

UNIVERSIDAD DE GRANADA

E.T.S. DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y
PROYECTOS DE INGENIERÍA
ÁREA DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN



**DESARROLLO DE ELEMENTOS ELÁSTICOS A
PARTIR DE CAPAS DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO
PARA SU APLICACIÓN EN VÍAS DE FERROCARRIL**

***DEVELOPMENT OF ELASTIC ELEMENTS FROM END-OF-LIFE
TIRE LAYERS TO BE APPLIED IN RAILWAY TRACKS***

TESIS DOCTORAL

MIGUEL DEL SOL SÁNCHEZ

Para la obtención del

**GRADO DE DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE GRANADA CON
MENCIÓN DE DOCTORADO INTERNACIONAL**

Programa Oficial de Doctorado en Ingeniería Civil y Arquitectura

Granada, septiembre 2014

Editor: Editorial de la Universidad de Granada
Autor: Miguel del Sol Sánchez
D.L.: GR 2327-2014
ISBN: 978-84-9083-373-5

UNIVERSIDAD DE GRANADA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y
PROYECTOS DE INGENIERÍA



DESARROLLO DE ELEMENTOS ELÁSTICOS A PARTIR DE
CAPAS DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO PARA SU
APLICACIÓN EN VÍAS DE FERROCARRIL

DEVELOPMENT OF ELASTIC ELEMENTS FROM END-OF-LIFE
TIRE LAYERS TO BE APPLIED IN RAILWAY TRACKS

TESIS DOCTORAL

D. Miguel del Sol Sánchez

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Directores de Tesis:

Dña.M^a Carmen Rubio Gámez

D. Fernando Moreno Navarro

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales
y Puertos

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales
y Puertos

Granada, septiembre 2014

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera hacer especial mención a mis directores de tesis, Mayca Rubio Gámez y Fernando Moreno Navarro, a los cuales son muchísimas las cosas que debo de agradecerles, empezando, por supuesto, por ofrecerme la oportunidad de formar parte del grupo de investigación LabIC, del cual me siento orgulloso de pertenecer. Del mismo modo, me gustaría agradecerles todo el conocimiento transmitido, así como su incesante apoyo para ir consiguiendo pequeños objetivos que me han permitido ir creciendo en el ámbito personal y profesional. No obstante, dado que son numerosos los motivos por los que debería seguir agradeciéndoles, me limito a decir en mayúsculas, GRACIAS POR TODO.

Asimismo, es imposible olvidar mi agradecimiento al resto de miembros del grupo LabIC (Antonio Menéndez, Germán Martínez, M^a José Martínez-Echevarría, Mónica López, Ascensión Medina, Gema García, Jaime García, Jesús Martín, Miguel Pérez, Ana Jiménez del Barco y Luca Pirozzolo) por el magnífico ambiente de trabajo, que hace que cada día sea un placer. En este aspecto me gustaría hacer especial mención a mis compañeros de la Sala Rus, ya que no son pocas las horas que pasamos juntos. Y cómo no, a Jesús: nunca te olvidaré y tu fortaleza me ayudará a superar cada obstáculo. Siempre te echaré de menos.

Siguiendo en el ámbito profesional, me gustaría agradecer de forma conjunta a la Universidad de Nottingham y a todos mis compañeros del NTEC, en particular a los profesores Nick Thom y Gordon Airey por haberme facilitado la adaptación durante mi periodo de estancia, así como por haber colaborado en mi formación y aprendizaje.

Por su parte, me gustaría transmitir mi agradecimiento a los participantes del proyecto de investigación titulado “Diseño y puesta en valor de paneles antivibración fabricados con material secundario procedente de neumáticos usados para su aplicación en el campo de las infraestructuras ferroviarias” (ITP-2011-1963-310000), así como al Ministerio de Ciencia e Innovación y los fondos FEDER.

Pasando al ámbito personal, quiero dar las gracias a mis padres y hermana, así como toda mi familia y amigos en general, por haberme apoyado durante toda mi vida, y haberme ayudado a crecer como persona, estando siempre cerca para hacer el día a día más sencillo, mostrando que el esfuerzo es la clave para conseguir los objetivos marcados.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

También me gustaría dar las gracias a Rocío, la persona que más de cerca ha vivido el desarrollo de este trabajo y a la que más tiempo le debo. Así, quisiera agradecerle todo su apoyo y comprensión, permitiéndome estar centrado en mi trabajo a la vez que manteniéndome feliz día tras día y con ganas de seguir labrando un futuro juntos.

En último lugar, y no por ello menos importante, agradecer al resto de personas que han contribuido, ya sea de forma directa o indirecta, mediante su apoyo y comprensión, en la consecución de este trabajo de investigación.

TESIS DOCTORAL

Memoria presentada por D. Miguel del Sol Sánchez para la obtención al grado de Doctor por la Universidad de Granada con mención de Doctorado Internacional.

El doctorando D. Miguel del Sol Sánchez, y los directores de tesis Dña. M^a del Carmen Rubio Gámez y D. Fernando M. Moreno Navarro, garantizan al firmar este documento, que el trabajo presentado para la obtención del grado de Doctor ha sido realizado en su totalidad por el doctorando bajo la dirección de ambos directores, y hasta donde su conocimiento alcanza, durante el desarrollo del trabajo se han respetado los derechos de otros autores citados en la sección de bibliografía, cuando sus resultados o publicaciones han sido utilizadas.

Granada, 12 de septiembre de 2014

Directores de la Tesis:

Fdo.: M^a del Carmen Rubio Gámez

Fdo.: Fernando M. Moreno Navarro

Doctorando:

Fdo.: Miguel del Sol Sánchez

RESUMEN

La incorporación de elementos elásticos en estructuras de ferrocarril es una técnica cada vez más utilizada por distintas administraciones ferroviarias para dar respuesta a una serie de problemas habituales asociados a la circulación de trenes a través de la vía. Los principales componentes elásticos son placas de asiento de carril, suelas bajo traviesa y mantas bajo balasto, los cuales son comúnmente utilizados para reducir el deterioro de la infraestructura provocado por la fatiga y degradación de sus componentes, así como para mitigar los fenómenos de transmisión de ondas y ruido causados por el paso de vehículos.

La aplicación de elementos elásticos además de reducir los efectos de estos problemas, permite graduar la rigidez global vertical de la vía, que es un parámetro fundamental para conseguir una adecuada respuesta del sistema, lo que a su vez contribuye a reducir los fenómenos nocivos asociados al deterioro de la vía y la transmisión de vibraciones. De esta forma, los componentes elásticos son concebidos como una solución efectiva para mejorar la durabilidad y calidad del sistema ferroviario, disminuyendo así los costes de explotación y mantenimiento de la vía.

