti-onda (WIBs). Fuente: [75]

4.3.11 Medidas correctoras

Existe la posibilidad de actuar directamente sobre la vía una vez esta está en funcionamiento, con el fin de reducir el nivel de vibraciones emitidas por el paso de vehículos:

- En caso de vías sobre balasto, cubrir el alma del carril con un material de amortiguamiento consigue una reducción sensible en el nivel de ruidos y vibraciones (aunque en menor medida si la vía pasa por un túnel). Además, los amortiguadores del alma del carril no resultan afectados en los trabajos de bateado y rectificado.



Figura 4.17. Material de amortiguamiento en el alma del carril. Fuente: [76]

- Variación del espesor de la capa de balasto: Un espesor por encima de 30 cm no produce una mejora apreciable, sin embargo un espesor por debajo de dicho nivel sí que incide en un aumento del deterioro. Este punto está muy relacionado con el bateo y la necesidad de mantenimiento de la vía.
- Engrasado de pestañas y de vía, que permite reducir el ruido por fricción al paso por curvas cerradas. Los de vía solamente se emplean en situaciones puntuales ya que generan suciedad en la infraestructura y son difíciles de calibrar.



Figura 4.18. Engrasador de carril. Fuente: [77]

4.3.12 Actuaciones en el vehículo

Como se ha visto, las estrategias empleadas en vía, en el medio de propagación o en recepción pueden ser muy efectivas. Sin embargo, también puede darse el planteamiento de actuar sobre los diferentes elementos del vehículo, no teniendo que ser éste un método peor que los anteriores.

Cuando la línea central del Metro de Londres se inauguró en 1900, las locomotoras eléctricas que se emplearon no disponían de amortiguación alguna. A su paso, producían terribles vibraciones en la superestructura de vía que se transmitían hasta causar graves molestias a los vecinos. Después de investigarse el caso, se modificaron todas las locomotoras introduciendo dispositivos de suspensión y reduciendo lo máximo posible su peso (de 44 toneladas a 31). Posteriormente se pudo comprobar que las nuevas locomotoras inducían vibraciones de menos de un tercio de la amplitud que las anteriores. Por lo cual, la suspensión de las masas y la reducción de los pesos es una estrategia básica a la hora de diseñar un vehículo ferroviario.



Los trenes de hoy en día disponen de una configuración de las masas de un modo diferente a la de hace unas décadas. Antes, el motor se solía apoyar en los ejes de rodadura de los vagones, formando parte de las masas no suspendidas y generando mayores vibraciones en la vía. Actualmente, dichos motores son soportados por los bogies, formando así parte de las masas semi-suspendidas y reduciéndose significativamente las excitaciones dinámicas en la vía.

Los trenes de mercancías son, con diferencia los más pesados y por tanto, los que más problemas dan en cuanto a la generación de vibraciones. En algunos países se ha adoptado la estrategia de dotar a los bogies de una doble suspensión. Esto ha supuesto notable mejora de su comportamiento dinámico, se ha observado que el registro de vibraciones se ha reducido considerablemente. De no actuar de esta forma, las suspensiones al final acaban por desgastarse. Esto conlleva mayores gastos en mantenimiento del vehículo.

El mecanismo de generación de las fuerzas dinámicas también puede reducir el nivel de vibraciones ocasionado. La reducción de las masas no suspendidas es uno de los objetivos que siempre se ha perseguido. Conduce a la reducción notable de vibraciones originadas por el paso de la rueda por el carril con defectos de rugosidad.

Desde el punto de vista del mecanismo de generación del paso de la carga cuasi-estática, la distribución de los ejes en cada vagón afecta de un modo significativo a las frecuencias de las vibraciones de gran longitud de onda en el terreno. Estas distancias entre ejes pueden ser modificadas con el objetivo de evitar ciertas frecuencias no deseadas en el terreno.

Por lo tanto, la carga por eje, las propiedades de las masas no suspendidas, la frecuencia de las suspensiones y el espaciamiento entre ejes son todos los parámetros que pueden afectar a la vibración bajo diferentes circunstancias.

4.4 Conclusiones

En este capítulo se han explicado desde un punto de vista teórico los mecanismos de mitigación de frentes de ondas. Haciendo hincapié en la absorción y en la frecuencia de corte, esto nos permitirá desarrollar de una forma más eficiente la solución más idónea para resolver nuestro problema de las vibraciones.

Finalmente, lo que pretende este capítulo es sentar las bases del conocimiento existente hasta la fecha en mitigación de vibraciones de forma que en el estudio técnico-económico se desarrolle con el máximo nivel de conocimiento del fenómeno posible.





Capítulo 5. Estudio técnico-económico de **alternativas**

5.1 Introducción

En este capítulo, partimos de un estudio realizado por el departamento de Matemática Multidisciplinar de la Universidad Politécnica de Valencia en un tramo de vía convencional situado en Sant Cugat del Vallès. En él, se detectó a través de un modelo de elementos finitos, previamente calibrado y validado, vibraciones altas que podían afectar a los edificios cercanos a la línea. En el mismo estudio, aplicaron como medida de mitigación el uso de bloques anti-onda de hormigón con residuos de neumáticos.

Como queremos valorar si esta medida es la más eficiente, propondremos distintas alternativas de las cuales averiguaremos que poder de mitigación tiene cada una, corroborándolo con otros estudios en los cuales tengan unas características de la vía similares al anterior estudio mencionado.

Posteriormente realizaremos un estudio técnico-económico de esas alternativas que nos permita remarcar las características más relevantes de cada alternativa para tenerlo en cuenta a la hora de valorar cada alternativa. Una vez finalizado el estudio, hallaremos a través de un análisis multicriterio cuál es la solución más idónea para que las vibraciones no afecten a los edificios colindantes. Buscando al mismo tiempo la solución más económica y duradera para que la vía no tenga la necesidad de un mantenimiento continuo que pueda afectar a la circulación normal de la línea.

Por tanto, el objeto de este estudio técnico-económico será conseguir la solución más económica para que la vía tenga la mínima generación de vibraciones y no pierda eficiencia.

5.2 Estudio de las alternativas propuestas

En primer lugar, tomando medidas en el origen de las vibraciones o en el receptor (en nuestro caso, los edificios). Las alternativas que podríamos proponer serían o realizar una mejora de las suspensiones de los vehículos ferroviarios o añadir amortiguadores mecánicos a los edificios para poder aislarse de las vibraciones. Pero estas opciones quedarían descartadas desde el inicio, ya que son medidas que no están al alcance de nuestro TFG.

Entonces, solo nos queda actuar en la propia línea de ferrocarril. Donde nos podemos dividir en dos fases para poder buscar alternativas para reducir las vibraciones.

Por un lado, en la fase de transmisión, únicamente podríamos inducir cambios en los materiales constituyentes de la superestructura, por eso, hemos elegido dos opciones como alternativas más factibles que podríamos proponer:



1. Utilizar placas de asiento más elásticas bajo el patín

Según estudios realizados, usando placas de asiento con rigideces bajas pueden reducir las aceleraciones registradas de la capa de balasto, principalmente en dinámica transversal. De forma que las vibraciones generadas pueden llegar a ser inferiores a los límites que nos piden. Aunque, si fuera el caso, pueden no llegar a poder evitar la descompactación de la capa de balasto.

Por otro lado, usando placas de asiento con rigideces altas pueden producir mayor fatiga en el carril y sujeciones, provocando una menor disipación de la energía y, por tanto, un aumento de las aceleraciones registradas produciendo un empeoramiento de la situación, por eso, se descartaría esta opción.

En estudios realizados en [78] se han deducido unas reducciones de las vibraciones de un 50% para placas de asiento con rigidez próxima a los 100 Kn/mm, en [86] se reducen las tensiones entre un 20 y un 30%, las cuales consideraríamos que son proporcionales a las vibraciones. Por último, [87] realizó un cambio de placas de 90kN/mm por placas de 60 kN/mm y obtuvo unas reducciones de la amplitud de las ondas de hasta un 55%. Por tanto, podemos decir que la aplicación de esta alternativa podría reducir las vibraciones entre un 20 a un 50% aproximadamente.