Estos elementos elásticos generalmente están elaborados a partir de polímeros como caucho, polietileno de alta densidad (HDPE), elastómero termoplástico de poliéster (TPE) y etileno vinil acetato (EVA). Además, en los últimos años se está tratando de desarrollar nuevos componentes que permitan reducir el precio asociado al uso de estos polímeros de altas prestaciones, siendo una práctica habitual la reutilización de materiales elásticos, lo que además está en consonancia con las actuales políticas de desarrollo sostenible.

En este sentido, destaca el empleo de neumáticos fuera de uso dado que se trata de un material secundario abundante y con altas prestaciones mecánicas (elevada resistencia al deterioro climático, buen comportamiento elástico, resistencia al desgaste, etc.). Así, surge la investigación recogida en la presente tesis doctoral cuyo objetivo principal consiste en el desarrollo de elementos elásticos a partir de las capas que componen los neumáticos fuera de uso, extraídas mediante una técnica de deconstrucción. De esta forma, se evita la necesidad de triturar el material (técnica habitualmente empleada), reduciendo de esta forma los costes de fabricación de los componentes elásticos, a la vez que se reduce la pérdida de prestaciones mecánicas del material asociada a su trituración.

Para la consecución de estos objetivos se recoge una serie de etapas de trabajo que comprenden (i) la caracterización de las capas de neumáticos para seleccionar la materia prima más apropiada; (ii) una fase de diseño óptimo para la elaboración de elementos elásticos a partir de las bandas de neumáticos; (iii) evaluación de su capacidad resistente y (iv) de su influencia en la respuesta de la vía; (v) comprobación de su cumplimiento con la normativa española; (vi) un análisis comparativo entre su comportamiento y el presentado por elementos comerciales, existentes en el ámbito ferroviario; (vii) y un estudio de la respuesta de los elementos de neumáticos en un tramo de prueba a escala real.

Los resultados han permitido determinar que es viable elaborar elementos elásticos a partir de capas de neumáticos, con características óptimas para su aplicación en distintos tipos de vías, y una durabilidad apropiada para su uso como componentes ferroviarios. Además, se ha comprobado que estos materiales presentan un comportamiento mecánico comparable al presentado por elementos comúnmente usados en vías de ferrocarril, a la vez que permiten mejorar la respuesta de la vía ante el paso de vehículos, pudiendo así alargar su vida de servicio y reducir los costes asociados a tareas de mantenimiento y rehabilitación. Para probar estos beneficios a largo plazo, actualmente un tramo de prueba con placas de neumáticos se encuentra bajo estudio.

ABSTRACT

The use of elastic elements in railroad structures is becoming a common technique for diverse railway administrators with the aim of reducing the effect of a series of problems associated to the train passage through the track. The main elastic components are rail pads, under sleeper pads (USP) and under ballast mats (UBM), which are commonly used to reduce infrastructure deterioration associated to the fatigue and degradation of the track components. Besides, elastic elements are used to reduce wave transmission and noise emission when train passing.

In addition, elastic elements allow graduation of the track global stiffness, defined as a fundamental design parameter to obtain an adequate response of the railway track while the phenomena of vibrations and infrastructure degradation are also reduced. Thus, the use of elastic elements in current railroads is postulated as an effective solution to increase track quality and durability, reducing costs related to operational and maintenance tasks.

Elastic elements are mainly manufactured from polymeric materials such as rubber, high density polyethylene (HDPE), thermoplastic polyester (TPE) and ethylene vinyl acetate (EVA). Besides, during the last years new components are being developed from elastic wastes with the aim of reducing production costs associated to the price of high performance elastomers. In addition, this trend is in consonance with the current politics for sustainable development.

In this sense, end-of-life tires are one of the most habitual materials used in the production of actual elements since it is an abundant waste with high quality physical and mechanical properties (high resistance to climatic degradation, to wear, adequate elastic behaviour, etc.). Thus, the present thesis doctoral aims to develop elements from the elastic layers that compose the end-of-life tires, being these materials obtained through an industrial technique that consists of deconstructing the tires in different layers without grinding up the waste (habitual method). This fact allows reduction of costs and time production as well as the material remains its original properties thanks to the absence of grinding processes.

With this purpose, this thesis doctoral presents the activities carried out to develop the elastic elements: (i) characterization of the properties of the tire layers with the aim of selecting the most appropriate raw material; (ii) optimal design of elastic elements from tire layers; (iii) evaluation of their resistance (iv) and their influence in the track behaviour; (v) verification of compliance

with the Spanish Standards; (vi) comparative analysis between the performance of tire elements and the mechanical behaviour of commercial components used in railway tracks; (vii) and a study of the tire elements in a trial section of a real track.

Results show the viability to develop elastic elements from end-of-life tire layers, obtaining materials with optimal characteristic and adequate resistance to be used in different types of railway tracks. It was also seen that the performance of these elements is comparable to that recorded from materials commonly utilized in railway. In addition, the application of tire elements could improve the behaviour of tracks, which allows the increase in its service life as well as the reduction in maintenance and rehabilitation costs.

ÍNDICE GENERAL

Índice de Tablas.....	17
Índice de Figuras	21
1. Introducción.....	33
1.1 Justificación de la tesis.....	33
1.2 Contenido de la tesis.....	36
2. Estudio del Estado del Arte.....	45
2.1 Estructura ferroviaria	45
2.1.1 Descripción de la vía.....	45
2.1.2 Esfuerzos transmitidos a la vía.....	50
2.1.2.1 Esfuerzos verticales	51
2.1.2.2 Esfuerzos transversales.....	54
2.1.2.3 Esfuerzos longitudinales.....	56
2.2 Principales problemas en la estructura ferroviaria	58
2.2.1 Deterioro de la calidad geométrica de la vía.....	58
2.2.1.1 Cambio en los parámetros geométricos de la vía	63
2.2.1.2 Posibles soluciones para reducir el deterioro geométrico de la vía	65
2.2.2 Vibraciones.....	67
2.2.2.1 Transmisión de ondas al terreno.....	67
2.2.2.1.1 Frecuencias de las vibraciones	70
2.2.2.1.2 Efecto de la propagación de ondas en el terreno	72
2.2.2.1.3 Posibles soluciones para reducir las vibraciones.....	75
2.2.2.2 Ruido	76
2.2.2.2.1 Posibles soluciones para disminuir el ruido	80
2.3 Importancia de la rigidez vertical de la vía: necesidad de un valor óptimo.....	81
2.3.1 Definición de la rigidez vertical de la vía.....	81
2.3.2 Efecto de la rigidez vertical en los esfuerzos transmitidos a la vía ..	83