2. Añadir suelas bajo la traviesa

Se emplean como sustituto del aumento del espesor de la capa de subbalasto. El uso de estas suelas bajo traviesa lleva a una prolongación significativa de la vida útil de la vía, ya que multiplica los intervalos entre trabajos de bateo por 2 o 2,5 veces [54]. Esto se debe, al aumento de la superficie efectiva de apoyo de las traviesa sobre el balasto que permite un mayor reparto de las fuerzas dinámicas inducidas por el paso de los trenes. Por otra parte, proporciona una disminución del 50% de la carga dinámica actuante en la traviesa, causando así una reducción de la frecuencia de resonancia de la vía y consiguiendo también una menor transmisión de las vibraciones al balasto (entre un 20-30%). Finalmente, puede ser una buena solución para vías con una rigidez variable, originando a la vía un comportamiento más homogéneo.

Según estudios realizados, [88] dice que con las suelas elásticas se consigue una reducción de la velocidad de crecimiento de los defectos entre el 25 y 30%. También según [89] en utilizando suelas en una vía tradicional se reduce cerca de un 50% de las velocidades de las vibraciones para la frecuencia de 63 Hz.

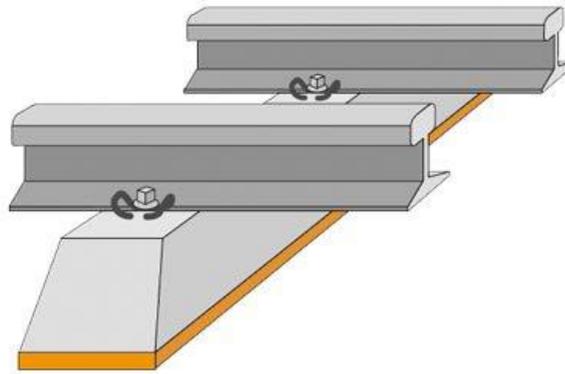


Figura 5.1. Ejemplo de suela bajo traviesa. Fuente: [81]

Por otro lado, en la fase de propagación, únicamente podríamos inducir cambios en el terreno adyacente a la superestructura, por eso, hemos elegido también dos opciones como alternativas más factibles que podríamos proponer:

1. Construcción de una zanja vacía de aislamiento activo

Como ya hemos comentado en el apartado 4.3.7, las zanjas pueden ser una alternativa bastante factible, ya que puede ser adoptada sin tener que interrumpir el tránsito de los trenes en la vía.

De los dos tipos de zanjas de aislamiento, hemos elegido la de aislamiento activo, porque son más efectivas y porque excavar una zanja en una vía pública puede ser peligroso para las personas. Ya que puede provocar accidentes de caída a distinto nivel o propiciar a tener zonas inaccesibles. Un problema de esta tipología de zanja es que está limitada a poca profundidad por razones de estabilidad.

En este caso hay pocos estudios realizados, pero en [90] mostraron que dependiendo de la profundidad de la zanja se puede reducir hasta un 80% las vibraciones observadas en edificios cercanos.

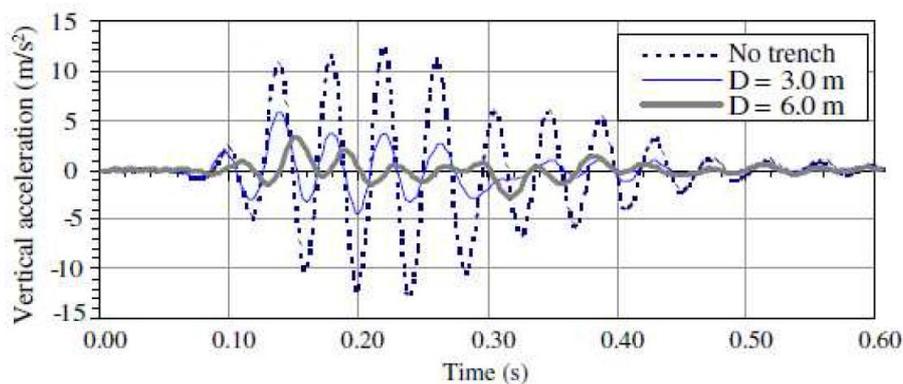


Figura 5.2. Reducción de la aceleración vertical en un punto del edificio, para tres casos diferentes: sin zanja, con zanja hasta los 3 y 6 metros de profundidad. Fuente: [90]



2. Contrucción de bloques anti-onda (Wave-Impeding Blocks “WIBS”)

Resulta ser una medida de mitigación que tiene la ventaja, igual que la zanja, de que no es necesaria ninguna intervención en la vía y se lleva a cabo suficientemente cerca de la vía. Como alternativa es más cara que la zanja, pero no necesita prácticamente ningún mantenimiento. Cosa que la zanja lo necesita bastante debido a inundaciones por lluvia, desprendimiento de paredes, etc. Como hemos visto anteriormente, esta estrategia es únicamente significativa para reducir vibraciones de baja frecuencia. Y resulta más útil para evitar la propagación de ondas en el terreno adyacente.

Según el estudio realizado por el departamento de Matemática Multidisciplinar de la Universidad politécnica de Valencia el uso de bloques anti-onda de hormigones NFU reduce las vibraciones en los edificios cercanos hasta un 70%.

Finalmente, descartando las alternativas que son incapacitadas para poder mitigar las vibraciones, las medidas de mitigación propuestas serán las siguientes:

1. Alternativa 1: Utilizar placas de asiento bajo el patín.
2. Alternativa 2: Añadir suelas bajo la traviesa.
3. Alternativa 3: Construcción de una zanja activa.
4. Alternativa 4: Bloques anti-onda (Wave-Impeding Blocks “WIBS”).

5.3 Valoración de las medidas de mitigación propuestas

Una vez finalizado el análisis de la influencia de cada una de las soluciones propuestas para la reducción de vibraciones, se evalúan desde un punto de vista constructivo y económico cuál de ellas es la más idónea.

Para ello, en el paso siguiente se exponen las repercusiones que tendría cada una de las alternativas propuestas desde dos puntos de vista. El primero, la valoración de su afeción al servicio y el segundo, la repercusión económica que conllevaría su adopción.

Antes de empezar, remarcaremos que los precios unitarios son sustraídos de la “*Base de precios tipo para los proyectos de mantenimiento de vía*” facilitados por Adif y los precios unitarios del “*PREOC*”. Con ellos sacaremos el coste estimado de la obra completa de cada alternativa, teniendo en cuenta solo los costes más significativos de las obras.



Alternativa 0: Dejar la vía como se encuentra en la actualidad.

En primer lugar, como en todo estudio de soluciones, la primera alternativa a estudiar debe ser la que no se ejecuta ninguna actuación sobre el problema detectado. En este caso, no se podrá evitar la aparición del exceso de vibraciones en edificios colindantes a la vía. Esto provocará una reacción muy negativa frente a la seguridad de los edificios porque no suscita estabilidad. De forma que desencadenaría un conjunto de problemas, principalmente, sobreesfuerzos en la estructura.

También, aparte de que valorar cuantitativamente los costes económicos que conllevaría esta alternativa es bastante complejo, debemos tener en cuenta que un derrumbamiento o accidente en el edificio tiene grandes repercusiones debidas al posible derrumbe o inhabilitación del edificio, a abundantes pérdidas económicas e incluso a posibles pérdidas de vidas humanas.

Alternativa 1: Utilizar placas de asiento bajo el patín

En segundo lugar, de acuerdo con el análisis en el apartado anterior, se optará por sustituir las placas de asiento actuales, por otras más flexibles.

La sustitución de las placas de asiento presenta un procedimiento constructivo sencillo con unos costes económicos relativamente bajos. Además, la rapidez de la operación permite que ésta se realice en horario nocturno con la mínima afección al servicio.



Figura 5.3. Sistema de fijación con clip de ferrocarril. Fuente: [85]



Usaremos esta alternativa para explicar, de una manera orientativa, el proceso de construcción de la vía. Que será prácticamente el mismo en la siguiente, exceptuando alguna fase puntual que dependerán de la alternativa a construir.