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

2.3.3	Importancia de un valor óptimo de rigidez.....	85
2.3.4	Variaciones de la rigidez vertical de la vía.....	89
2.3.5	Posibles soluciones para obtener un valor óptimo y homogéneo de rigidez	92
2.4	Elementos elásticos	93
2.4.1	Placas de asiento	93
2.4.1.1	Principales características de diseño de las placas de asiento	95
2.4.1.2	Evolución de las características de diseño de las placas de asiento	98
2.4.1.3	Estudios y experiencias sobre placas de asiento	102
2.4.2	Suelas bajo traviesa.....	118
2.4.2.1	Características de diseño de las suelas bajo traviesa	120
2.4.2.2	Estudios y experiencias sobre suelas bajo traviesa	122
2.4.3	Mantas elásticas.....	141
2.4.3.1	Principales características de diseño de las mantas elásticas	142
2.4.3.2	Estudios y experiencias sobre mantas bajo balasto.....	145
2.5	Neumáticos fuera de uso para elaborar elementos elásticos	153
2.5.1	Valorización de neumáticos usados	153
2.5.2	Propiedades de los neumáticos usados	156
2.5.3	Empleo de neumáticos usados en el ámbito de la infraestructura ferroviaria.....	157
2.5.4	Proceso de deconstrucción en capas de neumáticos usados	161
2.6	Conclusiones del estado del arte. Motivación de la tesis.....	162
3.	Objetivos.....	167
3.1	Objetivo general	167
3.2	Objetivos específicos	167
4.	Metodología.....	173
4.1	Materiales	173
4.2	Plan de trabajo	176

4.2.1	Caracterización de las capas que componen los neumáticos (Etapa 1)	177
4.2.2	Definición de elementos elásticos a partir de capas de neumáticos (Etapa 2)	177
4.2.3	Evaluación de la resistencia de los elementos de neumáticos (Etapa 3)	183
4.2.4	Estudio de la influencia de los elementos de neumático en la respuesta de la vía (Etapa 4)	187
4.2.5	Comprobación del cumplimiento de la normativa española (Etapa 5)	191
4.2.6	Comparativa con elementos comerciales (Etapa 6)	193
4.2.7	Estudio en un tramo de prueba a escala real (Etapa 7)	193
5.	Análisis de resultados.....	197
5.1	Caracterización de las capas que componen los neumáticos	197
5.2	Definición de elementos elásticos a partir de capas de neumáticos	199
5.2.1	Diseño de los elementos de neumáticos.....	199
5.2.2	Determinación de las características óptimas de diseño para los elementos de neumáticos	208
5.2.2.1	Placas de asiento.....	209
	Determinación de espesor	209
	Determinación del tipo de neumático (repetibilidad de resultados).....	216
	Determinación del tratamiento del material.....	221
	Consideraciones para el desarrollo de placas de neumáticos.....	225
5.2.2.2	Suelas bajo traviesa.....	225
	Determinación del espesor.....	225
	Determinación del tratamiento del material.....	231
	Determinación del método de adherencia.....	232
	Consideraciones para el desarrollo de suelas de neumáticos bajo traviesas	234
5.2.2.3	Mantas bajo balasto.....	234
	Determinación del espesor.....	235

Consideraciones para el desarrollo de mantas de neumáticos	241
5.2.3 Recomendaciones de diseño para el uso de elementos de neumáticos.....	241
5.3 Evaluación de la resistencia de los elementos de neumáticos.....	244
5.3.1 Placas de asiento	244
5.3.1.1 Fatiga mecánica.....	244
5.3.1.2 Deterioro climático.....	246
5.3.2 Suelas bajo traviesa.....	248
5.3.2.1 Fatiga mecánica.....	248
5.3.2.2 Deterioro climático.....	249
5.3.3 Manta bajo balasto.....	250
5.3.3.1 Fatiga mecánica.....	250
5.3.3.2 Deterioro climático.....	251
5.4 Estudio de la influencia de los elementos de neumáticos en la respuesta de la vía	252
5.4.1 Influencia sobre cajón de balasto	253
5.4.2 Atenuación de impactos.....	258
5.4.3 Contacto traviesa-balasto	260
5.4.4 Desplazamiento lateral.....	261
5.5 Comprobación del cumplimiento de la normativa española.....	264
5.5.1 Placas de asiento	264
5.5.1.1 Normativa para vía convencional.....	264
5.5.1.2 Normativa para Alta Velocidad	266
5.5.2 Suelas bajo traviesa.....	267
5.5.2.1 Normativa para Alta Velocidad	267
5.5.3 Mantas bajo balasto.....	269
5.5.3.1 Normativa para Alta Velocidad	269
5.6 Comparativa con elementos comerciales	271
5.6.1 Placas de neumáticos y placas comerciales, para vías convencionales.....	272

Índices

5.6.2	Placas de neumáticos y placas comerciales, para vías de Alta Velocidad	277
5.7	Estudio en un tramo de prueba a escala real	282
6.	Conclusiones	291
7.	Futuras líneas de investigación.....	299
8.	Referencias bibliográficas	303
ANEXO I.	DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS	323

Índice de Tablas

Tabla 1: Clasificación de vía en placa según los niveles elásticos (Pañero, 2006).	46
Tabla 2: Clasificación de los tipos de deterioro en función de los componentes ferroviarios implicados (Elaboración propia).	59
Tabla 3: Tolerancias medias de los parámetros geométricos de la vía, para tramos con longitud de 100 m y con curvatura mayor de 10.000 m (Ruano Gómez y López Pita, 2007).....	65
Tabla 4: Medidas de desplazamientos verticales en distintas vías europeas (Woldringh y New,1999; Van Staalduinen y Van Oosterhout, 1997;Madshus y Kaynia, 2000).....	73
Tabla 5: Rigidez vertical del soporte del carril para diversas estructuras de asiento y placa de asiento en Francia (recogido en López Pita, 2001).	99
Tabla 6: Rigidez vertical de la placa de asiento en diferentes países europeos (Teixeira, 2003).	101
Tabla 7: Resumen de la influencia de la rigidez de las placas en la respuesta de la vía (Elaboración propia).	111
Tabla 8: Resumen de la influencia de distintos parámetros en la rigidez de las placas de asiento (Elaboración propia).	118
Tabla 9: Efecto de las suelas bajo traviesas en distintos parámetros de la respuesta de la vía (Müller-Boruttau y Kleinert, 2001).....	125
Tabla 10: Efecto de las suelas en la velocidad de vibración de las ondas, y en la reducción de ruido (Lakuši et al., 2010).....	130
Tabla 11: Resumen del efecto de la rigidez de las suelas en distintos parámetros de comportamiento de la vía (Elaboración propia).....	141
Tabla 12: Efecto de la rigidez de las mantas en la transmisión de ondas al terreno (UIC Code 719-1, 2011).	149
Tabla 13: Resumen del efecto de la rigidez de las mantas en distintos parámetros de comportamiento de la vía (Elaboración propia).....	149
Tabla 14: Principales componen de los neumáticos (CEDEX, 2007).....	156
Tabla 15: Resumen del plan de trabajo seguido para el desarrollo de elementos elásticos a partir de las capas que componen los neumáticos usados.....	183
Tabla 16: Plan de trabajo para evaluar la resistencia de los elementos de neumáticos.....	187