Hay que tener en cuenta antes de describir el proceso constructivo, que la sucesión de fases que voy a ir exponiendo no es una sucesión estricta, sino que muchas de ellas pueden ir en paralelo con otras. La razón es porque en toda obra hay tareas que depende de otras y no permiten avanzar nada hasta que las primeras no terminen. Pero hay otras que son independientes y pueden realizarse en paralelo a otras. No incluimos en ningún momento, el diagrama de Gantt en el que se recalca en cada momento que fase está actuando, debido a que no es el alcance de nuestro TFG.

Por lo tanto, de forma general, el proceso constructivo quedaría del siguiente modo:

Fase 0: Programación de desvíos

Antes de empezar cualquier obra, si se requiere, se debe programar la desviación del tráfico por otro itinerario o si resulta necesario implantar un método de transporte alternativo, por ejemplo, autobuses. En nuestro caso, al tener dos carriles de circulación y tener cercano una estación, procederemos a realizar un itinerario que permitirá mantener la circulación de los trenes en ambos sentidos por un carril mientras en el otro se procederá a realizar las obras. Y si en algunos casos, necesitamos cortar ambos carriles, procederemos a realizar los trabajos en horarios nocturnos. Así intentaremos entorpecer lo más mínimo la circulación de los trenes tanto de mercancías como de pasajeros.

Fase 1: Establecimiento de un perímetro de seguridad y corte de catenaria.

Tras haber establecido el programa de desvíos, se procede a cortar el servicio del tramo a obrar. Seguidamente, se implantará un perímetro de seguridad y se cortará del servicio la catenaria. En los horarios de circulación de trenes, en cada extremo del tramo de trabajo habrá dos operarios encargados de avisar con suficiente antelación a los demás en caso de la aproximación de un tren, para evitar posibles atropellos a operarios. Esto siempre será así en todas las fases cuando haya la posibilidad de que circule algún tren por el carril paralelo al de las obras. Finalmente, subidos a un ferrocamión con el fin de evitar contactos indeseados, operarios especializados en trabajos de catenaria procederán a realizar el corte de la misma. Este trabajo solo requerirá de un equipo humano, gracias a su rapidez para efectuar el corte.

Fase 2: Corte de los carriles con soplete y radial mediante medios humanos.

Una vez realizado el corte de la tensión, se realiza el corte de los carriles y la retirada de las sujeciones mediante medios manuales. Para ello, solo hará falta un equipo humano para este trabajo, ya que los cortes a realizar serán pocos debido a que se pueden hacer cada muchos metros, por ejemplo, cada 100 metros, lo que dará un número de 20 cortes por carril.



Figura 5.4. Radial de corte. Fuente: [80]

Fase 3: Aflojado de sujeciones e izado del carril

Con dos equipos humanos se realizará el aflojado mediante medios mecánicos y el izado mediante una máquina elevadora.

Fase 4: Sustitución de las placas de asiento

Nuevamente, con los mismos equipos humanos de la fase anterior, realizaremos la colocación con medios mecánicos de las nuevas placas. Dado que el tramo suponemos que presenta una longitud de 1000 metros con traviesas equiespaciadas cada 60 centímetros, será necesario por cada traviesa dos placas de asiento. Haciendo un total de 1668 unidades de placas de asiento.

Fase 5: Colocación del carril y apriete de sujeciones

Con la misma maquinaria que hemos utilizado para izar los carriles, los utilizaríamos en esta fase.



Figura 5.5. Ejemplo de colocación del carril. Fuente: Anónimo

Fase 6: Reposición de la catenaria y puesta en servicio de la vía

Finalmente, el resumen de nuestra valoración económica sería la siguiente:

Tiempo estimado de obra: 120 horas

Coste estimado:

- Materiales: 1,41€/ud → 2351,88€ (1668 ud)
- Maquinaria y mano de obra:
 - Desmontaje de catenaria: 5,22 €/m → 5220€ (1000m)
 - Ferrocamión: 40.82€/h → 571,48€ (14 horas)
 - Soldadura aluminotérmica: 22,98€/ud → 459,6€ (20 soldaduras)
 - Máquina bateadora/perfiladora: 475€/h → 1900€ (4 hora)
 - Alineación de la vía: 11,88 €/m → 1188€ (1000m)
 - Montaje de catenaria: 5,22 €/m → 5220€ (1000m)
- TOTAL: 16910,96€



Alternativa 2: Añadir suelas bajo la traviesa

Las suelas bajo traviesa gracias al sistema de unión optimizado, la instalación de las suelas bajo traviesa tiene lugar ya durante el montaje de las traviesas. Por tanto, no es necesaria ninguna tarea adicional durante la fase de construcción. Por lo que sería prácticamente el mismo proceso de construcción que el que se realiza en la alternativa 1. La instalación será rápida, no dependerá de las condiciones climáticas y provocará las mínimas interrupciones en el tramo.

Fase 0: Programación de desvíos

Fase 1: Establecimiento de un perímetro de seguridad y corte de catenaria.

Fase 2: Corte de los carriles con soplete y radial mediante medios humanos.

Fase 3: Acopio parcial del balasto en los laterales de la vía

Al mismo tiempo, al tener una buena separación respecto a los operarios de corte de carriles, se puede ejecutar simultáneamente el acopio parcial del balasto ubicado en las hombreras de la vía pero sin que la vía pierda su soporte vertical, para conseguir agilizar la obra. El desarrollo de estos trabajos se puede realizar con una retroexcavadora convencional y dos equipos de trabajo en paralelo para conseguir acortar plazos.

Fase 4: Ripado de la vía

Una vez se quedan las traviesas al descubierto, una maquina dotada de grapas procederá al ripado de la vía, desplazándola lateralmente de su posición inicial.



Figura 5.6. Ripado de las vías. Fuente: [82]

Fase 5: Izado del carril, aflojado de sujeciones y transporte a vertedero de las traviesas actuales

Mediante un camión grúa procedemos a la carga de las antiguas traviesas a camiones. Donde son transportadas al vertedero más cercano. Esto implica un coste temporal bastante largo debido al previo acopio de traviesas, ya que la grúa tiene poca capacidad para poder coger varias traviesas a la vez.

Fase 6: Puesta de la primera capa de balasto y emplazamiento de las nuevas traviesas

Una vez vacío el nuevo carril, procedemos a disponemos mediante medios mecánicos la primera capa de balasto que será en la que se apoyen las nuevas traviesas. Una vez dispuestas, emplazaremos con el mismo camión grúa las nuevas traviesas transportadas anteriormente en un tren de carga en horario nocturno y acomodadas en un lateral del carril.

Fase 7: Colocación del carril y apriete de sujeciones

Fase 8: Soldado de los carriles mediante soldadura aluminotérmica, nivelación con medios manuales y neutralización de la vía.



Figura 5.7. Ejemplo de soldadura aluminotérmica. Fuente: [83]

Acabado la colocación del carril, un equipo de operarios efectuará una soldadura aluminotérmica por cada corte realizado anteriormente para conseguir recuperar la continuidad que tenía el carril al inicio de las obras y, posteriormente, proceder a la nivelación del mismo mediante medios manuales en caso de que se requiriera. Este proceso es rápido de efectuar (menor de 10 minutos por soldadura), por lo que no es necesario realizarlo con más de un equipo.



Teniendo en cuenta la neutralización de la vía, la cual tiene por objeto dejar en el carril un estado tensional correspondiente a la temperatura de neutralización de la zona (o temperatura media anual para la cual el carril no tendría alargamientos ni retracción debidas a la temperatura). Se procederá a realizarse inmediatamente después de la primera nivelación y soldadura, partiendo de una temperatura inferior a la de neutralización.

Fase 9: Reposición de balasto

Seguidamente, incluimos el resto de balasto necesario para dar la geometría inicial a la capa de balasto. Los equipos de trabajo son los mismos que hemos utilizado antes para el proceso inverso.

Fase 10: Bateo de la vía, segunda nivelación y perfilado de los carriles mediante perfiladora

Una vez terminado todos los trabajos de la vía, se realizará mediante una máquina el proceso de bateo de la vía, nivelación final y perfilado. De forma, que quede preparada para su reapertura. Para ello, utilizaremos el modelo de máquina PLASSER BEAVER 79/800, que permite realizar todos los trabajos con la misma máquina, sin tener que realizar para cada actividad una máquina distinta.

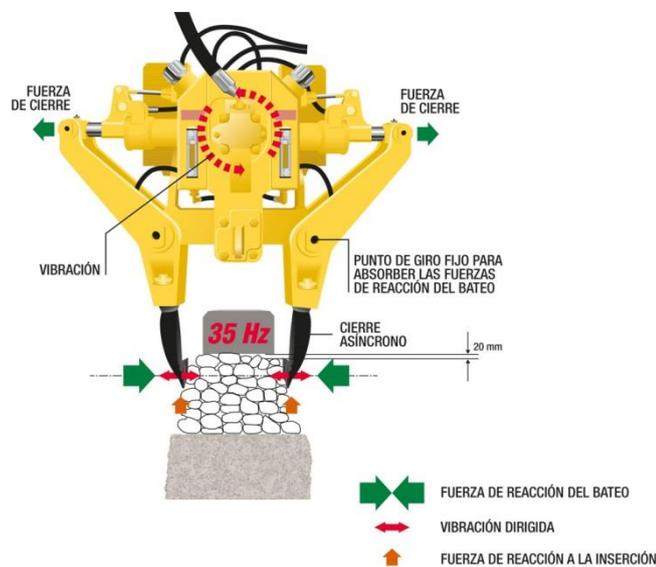


Figura 5.8. Explicación de la forma de bateo. Fuente: [84]

Fase 11: Reposición de la catenaria y puesta en servicio de la vía

Finalmente, como último paso será la reposición de la catenaria y puesta en servicio del nuevo carril con los mismos equipos utilizados en la fase 1.



Tiempo estimado de obra: 150 horas

Coste estimado:

- Materiales: 91,05€/ud → 75935,7€ (834 ud)
- Maquinaria y mano de obra:
 - Desmontaje de catenaria: 5,22 €/m → 5220€ (1000m)
 - Unidad de obra "Ripado de vía": 9,27€/m → 9270€ (1000 metros)
 - Ferrocamión: 40.82€/h → 571,48€ (14 horas)
 - Camión grúa: 40.82€/h → 4082€ (100h)
 - Soldadura aluminotérmica: 22,98€/ud → 459.6€ (20 soldaduras)
 - Máquina bateadora/perfiladora: 475€/h → 1900€ (4 hora)
 - Alineación de la vía: 11,88 €/m → 1188€ (1000m)
 - Montaje de catenaria: 5,22 €/m → 5220€ (1000m)
- TOTAL: 103846,78€

Alternativa 3: Construcción de una zanja activa

Antes que nada tendremos en cuenta que los trabajos a realizar se hacen cercanos a las vías de ferrocarril (dentro de la línea), pero con la ventaja inicial de que no estorbamos al funcionamiento normal del medio de transporte. Ya que los trabajos los realizaremos a una distancia de 3 metros de la vía. Esta ventaja será la misma, tanto en esta alternativa como en la siguiente y su proceso de construcción va a ser idéntico inicialmente en ambas.

Por tanto, el proceso constructivo será el siguiente:

Fase 0: Despeje y desbroce del terreno con medios mecánicos

Se realizará con una retroexcavadora con una profundidad media de 10cm, eliminando árboles y cotones en su caso y transportándolo al vertedero más cercano mediante camiones.

Fase 1: Excavación en zanja del terreno, carga y transporte del material extraído a acopio para posterior utilización, en zona prevista de obra.

Una vez finalizada la primera fase, excavaremos una zanja de profundidad máxima de 1,5m con unos taludes que tendrán un ángulo de 60 grados para dar estabilidad al talud y una separación entre paredes de 1m. Ya que las paredes de la zanja estarán hechas de terreno natural. Todo esto lo realizaremos mediante una retroexcavadora y 4 camiones.

Fase 2: Colocación de hormigón de limpieza en la base de la zanja.

Dispondremos de una capa de hormigón de limpieza de 10cm en la base de la zanja mediante el vertido de un camión cuba.

Finalmente, teniendo en cuenta el proceso constructivo, iniciamos el resumen de nuestra valoración económica:

Tiempo estimado de obra: 180 horas

Coste estimado:

- Materiales:
 - Hormigón HM-15: 62,22€/m³ (HM-15) → 6222€ (1000*1*0.1= 100m³)
- Maquinaria y mano de obra:
 - Retroexcavadora mixta sobre neumáticos: 20,25 €/h → 2025€ (100h)
 - Camiones cuba: 22,25€/h → 667,5€ (30h)
 - Camiones basculantes: 26,00€/h → 2080€ (20*4=80h)
- TOTAL: 10994,5€

Alternativa 4: Bloques anti-onda (Wave-Impeding Blocks “WIBS”)

Fase 0: Despeje y desbroce del terreno con medios mecánicos

Se realizará con una profundidad media de 10cm, eliminando árboles y cotones en su caso y transportándolo al vertedero más cercano mediante camiones.

Fase 1: Excavación en zanja del terreno, carga y transporte del material extraído a acopio para posterior utilización, en zona prevista de obra.

Excavaremos una zanja de profundidad máxima de 2m con unos taludes que tendrán un ángulo de 45 grados para mantener las paredes estables y una separación entre paredes de 1m. Más tarde, una vez hechas los bloques anti-onda, serán rellenadas con la tierra excavada.

Fase 2: Colocación de hormigón de limpieza en la base de la zanja.

Dispondremos de una capa de hormigón de limpieza de 10cm en la base de la zanja mediante el vertido de un camión cuba.

Fase 3: Colocación de protecciones perimetrales para evitar posibles caídas a distinto nivel

Fase 4: Colocación de encofrado de madera para los bloques anti-onda

Posicionaremos en paramentos verticales los encofrados de madera mediante un camión grúa y un equipo humano.

Fase 5: Vertido del hormigón NFU y compactación

Una vez encofrado, verteremos el hormigón NFU transportado en camiones cuba desde el lugar de fabricación.

Fase 6: Limpieza de la zona y recubrimiento de la parte superior del bloque anti-onda, mediante medios mecánicos, con el material previamente acopiado en la fase 1.



Finalmente, el resumen de nuestra valoración económica sería la siguiente:

Tiempo estimado de obra: 220 horas

Coste estimado:

- Materiales:
 - Hormigón HM-15: 62,22€/m³ (HM-15) → 1866,6€ (1000*0,3*0,1= 30m³)
 - Hormigón NFU: 85,01 €/m³ (suponemos que el precio del hormigón NFU es igual al hormigón HA-30/B/20/IIb) → 38254,5€ (1000*1,5*0,3= 450m³)
 - Encofrados 14,52 €/m² → 43560€ (1000*1,5*2= 3000m²)
- Maquinaria y mano de obra:
 - Retroexcavadora mixta sobre neumáticos: 20,25 €/h → 2025€ (100h)
 - Camiones cuba: 22,25€/h → 1780€ (80h)
 - Camiones basculantes: 26,00€/h → 1300€ (10*4=40h)
- TOTAL: 88786,1€

5.4 Valoración multicriterio de la solución óptima

Finalizado el estudio de alternativas y la valoración del coste de implantación de cada uno, vamos a proceder a valorar otros parámetros que también son importantes para poder decidirnos cuál es la mejor solución.

Al no ser parámetros que se puedan medir cuantitativamente porque son cualitativos, hemos decidido utilizar una herramienta muy útil para este tipo de valoraciones, ya que nos da unas conclusiones de lectura fácil e inmediatas. Esta herramienta es el modelo de análisis multicriterio. Hay muchos tipos de análisis multicriterio, pero nosotros nos hemos decantado por hacerlo con el método que fue desarrollado en su día por el profesor Gómez- Senent, el método PRESS [79].

Método PRESS:

Este método trata de determinar la alternativa más favorable desde el punto del análisis comparado con el resto de las alternativas posibles. Para ello, establece las relaciones entre alternativas para todos y cada uno de los criterios establecidos para el estudio de soluciones. De esta manera el método promulga la elección óptima en aquella alternativa que es mejor que las demás en el mayor número posible de criterios y es la que tiene menores debilidades frente a las restantes.

El enfoque conceptual es realmente sencillo y su desarrollo metodológico sigue los siguientes pasos:

- Establecimiento de criterios y pesos específicos: c_j y p_j .
- Valoración de criterios para cada una de las alternativas: x_{ij} .