Tabla 17: Plan de trabajo desarrollado para evaluar la influencia de los componentes de neumáticos en la respuesta de la vía.....	191
Tabla 18: Resultados de la caracterización de las bandas que componen los neumáticos.....	197
Tabla 19: Resumen de las propiedades geométricas exigidas a los elementos elásticos, y de las propiedades de las muestras para ensayos de laboratorio..	208
Tabla 20: Resultados para placas procedentes de un mismo neumático. Estudio realizado para distintos tipos de neumáticos.	218
Tabla 21: Resultados registrados para placas procedentes de distintos neumáticos del mismo tipo y modelo.....	219
Tabla 22: Resultados para placas procedentes de distintos tipos y modelos de neumáticos. Estudio realizado para placas con 7,5 mm y 9,0 mm.	220
Tabla 23: Resultados de variación de rigidez y energía disipada para suelas de neumáticos con diferentes tratamientos del material.....	232
Tabla 24: Resultados del ensayo de arrancamiento para diferentes soluciones de adherencia entre las suelas de neumáticos y el hormigón de las traviesas.	233
Tabla 25: Resumen de las propiedades óptimas recomendadas para el uso de distintos tipos de placas de asiento, suelas bajo traviesa y mantas bajo balasto.	242
Tabla 26: Resultados de movimiento de carril antes y después del proceso de fatiga, así como la variación entre ambos casos, para placas bajo carga inclinada.....	245
Tabla 27: Variación del comportamiento de suelas de neumáticos como consecuencia del proceso de fatiga.	249
Tabla 28: Variación del comportamiento del material constituyente de las suelas debido a distintos procesos de deterioro climático.....	250
Tabla 29: Resultados del parámetro SRLC para las distintas soluciones elásticas estudiadas en cajón de balasto.....	257
Tabla 30: Resultados de atenuación de impactos para placas de neumáticos, en referencia a una placa patrón de material rígido.	259
Tabla 31: Resultados de la influencia de suelas en el área de contacto traviesa-balasto.....	260
Tabla 32: Resultados del efecto de las suelas de neumáticos en la resistencia lateral del sistema sobre capa de balasto.	262

Tabla 33: Resumen de la influencia de los distintos elementos de neumáticos en la respuesta de la vía.....	263
Tabla 34: Resumen de la respuesta de placas de neumáticos en relación a las especificaciones de ADIF para Alta Velocidad.	267
Tabla 35: Resumen de las propiedades de las suelas de neumáticos en relación a las prescripciones de ADIF para su uso en Alta Velocidad.....	268
Tabla 36: Resumen de las características de las mantas de neumáticos en referencia a las exigencias de ADIF para Alta Velocidad.....	270
Tabla 37: Resultados estáticos para placas de neumáticos y placas comerciales usadas en vías convencionales.	273
Tabla 38: Resultados dinámicos para la comparativa entre placas comerciales y placas de neumáticos deconstruidos.	275
Tabla 39: Variación de resultados de las placas comerciales y de neumáticos deconstruidos tras distintos procesos de deterioro climático.....	277
Tabla 40: Resultados estáticos para placas comerciales y placas de neumáticos susceptibles de ser usadas en Alta Velocidad.	278
Tabla 41: Resultados dinámicos para placas comerciales y de neumáticos para su uso en Alta Velocidad.	279
Tabla 42: Efecto de distintos procesos climáticos en la respuesta de placas comerciales y placas de neumáticos para Alta Velocidad.	282

Índice de Figuras

Figura 1: Vía en placa en una sección en túnel (Pañero, 2006).	45
Figura 2: Estructura tradicional sobre balasto (Elaboración propia).	47
Figura 3: Configuraciones típicas de las capas de asiento en líneas convencionales y en líneas de Alta Velocidad (López Pita, 2006).	49
Figura 4: Aspecto visual de placa de asiento (izquierda), suela bajo traviesa (centro) y manta bajo balasto (derecha) (UIC Project, 2006; Kaewunruen y Remennikov, 2009; Bongini, 2012).	49
Figura 5: Esquema de esfuerzos que solicitan la vía ferroviaria (Elaboración propia).	50
Figura 6: Representación de la distribución de esfuerzos a través de la vía (Esveld, 2001).	51
Figura 7: Esquema de las principales fuerzas que tienen lugar en el vehículo a su paso por un tramo en curva (Elaboración propia).	55
Figura 8: Nivel de esfuerzos laterales que solicitan la vía en función de la velocidad de los trenes (extraído de López Pita, 2006).	56
Figura 9: Aspecto visual de algunos tipos de defectos en carriles (elaboración propia a partir de venzario.wordpress).	60
Figura 10: Problemas de asiento (izquierda) o pérdida de capacidad portante (derecha) de la vía (elaboración propia a partir de www.atsb.gov.au y www.geerassocia.com).	61
Figura 11: Contribución de las distintas capas de la subestructura al asiento de vía (Selig y Waters, 1994).	62
Figura 12: Datos de asiento recogidos en diversas vías ferroviarias (Anderson y Key, 2000).	62
Figura 13: Relación entre asiento diferencial y asiento global de la vía (Selig and Waters, 1994).	63
Figura 14: Defectos de nivelación longitudinal, transversal y de alineación (Elaboración propia).	64
Figura 15: Relación entre el tráfico de una vía y sus defectos geométricos, indicando la necesidad de tareas de mantenimiento (Lichtberger, 2005).	66
Figura 16: Ondulaciones de carril (elaboración propia a partir de www.andian.com).	68
Figura 17: Aspecto visual del fenómeno de corrugación de carril (Egana et al., 2006).	68

Figura 18: Propagación de ondas en el terreno (elaboración propia).....	69
Figura 19: Características de las vibraciones atendiendo a su fuente de generación (Müller-Boruttau y Breitsamter, 2004).	71
Figura 20: Representación del efecto de la velocidad de circulación en las deflexiones dinámicas (Woldringh y New,1999; Van Staalduinen y Van Oosterhout, 1997;Madshus y Kaynia, 2000).	74
Figura 21: Velocidad de vibración en función de la distancia al eje de la vía, sin considerar y considerando el efecto del balasto (Galvín, 2007).	76
Figura 22: Representación del ruido emitido como consecuencia del contacto rueda-carril (Thompson y Jones, 2006).	78
Figura 23: Comparativa entre el ruido provocado por (a) irregularidades aleatoria y (b) periódicas del contacto rueda-carril (Wu y Thompson, 2002). .	79
Figura 24: Contacto rueda-carril en tramos en curva, dando lugar al conocido como “ruido de chirrido” (Elaboración propia)	80
Figura 25: Representación de la deflexión de vía ante la aplicación de carga (concepto de rigidez de vía) (Elaboración propia).	82
Figura 26: Incidencia de los diferentes parámetros en las sobrecargas dinámicas transmitidas a la vía (extraído de Teixeira, 2003, a partir del concepto de Prud’Homme, 1970).	84
Figura 27: Relación entre la rigidez de la vía y las sobrecargas dinámicas transmitidas al carril (Teixeira, 2003).	85
Figura 28: Relación entre la rigidez de la vía y energía disipada al paso de los vehículos (Sauvage y Fortin, 1982).	86
Figura 29: Evolución de los costes totales de mantenimiento de la calidad geométrica de la vía y de energía disipada con la rigidez vertical de la vía (Teixeira, 2003).	88
Figura 30: Medidas anteriores al año 1983 de cambios de rigidez a lo largo de la línea convencional Madrid-Barcelona, España (López Pita, 1983).	89
Figura 31: Oscilaciones de rigidez medidas en una vía sueca (Berggren, 2007).	91
Figura 32: Efecto de las operaciones de bateo en la rigidez de la vía (Riessberger, 1978).	91
Figura 33: Sistema de sujeción directo, con placa de asiento (Sistema MLG). ...	94
Figura 34: Placas elásticas debajo del sistema de sujeción indirecta (Edilon Sedra).....	94

Figura 35: Distintos tipos de placas de asiento (Carrascal, 2006; Carrascal et al. 2007).....	95
Figura 36: Placas de asiento fabricadas a partir de polvo de neumático (CDM).	96
Figura 37: Típicas curvas carga/deflexión registradas para placas de asiento (AEA Technology Rail, 2005).....	97
Figura 38: Relación entre el coeficiente de rigidez de apoyo (Sauvage y Larible, 1982).....	99
Figura 39: Equipo de gran capacidad de impacto (Kaewunruen y Remennikov, 2008b).....	103
Figura 40: Curvas deformación vertical/tiempo para evaluar la capacidad de atenuación de placas de asiento tomando una muestra rígida como referencia (Carrascal et al., 2011).....	104
Figura 41: Medidas de la influencia de la rigidez de las placas de asiento en la amplitud de la corrugación de carril (Egana et al., 2006).....	105
Figura 42: Influencia de la rigidez de las placas de asiento en la rigidez global de la vía (Teixeira, 2003).	106
Figura 43: Efecto de la rigidez de las placas de asiento en la emisión de ruido de diversos componentes ferroviarios (Thompson y Jones, 2006).	107
Figura 44: Influencia de las placas de asiento en la emisión sonora, en función del estado de la vía (Vincent et al., 1996).	108
Figura 45: Efecto de la rigidez de las placas de asiento en las vibraciones de balasto (López Pita, 2006).	109
Figura 46: Influencia de la rigidez vertical de la placa de asiento en la velocidad de vibración del balasto (recogido en López Pita, 2001).	110
Figura 47: Comportamiento a) estático y b) dinámico a diferentes temperaturas de las placas de asiento (Carrascal et al., 2007).....	112
Figura 48: Energía disipada por placas de asiento (Carrascal et al., 2007).....	113
Figura 49: Curvas carga dinámica/deflexión de placas de asiento (Carrascal et al., 2011).....	113
Figura 50: Influencia del valor de la precarga en la rigidez de las placas de asiento (Maes et al., 2006).	115
Figura 51: Aspecto visual de placas degradadas (Kaewunruen y Remennikov, 2005b).....	115
Figura 52: Equipo de ensayo para evaluar la degradación de placas de asiento (Kaewunruen y Remennikov, 2005b).	116

Figura 53: efecto de distintos procesos de deterioro en la rigidez vertical de las placas (Carrascal et al., 2010).....	117
Figura 54: Suelas elásticas adheridas a la parte inferior de las traviesas (recogida en López Pita, 2006).....	119
Figura 55: Aspecto de suelas adheridas a la cara inferior de traviesas de hormigón. (Getzner, www.getzner.com).....	121
Figura 56: Efectos de las suelas elásticas en el deterioro de la nivelación de la vía (recogido en López Pita, 2006).....	123
Figura 57: Velocidad de vibración en vías con y sin suelas elásticas (Stahl, 2004).....	124
Figura 58: Efecto de las suelas (y su rigidez) en las vibraciones transmitidas al balasto (Müller-Boruttau y Kleinert, 2001).....	126
Figura 59: Aspecto de un cajón de balasto comúnmente utilizado en ensayos de laboratorio para evaluar suelas elásticas (UIC Project Under Sleeper Pads, 2009).....	126
Figura 60: Efecto de las suelas en la nivelación a lo largo de la vía (Schilder, 2006).....	127
Figura 61: Efecto de la rigidez de las suelas en la corrugación de carril en tramos de prueba (Schilder, 2006).....	129
Figura 62: Efecto de las suelas en la reducción de vibraciones de la vía (Lakuši et al., 2010).....	130
Figura 63: Dispositivo utilizado por la SNCF francesa para evaluar la respuesta de suelas (UIC Project Under Sleeper Pads, 2009).....	131
Figura 64: Efecto de la rigidez de las suelas en la reducción de ruido (Asmussen, 2012).....	132
Figura 65: Influencia de las suelas en el asiento de tres tramos experimentales de vía (Plica, 2007).....	134
Figura 66: Efecto de la rigidez de las suelas en la energía transmitida a la capa de balasto (Krüger, 2007).....	135
Figura 67: Influencia de la rigidez de las suelas en los movimientos de carril (Johansson et al., 2008).....	136
Figura 68: Medidas de la aceleración en traviesas con suelas elásticas de distinta rigidez (Johansson et al, 2008).....	137
Figura 69: Efecto de las suelas en la tensión transmitida al balasto.	138