- Determinación de la matriz de valoración dada por la expresión:

$$Q(i, j) = \frac{x_{ij}}{x_{j\max}} \cdot p_j$$

Siendo x_{ij} el valor obtenido por la alternativa x_i para el criterio c_j y $x_{j\max}$ el valor máximo de puntuación para el mismo criterio.

- Determinación de la matriz de dominación (como ya se ha apuntado el método pivota sobre las importancias, medidas en ventajas o desventajas relativas entre las distintas alternativas para cada uno de los criterios). Estos valores vienen dados por la suma de las diferencias de los valores para cada criterio y alternativas. La matriz responde a la siguiente expresión:

$$T(i, j) = \sum_{k=1}^n [Q(i, k) - Q(j, k)]$$

Siendo siempre $Q(i, k) > Q(j, k)$ evitando diferencias negativas.

Se obtienen los valores D_i como suma de las filas de la matriz de dominación (determina la prelación de la alternativa i respecto del resto), y d_i como suma de las columnas correspondientes (determina la ventajas del resto de las alternativas respecto a la alternativa estudiada).

- El método concluye en la determinación, para todas las alternativas, de la relación entre D_i y d_i siendo la solución óptima el valor

$$\text{Max} \left[\frac{D_i}{d_i} \right]_{i=1}^{i=n}$$

Este valor, presentado de forma ordenada, facilita la posición final de cada una de las alternativas estudiadas siendo la primera de ellas la que se puede considerar óptima a la vista de todos los criterios y pesos incluidos a lo largo del proceso de toma de decisión.

Aplicación del método PRESS

Una vez finalizada la explicación del método, procedemos a su aplicación:

Primero, estableceremos los criterios y sus pesos específicos:

- **Afección al servicio:** En este criterio se valora que la alternativa que vayamos a desarrollar pueda afectar al tráfico ferroviario durante la obra y, también posterior a



su finalización, es decir, durante su vida útil. Ya que todo posible corte de servicio es una pérdida económica porque inhabilita tanto el transporte de viajeros que provoca un impacto que puede ocasionar, entre otras cosas, que los usuarios que utilizan este medio de transporte opten por usar otro. Cosa que puede ocurrir lo mismo, pero a mayor escala, en el caso de los trenes de mercancías. Por esta razón el peso adoptado será de 0,2 sobre 1.

- **Coste global estimado:** En este criterio se valora el precio que cuesta realizar la alternativa. No hay que buscar siempre la alternativa más barata, pero si la que provoque una mejor relación calidad-precio, para así no derrochar un gasto muy grande para que tenga un eficacia baja. Por esta razón el peso adoptado será de 0,2 sobre 1.
- **Posibilidad de mantenimiento:** En este criterio se valora que la alternativa tenga el mínimo mantenimiento posible con la menor frecuencia posible, ya que cualquier mantenimiento puede ser un incremento del precio inicial o un corte temporal del servicio. Por tanto, el peso adoptado será de 0,25 sobre 1.
- **Mitigación de vibraciones:** Este criterio es el más importante de todos, ya que valora cual es la alternativa más eficaz para eliminar la problemática existente. El cuál es el objetivo principal de este trabajo. Por esta razón, el peso de este criterio será el más alto, con un valor de 0,3 sobre 1.
- **Impacto de la obra sobre el medio ambiente:** En toda obra hay que valorar su impacto ambiental y, en nuestro análisis multicriterio se tiene que tener en cuenta. Por tanto, al no ser uno de los objetivos principales, pero si importantes. El peso de este criterio será de 0,05 sobre 1.

Finalizado la definición de los criterios y los pesos, vamos ahora a definir la valoración de criterios para cada una de las alternativas. Por tanto, se establece los siguientes cálculos:

- **Afección al servicio:** En este criterio estableceremos dos puntuaciones. La primera de valor 0, será cuando la alternativa afecta al servicio durante la obra o en cualquier momento después de realizarla. Y la segunda de valor 1, que será cuando la alternativa no afecta en ningún momento para que se pueda realizar el servicio sin problemas.
- **Coste global estimado:** Se valorará subjetivamente entre 0 y 1 con escalones de 0,1 en 0,1. Siendo 0 el valor en el cual propicia un mayor coste y 1 el menor.
- **Posibilidad de mantenimiento:** Se estimará con un criterio parecido al anterior, pero con una escala de 0,2 en 0,2 empezando en 0 y acabando en 1. Siendo 0 la posibilidad de mantenimiento más alta y 1 la más baja.

- **Mitigación de vibraciones:** Al ser el criterio más importante, se puntuará de una manera más precisa. Por tanto, valoraremos con intervalos de 0,1 en 0,1 hasta 0,7 y, una vez llegado a este valor, seguiremos valorando desde 0,7 hasta 1 con intervalos de 0,05.
- **Impacto de la obra sobre el medio ambiente:** Este último criterio le estableceremos valores de 0,2 en 0,2 hasta 1. De forma que se divida entre los siguientes estados de impacto: muy leve (0,8), leve (0,6), moderado (0,4), grave (0,2), muy grave (0).

Por lo tanto, una vez propuestos los criterios, los pesos y los cálculos, vamos a crear una matriz resumen como base de inicio para crear las demás matrices (la matriz de valoración y la matriz de dominación), donde se muestran los resultados obtenidos en cada alternativa.

| | CRITERIO | | | | |
|---------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|--|
| | Mitigación de vibraciones (%) | Afección al servicio (h) | Coste Global estimado (€) | Posibilidad de mantenimiento (%) | Impacto de la obra sobre el medio ambiente |
| ALTERNATIVA 0 | 0 | 12-100 | 155000 | 100 | GRAVE |
| ALTERNATIVA 1 | 20 | 120 | 16910,96 | 60 | MUY LEVE |
| ALTERNATIVA 2 | 40 | 150 | 103846,78 | 60 | MUY LEVE |
| ALTERNATIVA 3 | 50 | 180 | 10994,5 | 80 | GRAVE |
| ALTERNATIVA 4 | 70 | 220 | 88786,1 | NO | LEVE |

Tabla 5.1. Resumen de los resultados obtenidos en cada alternativa. Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, teniendo en cuenta la tabla resumen estableceremos las calificaciones acorde a los criterios establecidos obteniendo la siguiente matriz de calificaciones:

| | CRITERIO | | | | |
|---------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|--|
| | Mitigación de vibraciones (%) | Afección al servicio (h) | Coste Global estimado (€) | Posibilidad de mantenimiento (%) | Impacto de la obra sobre el medio ambiente |
| PESO | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,25 | 0,05 |
| ALTERNATIVA 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,2 |
| ALTERNATIVA 1 | 0,2 | 0 | 0,8 | 0,4 | 1 |
| ALTERNATIVA 2 | 0,4 | 0 | 0,2 | 0,4 | 1 |
| ALTERNATIVA 3 | 0,5 | 1 | 0,9 | 0,2 | 0,2 |
| ALTERNATIVA 4 | 0,7 | 1 | 0,4 | 1 | 0,8 |

Tabla 5.2. Matriz de calificaciones. Fuente: Elaboración propia

A partir de la tabla anterior, hallaremos los valores ponderados de cada calificación obtendremos la matriz de valoración:

| | CRITERIO | | | | |
|---------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|--|
| | Mitigación de vibraciones (%) | Afección al servicio (h) | Coste Global estimado (€) | Posibilidad de mantenimiento (%) | Impacto de la obra sobre el medio ambiente |
| ALTERNATIVA 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01 |
| ALTERNATIVA 1 | 0,06 | 0 | 0,16 | 0,1 | 0,05 |
| ALTERNATIVA 2 | 0,12 | 0 | 0,04 | 0,1 | 0,05 |
| ALTERNATIVA 3 | 0,15 | 0,2 | 0,18 | 0,05 | 0,01 |
| ALTERNATIVA 4 | 0,21 | 0,2 | 0,08 | 0,25 | 0,04 |