Figura 70: Efecto de la rigidez de las suelas en la frecuencia acumulada de distintos niveles de esfuerzo sobre balasto (Witt, 2008).....	139
Figura 71: Efecto de la rigidez de las suelas en la presión máxima transmitida al balasto (Witt, 2008).....	140
Figura 72: Puesta en obra de mantas elásticas (Getzner Werkstoffe, 2006). ...	142
Figura 73: Manta elástica bajo capa de balasto. CDM (www.cdm.com).....	144
Figura 74: Aspecto visual de mantas elásticas instaladas sobre un puente, antes del extendido de balasto (Getzner Werkstoffe, 2006).....	144
Figura 75: Mantas elásticas dispuestas en un tramo sobre puente (Dold y Potocan, 2013).	147
Figura 76: Efecto de las mantas en la transmisión de vibraciones (Getzner, 2006).....	148
Figura 77: Efecto de las mantas en la transmisión de ondas. Validación de datos obtenidos mediante modelización (Mueller-Boruttau y Breitsamter, 2005)..	150
Figura 78: Validación de los resultados obtenidos mediante modelización de la reducción sonora al emplear mantas elásticas (Hanson y Singleton, 2006).....	151
Figura 79: Efecto de las mantas de rigidez en la respuesta del balasto. Consideración de precarga 0,03 MPa (izquierda) y 0,06 MPa (derecha) (Lapčík et al., 2001).	152
Figura 80: Aspecto visual de distintos métodos de ensayos en laboratorio para mantas. Empleando capa de balasto (izquierda) y utilizando placas planas de carga (derecha) (Carrascal et al., 2013).	153
Figura 81: Almacenamiento de neumáticos en el vertedero de Seseña y Arico (Díaz Pardo, 2007).....	154
Figura 82: Traviesas fabricadas a partir de caucho reciclado y otros plásticos (Anne and Russ Evans, 2006).	158
Figura 83: Manta antivibratoria fabricada a partir de polvo de neumáticos (Sistema MLG).....	159
Figura 84: Placas de asiento obtenidas a partir de polvo de neumáticos (CDM).	160
Figura 85: Carriles embebidos en una mezcla de polvo de neumáticos y resina (Sistema MLG).....	160
Figura 86: Proceso industrial de deconstrucción de neumáticos (Gomavial Solutions, S.L.).	161
Figura 87: Principales capas elásticas que componen los neumáticos (Elaboración propia a partir de metzeler.com).....	162

Figura 88: Deconstrucción en capas de neumáticos usados. Banda interior (izquierda), intermedia (centro) y externa (derecha).....	173
Figura 89: Paneles de neumáticos tipo invierno (izquierda) y tipo común (derecha).....	174
Figura 90: Paneles elásticos procedentes de diferentes modelos de neumáticos.	174
Figura 91: Muestras de neumáticos con distinto nivel de desgaste.....	175
Figura 92: Esquema del plan de trabajo.....	176
Figura 93: Aspecto visual del equipo utilizado para la evaluación en laboratorio de la respuesta de elementos elásticos.....	180
Figura 94: Configuración de ensayos para suelas elásticas.....	181
Figura 95: Configuración del ensayo de arrancamiento para evaluar la unión suela-hormigón.....	182
Figura 96: Placas de ensayo empleadas para solicitar muestras de mantas elásticas.....	182
Figura 97: Configuración del ensayo de fatiga de placas bajo carga inclinada.....	184
Figura 98: Disposición de los elementos empleados en el ensayo de fatiga para suelas elásticas.....	185
Figura 99: Aspecto visual del montaje del ensayo de fatiga para mantas elásticas.....	186
Figura 100: Configuración del cajón de balasto para simular el comportamiento de una sección de la superestructura de vía.....	188
Figura 101: Esquema de las soluciones elásticas estudiadas en cajón de balasto.	189
Figura 102: Diferentes perspectivas de la configuración del ensayo para evaluar la atenuación de impactos por parte de placas de asiento.	190
Figura 103: Aspecto de los ensayos para evaluar la influencia de las suelas en la resistencia lateral (izquierda) y en el contacto traviesa-balasto (derecha).....	191
Figura 104: Capa de neumático seleccionada como materia prima para el desarrollo de elementos elásticos.....	198
Figura 105: Esquema del proceso de obtención de placas elásticas a partir de la banda de rodadura de neumáticos usados.....	200
Figura 106: Aspecto visual de placas de neumáticos con diferentes características.....	201
Figura 107: Placas de neumáticos con geometrías particulares.....	201

Figura 108: Esquema del diseño habitual para suelas elásticas bajo traviesa.	202
Figura 109: Esquema del proceso de obtención de suelas bajo traviesa a partir de bandas de neumáticos usados.....	203
Figura 110: Aspecto visual de probetas de ensayo para evaluar el comportamiento de suelas elásticas.....	205
Figura 111: Media traviesa con suela de neumático adherida en la cara inferior.	205
Figura 112: Tejido textil extraído en la cara interna de la banda de rodadura.	206
Figura 113: Muestras de mantas elásticas (2 muestras de 300x300 mm, y una de 900x900 mm) para su ensayo en laboratorio.....	207
Figura 114: Cajón de balasto con manta de neumático en el fondo.....	207
Figura 115: Resultados de rigidez vertical y energía disipada (inversa) registrados en el ensayo estático 20-95 kN para placas de neumáticos con diversos espesores.	210
Figura 116: Curvas carga/desplazamiento vertical registradas en el ensayo estático 20-95 kN para placas con distintos espesores.....	211
Figura 117: Curva desplazamiento/tiempo para placas de neumáticos con diversos valores de espesor.....	212
Figura 118: Resultados del ensayo estático 100-200 kN registrados para placas de asiento con diferentes espesores.	213
Figura 119: Resultados de rigidez dinámica y energía disipada (inversa) en el ensayo dinámico para placas de asiento con diferentes valores de espesor	214
Figura 120: Curvas carga-desplazamiento vertical medidas en el ensayo dinámico para placas con distintos espesores.....	215
Figura 121: Evolución de la energía disipada por ciclo durante los ensayos dinámicos para placas con distintos espesores.....	216
Figura 122: Esquema de los distintos neumáticos empleados para evaluar la influencia del tipo de neumático en la repetibilidad de resultados.....	217
Figura 123: Aspecto visual de placas de neumáticos con diferentes tratamientos. (a) sin tratamiento; (b) con resina epoxy; (c) con lámina de fibras de vidrio; (d) placa tras envejecimiento térmico.....	222
Figura 124: Resultados de rigidez medidos para las placas de neumáticos con distintos tratamientos.....	223
Figura 125: Resultados de energía disipada y deformación remanente para placas de neumáticos con diferentes tratamientos del material.....	224

Figura 126: Resultados de módulo estático para suelas de neumáticos con diferentes espesores.....	226
Figura 127: Curvas tensión/desplazamiento vertical medidas en los ensayos estáticos para suelas con diversos espesores.....	227
Figura 128: Resultados dinámicos para suelas con distintos valores de espesor.....	228
Figura 129: Desplazamiento resiliente medido para suelas con distintos espesores en los ensayos dinámicos a 5Hz (izquierda) y a 10 Hz (derecha)....	230
Figura 130: Resultados de energía disipada por ciclo medidos en los ensayos dinámicos a 5 Hz (izquierda) y a 10 Hz (derecha).....	230
Figura 131: Aspecto visual de la unión suela-hormigón (con textil embebido en el hormigón) tras el ensayo de arrancamiento.....	234
Figura 132: Tendencia del módulo estático de las mantas de neumáticos en relación a su espesor.....	235
Figura 133: Curvas tensión/desplazamiento vertical medido para mantas con distinto espesor en los ensayos estáticos.....	237
Figura 134: Resultados del módulo dinámico a diferentes frecuencias para muestras de mantas con distintos espesores.....	237
Figura 135: Influencia de la frecuencia de ensayo en las propiedades dinámicas de muestras de mantas de neumáticos.....	238
Figura 136: Influencia de la normativa utilizada para ensayo de laboratorio, en el módulo estático de mantas de neumáticos.....	239
Figura 137: Resultados de módulos dinámicos a distinta frecuencia, dependiendo de la normativa utilizada en la realización de ensayos.....	239
Figura 138: Curvas tensión/desplazamiento medidas en el ensayo estático (izquierda) y dinámico a 5 Hz (derecha) para muestras de mantas evaluadas de acuerdo a dos normativas diferentes.....	241
Figura 139: Comparación de las curvas carga/desplazamiento medidas antes y después del proceso de fatiga, en los ensayos de rigidez estática (izquierda) y dinámica (derecha).....	246
Figura 140: Variación de los resultados medidos para placas de neumáticos como consecuencia de distintos proceso de deterioro climático.....	247
Figura 141: Evolución del comportamiento dinámico de suelas de neumáticos durante el proceso de fatiga.....	248