Tabla 5.3. Matriz de valoración. Fuente: Elaboración propia

Para acabar, realizando el cálculo del sumatorio de las diferencias positivas entre las alternativas comparadas se obtiene la siguiente matriz de dominación:

| | CRITERIO | | | | | D _i |
|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| | ALTERNATIVA 0 | ALTERNATIVA 1 | ALTERNATIVA 2 | ALTERNATIVA 3 | ALTERNATIVA 4 | |
| ALTERNATIVA 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ALTERNATIVA 1 | 0,36 | 0 | 0,12 | 0,09 | 0,09 | 0,66 |
| ALTERNATIVA 2 | 0,3 | 0,06 | 0 | 0,09 | 0,01 | 0,46 |
| ALTERNATIVA 3 | 0,58 | 0,26 | 0,37 | 0 | 0,1 | 1,31 |
| ALTERNATIVA 4 | 0,77 | 0,5 | 0,48 | 0,29 | 0 | 2,04 |
| d _i | 2,01 | 0,82 | 0,97 | 0,47 | 0,2 | |

Tabla 5.4. Matriz de dominación. Fuente: Elaboración propia

Y finalmente, el método concluirá en la determinación de la relación entre D_i y d_i siendo la solución óptima el valor más alto.

| | ÍNDICE PRESS |
|----------------------|--------------|
| ALTERNATIVA 0 | 0 |
| ALTERNATIVA 1 | 0,80 |
| ALTERNATIVA 2 | 0,47 |
| ALTERNATIVA 3 | 2,79 |
| ALTERNATIVA 4 | 10,2 |

Tabla 5.5. Índices PRESS de todas las alternativas. Fuente: Elaboración propia

Con los resultados obtenidos podemos observar que la alternativa de los bloques anti-onda con hormigón NFU es con diferencia la opción más idónea.



5.5 Conclusiones

Una vez alcanzado este apartado, vamos a sintetizar las conclusiones que hemos ido sacando a lo largo de todo el trabajo.

En primera estancia, como hemos podido observar en el segundo capítulo, tenemos que tener en cuenta las frecuencias intermedias, ya que serán las que más efectos negativos van a causar en las infraestructuras cercanas debido a los fenómenos de resonancia entre rueda y carril, al paso de las traviesas y los defectos de rueda como planos y ruedas ovaladas.

Por otro lado, en el tercer capítulo, hemos concluido que los hormigones NFU son especialmente útiles en edificaciones para usarlos como base aislante para estructuras. Gracias a que presentan una rotura dúctil, una gran capacidad de absorción de energía plástica y además, una buena capacidad para resistir mayores deformaciones. Por tanto, lo hace beneficioso para absorber vibraciones que puedan afectar a edificios a través de sus cimentaciones, pudiendo soportar vibraciones debidas a movimientos sísmicos o a vibraciones causadas por grandes cargas de tráfico pesado.

Seguidamente, en el cuarto capítulo hemos expuesto y valorado los distintos mecanismos de mitigación más comunes que existen hoy en día para reducir las vibraciones que son causadas por el tráfico ferroviario. Teniendo como finalidad una base teórica de ellos para poder elegir los mecanismos que más nos convenían para la construcción del estudio de alternativas.

En este último capítulo, hemos desarrollado un estudio técnico-económico de alternativas en las que hemos tenido en cuenta los siguientes criterios para obtener la mejor solución a nuestro problema:

- La afección al servicio, porque todo corte de línea provoca siempre malestar entre los viajeros debido a que obstaculiza su uso normal ocasionándoles retrasos y, en ocasiones, les obliga a usar otros medios de transporte alternativos. Al mismo tiempo, también afecta al transporte de mercancías, por lo que provoca importantes impactos económicos en ambas partes. En nuestra solución, hemos conseguido evitar completamente este problema, ya que las obras no se realizan en la propia estructura.
- El coste global estimado: Se busca siempre la alternativa con la mejor relación calidad-precio. En nuestro caso, pese a que nuestra solución tiene un coste inicial alto, gracias a su calidad tiene una gran durabilidad, lo que hace que no halla que realizar ninguna acción de mejora.
- La posibilidad de mantenimiento: El menor tiempo de mantenimiento en la vía es una gran ventaja tanto económicamente como logísticamente, porque no afecta al transporte ferroviario y tampoco se realiza ningún gasto de mantenimiento. Como ya hemos dicho anteriormente, nuestra solución ofrece una gran durabilidad y al estar separado de la estructura, cumple con creces las condiciones necesarias para evitar cualquier afección en la vía.



- La mitigación de vibraciones: Este criterio es el más importante de todos, ya que valora cual es la alternativa más eficaz para eliminar la problemática existente y como hemos visto en apartados anteriores, nuestra solución tiene una gran eficiencia para mitigar las vibraciones que llegan a los edificios causadas por el tráfico ferroviario.
- El impacto de la obra sobre el medio ambiente: En toda obra hay que valorar su impacto ambiental y, en nuestro caso, no ofrece ningún impacto preocupante. Ya que los bloques son enterrados por tierra natural de la zona, sin causar ningún cambio significativo en el paisaje.

Finalmente, para dar mayor solidez a nuestros estudios realizados desarrollamos un análisis multicriterio en el que corrobora que el uso de los bloques anti-onda es la mejor solución frente a las otras con los criterios que hemos optado. Por tanto, podemos concluir que el uso de bloques anti-onda de hormigón NFU es la mejor alternativa para solucionar nuestro problema de vibraciones.



**ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN DE BLOQUES DE HORMIGÓN CON RESIDUOS DE NEUMÁTICOS
COMO ELEMENTOS ANTI-ONDA EN VÍAS FERROVIARIAS. EVALUACIÓN TÉCNICO
ECONÓMICA. APLICACIÓN A LA RED DE FERROCARRILS DE LA GENERALITAT DE CATALUÑA.**