Figura 142: Curvas tensión-desplazamiento medidas en ensayos estáticos (izquierda) y dinámicos a 5Hz de frecuencia (derecha).....	251
Figura 143: Variación del módulo estático y dinámico de muestras de mantas como consecuencia de la aplicación de distintos procesos de deterioro climático.....	252
Figura 144: Aspecto visual de los elementos elásticos utilizados en el estudio de su influencia sobre cajón de balasto.	254
Figura 145: Evolución de la rigidez del conjunto ante la incorporación de distintas soluciones elásticas.....	255
Figura 146: Influencia de los elementos de neumáticos en la energía disipada por ciclo de carga sobre el conjunto del cajón de balasto.....	255
Figura 147: Efecto de los elementos de neumáticos en el asiento del balasto.	256
Figura 148: Resultados de deformación de la zona superior e inferior de la traviesa al utilizar placas de neumáticos y placas de referencia.....	259
Figura 149: Aspecto visual del área de contacto entre un bloque de hormigón (que simula la traviesa) y el balasto (imagen de la izquierda) y entre el bloque con suela y el balasto (derecha).....	261
Figura 150: Comparativa entre el desplazamiento lateral de un bloque de hormigón con y sin suela sobre una capa de balasto.	262
Figura 151: Curvas de deformación vertical para placas de neumáticos con espesor próximo a 4,5 mm.....	265
Figura 152: Curvas carga/deformación vertical de placas con 9,0 mm de espesor. Ensayo desarrollado de acuerdo a la E.T. 03.324.005.0 de ADIF.....	265
Figura 153: Aspecto visual de las placas de neumáticos (izquierda) y placas comerciales (derecha) para su estudio como placas convencionales (A) y para Alta Velocidad (B).....	272
Figura 154: Curvas carga/desplazamiento para placas comerciales y placas de neumáticos para su uso en vías convencionales.....	274
Figura 155: Curvas carga/desplazamiento medidas para placas convencionales en el ensayo dinámico.....	275
Figura 156: Evolución de la rigidez dinámica y energía disipada acumulada para placas de neumáticos y placas comerciales para su uso en vías convencionales.	276
Figura 157: Curvas carga-desplazamiento medidas en ensayos estáticos para placas comerciales y placas de neumáticos para su uso en Alta Velocidad.....	279

Figura 158: Curvas carga/desplazamiento medidas en ensayos dinámicos desarrollados para placas de Alta Velocidad.....	280
Figura 159: Evolución del comportamiento dinámico de placas comerciales y placas de neumáticos aptas para su uso en Alta Velocidad.....	281
Figura 160: Aspecto visual del tipo de placas utilizadas en vías de EuskoTren (izquierda) y aspecto de placas de neumáticos usadas en el tramo de prueba (derecha).....	283
Figura 161: Resultados del comportamiento de las placas de referencia usadas por EuskoTren y de las placas de neumáticos utilizadas en el tramo de prueba.	283
Figura 162: Aspecto visual del tipo de placas de neumáticos con lámina de fibra, utilizadas en tramos de transición entre las secciones con placas de EuskoTren y la sección con placas de neumáticos sin tratar	284
Figura 163: Configuración del tramo de prueba con placas de asiento fabricadas a partir de capas de neumáticos fuera de uso.....	286
Figura 164: Aspecto visual de las placas de neumáticos dispuestas sobre las traviesas, antes del montaje en vía.....	287

INTRODUCCIÓN

INTRODUCTION

1. Introducción

1.1 Justificación de la tesis

El transporte por ferrocarril es concebido como un pilar básico en la movilidad de personas y mercancías, como resultado de una serie de ventajas competitivas frente a otros medios de comunicación, entre las que cabe destacar su capacidad de carga, reducido impacto ambiental, seguridad de viaje, y alta eficiencia energética. Además de estas características, el desarrollo tecnológico e innovador en el sector del ferrocarril durante las últimas décadas, ha permitido la implantación de la Alta Velocidad, reduciendo así el tiempo de viaje y mejorando la competitividad del transporte ferroviario. Todo esto ha impulsado al ferrocarril como elemento fundamental en el desarrollo de una sociedad global e interconectada.

No obstante, para mantener la importancia del transporte ferroviario y su efecto beneficioso en el desarrollo social, es necesario un continuo avance tecnológico y una mejora progresiva de las prestaciones de la infraestructura que permitan incrementar la velocidad de circulación de trenes, sin comprometer la seguridad y prestaciones de viaje. Así, dado que el aumento de velocidad lleva consigo el incremento de las sobrecargas dinámicas que solicitan la vía, se requiere mejorar sus prestaciones mecánicas y características de diseño.

Por otra parte, desde el punto de vista de la explotación de la vía, se hace imprescindible reducir o mitigar una serie de problemas asociados a la circulación de trenes (deterioro de la geometría de la vía, emisión de ruido y vibraciones, degradación de estructuras, fatiga de los componentes, etc.) que derivan en el incremento de costes de mantenimiento, y que en muchas ocasiones, limitan el efecto beneficioso del transporte por ferrocarril.

En este contexto, para que la importancia del transporte por ferrocarril siga creciendo dentro del ámbito económico y social, es necesario aumentar la durabilidad de la vía y su respuesta mecánica ante la circulación de trenes que transmiten mayores solicitaciones debido a su elevada capacidad de carga y/o a su alta velocidad. Para ello, un elemento que puede contribuir es la incorporación de componentes elásticos, dado que éstos pueden reducir problemas como la propagación de vibraciones y ruido, o la degradación de la vía gracias a una mejor distribución de cargas y descenso de las tensiones transmitidas a las capas inferiores. Además, el uso de estos elementos permite variar la rigidez del conjunto con el fin de conseguir un valor óptimo de este

parámetro, sin que esto derive en un descenso de la capacidad portante de la vía.