Fdo. Daniel Gallén Broch

Autor del trabajo

Valencia, Junio 2016





ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| <i>Figura 2.1. Espectro Simulación de frecuencia y de velocidad debidas a la carga cuasi-estática, a la onda de avance y a las irregularidades rueda-carril. Fuente: [2].</i> | 15 |
| <i>Figura 2.2. Defectos debido al desgaste de la superficie del carril: (a) Hundimiento de junta de vía; (b) Patinaje aislado. Fuente: [3].</i> | 17 |
| <i>Figura 2.3. Defectos debido a la fatiga de contacto de rodadura: (a) Exfolaciones; (b) Squats. Fuente: [3].</i> | 17 |
| <i>Figura 2.4. Desgaste (a) ondulatorio de una rueda sobre el área de rodadura de un carril (b). Fuente: [4].</i> | 19 |
| <i>Figura 2.5. Características geométricas del desgaste ondulatorio. Fuente: [4].</i> | 19 |
| <i>Figura 2.6. Características Diferentes tipos de placa de asiento. (a) placa de asiento convencional. (b) placa de asiento reforzada con lámina de acero. Fuentes: (a) [5] (b) [6].</i> | 21 |
| <i>Figura 2.7. Ilustración del efecto de la rigidez de la placa de asiento en relación con el acoplamiento del movimiento del carril y las traviesas y el amortiguamiento de las ondas propagadas por el carril. Fuente: D. Thompson (2009) y aportación propia.</i> | 23 |
| <i>Figura 2.8. Diferencias entre las ondas primarias, ondas secundarias y ondas de Rayleigh. Fuente: [8].</i> | 26 |
| <i>Figura 2.9. Desplazamiento instantáneo de las partículas debido a la propagación de las Ondas de Rayleigh. Fuente: [1].</i> | 26 |
| <i>Figura 2.10. Desplazamiento instantáneo de las partículas de un terreno estratificado para el movimiento correspondiente a la propagación de las ondas del primer modo de vibración; círculos grises, partículas del primer estrato; cuadrados verdes, partículas del estrato inferior. Fuente: [1].</i> | 27 |
| <i>Figura 2.11. Rangos de frecuencias de excitación. Fuente: [9].</i> | 30 |
| <i>Figura 3.1. Esquema de gestión de los NFU. Fuente: [11].</i> | 35 |
| <i>Figura 3.2. Coeficiente de amortiguamiento para distintos porcentajes de NFU para un hormigón de 8 semanas. Fuente: [21].</i> | 40 |
| <i>Figura 3.3. Coeficiente de amortiguamiento para distintos porcentajes de NFU para hormigones de 8 y 24 semanas. Fuente: [21].</i> | 41 |
| <i>Figura 3.4. Evolución del coeficiente de amortiguamiento en función del porcentaje de sustitución de áridos. Fuente: [22].</i> | 41 |
| <i>Figura 3.5. Curvas típicas carga-abertura de fisura, para matrices con y sin fibras. Fuente [29]</i> | 43 |
| <i>Figura 3.6. Distintas Fibras de polipropileno existentes. Fuente: [35].</i> | 45 |
| <i>Figura 3.7. Pavimento de puerto realizado con hormigón reforzado con fibras. Fuente: [38].</i> | 47 |
| <i>Figura 3.8. Pavimento de puerto realizado con hormigón reforzado con fibras. Fuente: [39].</i> | 49 |
| <i>Figura 3.9. Ilustración de la apertura de las fisuras en la matriz cementante en las fibras bajo condiciones tensio-deformacionales. Fuente: [41].</i> | 50 |
| <i>Figura 4.1. Ejemplos de ondas de distintas frecuencias. Fuente: Elaboración propia.</i> | 54 |
| <i>Figura 4.2. Respuesta sistema de 1 gdl frente a una excitación armónica. Fuente: [42].</i> | 56 |
| <i>Figura 4.3. Suela elástica bajo traviesa. Fuente: [9].</i> | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.4. Suela bajo traviesa. Fuente: [55]..... | 62 |
| Figura 4.5. Modelos y cargas soportadas de la suela bajo traviesa SLS-USP. Fuente: [56] | 63 |
| Figura 4.6. Manta elástica bajo capa de balasto. Fuente: [62]..... | 64 |
| Figura 4.7. Sección transversal del sistema GETRAC A3 .Fuente: [63] | 65 |
| Figura 4.8. Sistema ATD de RAILONE .Fuente: [64]..... | 66 |
| Figura 4.9. Ejemplo de un aislamiento activo mediante zanjas vacías para una fuerza armónica puntual. Fuente: [72]..... | 67 |
| Figura 4.10. Ejemplo de un aislamiento pasivo mediante zanjas vacías situadas lejos de la fuente de excitación. Fuente: [72]..... | 68 |
| Figura 4.11. Esquema para mostrar el efecto teórico de la mejora de suelos mediante columnas de grava. Fuente: [73] | 68 |
| Figura 4.12. Mejora de las propiedades del terreno sobre el que se emplaza la vía mediante columnas de grava. Fuente: [74]..... | 69 |
| Figura 4.13. Sección de un suelo tratado con Jet Grouting. Fuente: [74] | 70 |
| Figura 4.14. Efecto producido por la vibrocompactación en el estado de compacidad del suelo. Fuente: [74] | 71 |
| Figura 4.15. Proceso de vibrocompactado de un suelo no cohesivo. Fuente: [75] | 71 |
| Figura 4.16. Efecto en la propagación de los bloques anti-onda (WIBs). Fuente: [75] | 72 |
| Figura 4.17. Material de amortiguamiento en el alma del carril. Fuente: [76] | 72 |
| Figura 4.18. Engrasador de carril. Fuente: [77]..... | 73 |
| Figura 5.1. Ejemplo de suela bajo traviesa. Fuente: [81] | 79 |
| Figura 5.2. Reducción de la aceleración vertical en un punto del edificio, para tres casos diferentes: sin zanja, con zanja hasta los 3 y 6 metros de profundidad. Fuente: [90] | 79 |
| Figura 5.3. Sistema de fijación con clip de ferrocarril. Fuente: [85]..... | 81 |
| Figura 5.4. Radial de corte. Fuente: [80]..... | 83 |
| Figura 5.5. Ejemplo de colocación del carril. Fuente: Anónimo | 84 |
| Figura 5.6. Ripado de las vías. Fuente: [82] | 85 |
| Figura 5.7. Ejemplo de soldadura aluminotérmica. Fuente: [83]..... | 86 |
| Figura 5.8. Explicación de la forma de bateo. Fuente: [84]..... | 87 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| <i>Tabla 2.1. Defectos descritos de la rueda. Fuente: [3].</i> | 16 |
| <i>Tabla 2.2. Defectos discretos del carril. Fuente: [3].</i> | 17 |
| <i>Tabla 2.3. Defectos extensos de la rueda. Fuente: [4].</i> | 18 |
| <i>Tabla 3.1. Composición en peso de los materiales utilizados para la fabricación de neumáticos. Fuente: [10]</i> | 34 |
| <i>Tabla 3.2. Composición química de negro de humo pirolítico procedente de diversas instalaciones españolas de tratamiento de NFU. Fuente: [11]</i> | 37 |
| <i>Tabla 3.3. Características mecánicas del hormigón con fibra de vidrio. Fuente: elaboración propia</i> | 44 |
| <i>Tabla 5.1. Resumen de los resultados obtenidos en cada alternativa. Fuente: Elaboración propia</i> | 93 |
| <i>Tabla 5.2. Matriz de calificaciones. Fuente: Elaboración propia</i> | 94 |
| <i>Tabla 5.3. Matriz de valoración. Fuente: Elaboración propia</i> | 94 |
| <i>Tabla 5.4. Matriz de dominación. Fuente: Elaboración propia</i> | 95 |
| <i>Tabla 5.5. Índices PRESS de todas las alternativas. Fuente: Elaboración propia</i> | 95 |





REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Thompson D. *Railway Noise and vibration. Mechanisms, modeling and means of control.* Elsevier. 2009.
- [2] *Apuntes de la unidad de ferrocarriles de la UPV.*
- [3] *Tesis doctoral, A. Rueda Buch.*
- [4] *Tesis doctoral, A. Saulot.*
- [5] www.busytrade.com
- [6] www.molyneuxindustries.com
- [7] Auersch L. *Ground vibrations due to railway traffic. The calculation of the effects of moving static loads and their experimental verification.* *Journal of Sound and Vibration.* 2006.
- [8] *Wikipedia.*
- [9] *Benchmarking railway vibrations.*
- [10] Wolf, J.P., Song, C (2001). *Some cornerstones of dynamic soil-structure interaction.* *Engineering structures* 24, pp. 13-28
- [11] TNU. *Memoria 2007-2008*
- [12] Guneyisi E, Gesoglu M, Ozturan T. *Properties of rubberized concretes containing silica fume.* *J CemConcr Res* 2004; 34:2309–17.
- [13] Ghaly A, Cahill J. *Correlation of strength, rubber content, and water to cement ratio in rubberized concrete.* *Can J Civil Eng* 2005; 32:1075–81.
- [14] Valadares F. *Mechanical performance of structural concretes containing rubber waste from waste tires.* *Master Dissertation in Civil Engineering, ISTUTL, Lisbon; 2009 [only in Portuguese]*
- [15] Freitas C, Galvão J, Portella K, Joukoski A, Filho C. *Desempenhofísico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de estirenobutadieno reciclada de pneus.* *Química Nova* 2009; 32:913–8.
- [16] Ganjian E, Khorami M, Maghsoudi A. *Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete.* *Constr Build Mater* 2009; 23:1828–36.
- [17] Skripkiunas G, Grinys A, Cernius B. *Deformation properties of concrete with rubber waste additives.* *Mater Sci* 2007; 13:219–23.
- [18] Anison M. *An investigation into a hypothetical deformation and failure mechanism for concrete.* *Mag Concr Res* 1964; 47:73–82.



- [19] Turatsinze A, Bonnet S, Granju J. Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: improvement in cracking shrinkage resistance. *Constr Build Mater* 2007; 21:176–81.
- [20] Khaloo A, Dehestani M, Rahmatabadi P. Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Manage* 2008; 28:2472–82.
- [21] Lin C-Y, Yao GC, Lin C-H. A study on the damping ratio of rubber concrete. *J Asian Archit Build Eng* 2010:423–9.
- [22] Aiello, MA, Leuzzi, F, (2010). Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state. *Journal of Waste Management* 30, pp. 1696-1704.
- [23] Goulias DG, Ali AH. Non-destructive evaluation of rubber modified concrete. In: *Proceedings, special conference ASCE, New York, p. 111–120; 1997.*
- [24] Topcu IB. The properties of rubberized concrete. *CemConcr Res* 1995; 25(2):304–10.
- [25] Fattuhi NI, Clark LA. Cement based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. *Constr Build Mater* 1996; 10(4):229–36.
- [26] Ali Atahan O, ÖnerYücel A. Crumb rubber in concrete: static and dynamic evaluation. *ConstrBuild Mater* Nov 2012; 36:617–22.
- [27] (2008). Anejo 14 EHE, Recomendaciones para la utilización de Hormigones con Fibras.
- [28] Massicotte, B. (2000). *Fibre Reinforce Concrete: A Structural Perspective*: .Rilem Proceedings 15
- [29] *Hormigones con Fibras de Acero Características Mecánicas. Trabajo Fin de Master*
- [30] (2010). ARQHYS. Obtenido de ArchitectsSite: <http://www.arqhys.com/casas/grc.html>
- [31] C. W. (1997). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 1era Edición*. Barcelona, España: Reverté
- [32] (2010). *International Glass Fiber Reinforced Concrete Association*. Obtenido de <http://www.grca.org.uk/product/>
- [33] Panelco GFRC. (2010) *Paneles Arquitectónicos y elementos Constructivos en GFRC*. Obtenido de *Especificaciones Técnicas Paneles de GFRC*: <http://www.panelcogrc.es/images/documentos/Especificaciones%20Tecnicas%20PGRC.Pdf>
- [34] (2008). Anejo 14 EHE, Recomendaciones para la utilización de Hormigones con Fibras.
- [35] <http://www.imcyc.com/revistacyt/img/cont/fibras.jpg>
- [36] (1989). Normas UNE. UNE 83500-2:1989 *Fibras de Polipropileno para el Refuerzo de Hormigones. Definición y Clasificaciones*.
- [37] B. L. (s.f.). *Fiber-matrix interaction in Microfiber Reinforced*.

- [38] Vandewalle, L. (2006) *Hybrid Fiber Reinforced Concrete: Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*. In Konsta-Gdoutos. Springer Netherlands, pp. 77-82.
- [39] SIKA
- [40] Folgar, M; Kovar, M (2013). *Conclusions from experimental testings of blast resistance of FRC and RC bridge decks*. *International Journal of Impact Engineering* 59, pp. 18-28
- [41] Yan, L, Jenkins, CH, Pendleton, RL, (2000). *Polyolefin fiber-reinforced concrete composites: Part II. Damping and interface debonding*. *Cement and Concrete Research*, 30, pp. 403-410.
- [42] Balachandran y Magrab (2005)
- [43] Wolf, JP. (1985). *Dynamic soil-structure interaction*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- [44] *Wheel/Rail Noise*, Transportation Research Board, Report 23, Washington D.C., 1997.
- [45] Lakušić, S. *Bukaodželezničkogprometa. // DANI PROMETNICA – Tehnički, ekonomski i ekološki aspekti /Stjepan Lakušić (ur.). Zagreb: Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu Zavod za prometnice, 2008. pp. 309-240.*
- [46] S. Lakuši, M. Ahac, and I. Haladin (2010); "Experimental investigation of railway track with under sleeper pad" *Slovenski kongres o cestah in prometu, portoroz*, 20-22.
- [47] A. Lopez Pita (2006); "Infraestructuras ferroviarias": Edicions UPC.
- [48] P. Fonseca Teixeira. (2007). "Elasticidad de la vía con y sin balasto." en *Vía con balasto versus vía en placa. Criterios técnicos- económicos para una decisión*.
- [49] "Vibration" de: www.commentmgr.com/projects/1212/docs/CH-4.8%20Vibration.PDF
- [50] S. Lakuši, M. Ahac, and I. Haladin (2010); "Experimental investigation of railway track with under sleeper pad" *Slovenski kongres o cestah in prometu, portoroz*, 20-22.
- [51] UIC Project No. I/05/U/440 (2009); "Under Sleeper Pads" *Summarising Report*.
- [52] A. Vidal Muro and A. Lopez Pita (2009); "Vibraciones en el Ferrocarril"
- [53] A. Riessberger (2006); "Ballast track for high speeds" *Proceedings "Tracks for High-Speed Railways"*, 23-44, Porto, Portugal.
- [54] www.getzner.com
- [55] Edilon Sedra" de: www.edilonsedra.com.
- [56] SLS-USP
- [57] P. Fonseca Teixeira (2007). "Elasticidad de la vía con y sin balasto." en *Vía con balasto versus vía en placa. Criterios técnicos- económicos para una decisión*.
- [58] *Soluciones inteligentes de BASF Construction Chemicals (2007); "Obras Tramo Jardín Ayora-Marítimo de la línea T4 de tranvía de Valencia"*
- [59] "Sistema MLG" de: www.sistemamlg.es.
- [60] "Isolgomma" de: www.isolgomma.com



- [61] Getzner Werstoffe" de: www.getzner.com.
- [62] "CDM" de: <http://cdmse.com>.
- [63] Getrack A3 http://www.railone.de/fileadmin/daten/05-presse-medien/downloads/broschueren/en/Getrac_EN2012_ebook.pdf
- [64] ATD http://www.railone.de/fileadmin/daten/05-presse-medien/downloads/broschueren/en/Green_tracks_EN_2011_ebook.pdf
- [65] Leilei, X. (2012). *Influence of in-filled trench as wave barrier on ground vibrations*. Stockholm: MSc Thesis, Royal Institute of Technology.
- [66] Murillo, C., Thorel, L., & Caicedo, B. (2009). *Ground vibration isolation with geof foam barriers: Centrifugemodelling*. *Geotextiles and Geomembranes* (27), 423-434.
- [67] Çelebi, E., Firat, S., Beyhan, G., Çankaya, I., Vural, I., & Kirtel, O. (2009). *Field experiments on wave propagation and vibration isolation by using wave barriers*. *Soil dynamics and earthquake engineering* (29), 824-833.
- [68] Ju, S. H. (2004). *Three-dimensional analyses of wave barriers for reduction of train-induced vibrations*. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* (130-7), 740-748.
- [69] Yang, Y. B., & Hung, H. H. (1997). *A parametric study of wave barriers for reduction of train-induced vibrations*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* (40), 3729-3747.
- [70] Hung, H. H., Yang, Y. B., & Chang, D. W. (2004). *Wave barriers for reduction of train-induced vibrations in soils*. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* (130), 1283-1291.
- [71] El Naggar, M. H., & Chehab, A. G. (2005). *Vibration barriers for shock-producing equipment*. *Canadian Geotechnical Journal* (42-1), 297-306.
- [72] FE. Woods RD. *Vibration of soils and foundations*. Ed. I. Prentice-Hall. 1970.
- [73] ifc-es.com columnas de grava
- [74] apuntes ETS Arquitectura de A Coruña, J. Pérez Valcárcel
- [75] H. Bredenberg et al (1999)
- [76] Hering – Systemised Construction Solutions
- [77] Fernández García, José Luis (2012)
- [78] Kaewunruen, S. y Remennikov, A.M. (2008b) *An Experimental Evaluation of the Attenuation Effect of Rail Pad on Flexural Behaviour of Railway Concrete Sleeper under Severe Impact Loads*. *Proceeding of the 2008 Australasian Structural Engineering Conference (ASEC)*, Melbourne, Australia.
- [79] GÓMEZ-SENENT, E. *Las fases del proyecto y su metodología*. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 1992.
- [80] www.hsforestaejardim.com.br

[81] www.etsspoor.nl

[82] www.maquivias.es

[83] www.madridaldia.net

[84] www.plassertheurer.com

[85] www.railfasteners.es

[86] Fonseca Teixeira, P., 2003. *Contribución a la reducción de los costes de mantenimiento de vías de alta velocidad mediante la optimización de su rigidez vertical*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.

[87] Egana, J.I.; Vinolas, J.; Seco, M. (2006) *Investigación of the influence of rail pad stiffness on rail corrugation on a transit system*. *Wear*, Vol. 261 (2), pp. 216-224.

[88] López Pita, A. (2006). *Infraestructuras Ferroviarias*. Edicions UPC. Pg 170-186, 203-206, 289-315, 361-369, 378-384.

[89] Stahl, W. (2004) *Improvement of ballasted tracks using sleeper pads. Investigations and experiences in the University of Technology Munich, Germany*.

[90] Adam, M.; Von Estorff, O. (2005). *Reductio of train-induced building vibrations by using open and filled trenches- Computers and Structures*, 83, 11-24