Los elementos elásticos utilizados de forma habitual en vías de ferrocarril sobre balasto, se disponen bajo diferentes componentes dentro de la superestructura, consiguiendo así una reducción de tensiones y de energía en distintos niveles de la vía. Estos elementos, conocidos como placas de asiento de carril, suelas bajo traviesa y mantas bajo balasto, son elaborados principalmente a partir de materiales elastoméricos con alta capacidad para deformarse, sin perder sus propiedades elásticas y mecánicas.

Sin embargo, el empleo de elementos elásticos da lugar a sobrecostes en la construcción de la vía debido al precio de estos materiales, incrementando así la inversión inicial necesaria para el desarrollo de líneas ferroviarias. Este hecho, junto con el establecimiento de diversas políticas centradas en el consumo racional de los recursos naturales y la reutilización de residuos, ha llevado al desarrollo de nuevos componentes elaborados a partir de materiales secundarios obtenidos en diversos sectores económicos.

Una solución común es la elaboración de elementos elásticos a partir de neumáticos fuera de uso, dado que éstos presentan adecuadas características elásticas y mecánicas, a la vez que se trata de un residuo abundante y difícil de eliminar de forma limpia. De esta forma, se evita la acumulación de estos residuos y se reduce el consumo de recursos naturales (polímeros) en la fabricación de componentes elásticos. La técnica habitual en el desarrollo de este tipo de materiales consiste en la trituración de los neumáticos, separando las partículas de caucho del resto de sus componentes, para posteriormente ser mezclado con una resina aglomerante. Sin embargo, esta técnica conlleva importantes costes económicos y medioambientales de producción, asociados a la necesidad de triturar los neumáticos fuera de uso, lo que además provoca la degradación de las propiedades intrínsecas de los neumáticos (resistencia a la tracción, resistencia al deterioro climático, elasticidad, capacidad de deformación, etc.).

Así, surge la motivación de esta tesis para el desarrollo de elementos ferroviarios a partir de las capas elásticas que componen los neumáticos usados, que pueden ser obtenidas mediante una tecnología que permite deconstruir los neumáticos en bandas, sin necesidad de triturar el material. De esta forma, además de los diversos beneficios de reutilizar los neumáticos usados, se obtienen componentes elásticos más competitivos desde un punto

de vista económico y medioambiental. Asimismo, es posible reciclar mayor cantidad de residuo que en el caso de la técnica habitual empleada para elaborar elementos elásticos a partir de polvo de neumáticos, a la vez que se aprovecha toda la tecnología contenida en los neumáticos.

Por otra parte, esta tesis doctoral surge en el marco del proyecto de investigación que lleva por título *“Diseño y Puesta en Valor Paneles Anti-vibración Fabricados con Material Secundario Procedente de Neumáticos Usados para su Aplicación en el Campo de las Infraestructuras Ferroviarias” (IPT 2011-1963-310000)*, cuyo periodo de realización comprende desde el año 2011 hasta el año 2014, dentro del Plan INNPACTO del Programa Nacional de cooperación Público-Privada.

1.2 Contenido de la tesis

El presente documento se estructura en ocho capítulos que recogen el trabajo desarrollado durante el transcurso de la tesis doctoral. Este primer epígrafe contiene una breve justificación de la motivación para desarrollar el presente estudio centrado en desarrollar elementos elásticos a partir de neumáticos deconstruidos, para su uso en vías ferroviarias. De igual modo, se recoge una breve descripción del contenido presentado en cada fase del documento.

En el capítulo 2, queda plasmado el estudio del estado del arte llevado a cabo con el fin de revisar los conocimientos acerca de la infraestructura ferroviaria y su respuesta ante el paso de los vehículos, así como las principales características, funciones y experiencias de los elementos elásticos utilizados en estructuras de ferrocarril. Con este objetivo, se recoge una breve descripción de la vía y los principales esfuerzos que la solicitan, describiendo su efecto sobre la respuesta del conjunto. De igual modo, este capítulo contiene el estudio de los principales problemas que pueden tener lugar en la infraestructura ferroviaria, y cómo éstos pueden ser mitigados o reducidos con la utilización de elementos elásticos, para los cuales se describen sus principales características y experiencias desarrolladas en el análisis de su comportamiento. En último lugar, se recoge el estudio del estado de conocimiento sobre neumáticos fuera de uso, y su aplicación en vías ferroviarias.

En un tercer capítulo, se presenta el objetivo principal perseguido en este trabajo de investigación, establecido a partir de la revisión del estado del arte. De igual manera, quedan plasmados diversos objetivos específicos formulados para la consecución del objetivo general de la tesis doctoral.

En el capítulo 4, se explica la metodología seguida para el desarrollo de diferentes elementos de neumáticos (placas de asiento, suelas bajo traviesa y mantas bajo balasto) para ser utilizados como componentes elásticos en distintos niveles dentro de la infraestructura de ferrocarril. Para ello, este epígrafe contiene una descripción de los materiales y del plan de ensayos llevado a cabo durante el transcurso de la tesis doctoral, con el fin de conseguir los objetivos establecidos a partir de la revisión del estado del conocimiento. Dentro del plan de trabajo, se recoge una serie de etapas de trabajo comunes para los distintos elementos elásticos estudiados.

Por otra parte, a partir del trabajo llevado a cabo de acuerdo a la metodología presentada, en un quinto capítulo se muestran los resultados obtenidos en las

diferentes etapas llevadas a cabo para el desarrollado de elementos de neumáticos y en el análisis de su comportamiento mediante ensayos de laboratorio. Además, durante la exposición de los resultados, se recoge el análisis de los mismos con el fin de conocer el diseño óptimo de estos materiales y su aptitud para ser empleados como componentes elásticos en diferentes tipo de vías de ferrocarril, así como un estudio llevado a cabo en un tramo de prueba a escala real.

Una vez analizados los resultados obtenidos en las distintas fases de estudio para los diferentes elementos elásticos desarrollados, en el capítulo 6 se presentan las principales conclusiones extraídas durante la realización del presente estudio, las cuales responden a los objetivos marcados al comienzo de la investigación.

Por su parte, se encuentra un séptimo capítulo que expone una serie de posibles líneas de investigación susceptibles de ser desarrolladas en futuros trabajos de investigación. Estas líneas surgen a partir de los conocimientos adquiridos en este estudio, y tratan de completar el conocimiento acerca de la respuesta de elementos de neumáticos usados como componentes elásticos en vías ferroviarias.

Finalmente, el documento acaba con las referencias bibliográficas consultadas durante el desarrollo de la tesis doctoral, y con un anexo en el que se describen los procesos llevados a cabo para la realización de los ensayos de laboratorio que permiten la evaluación de las propiedades de los materiales empleados en el desarrollo de los elementos elásticos.

1. Introduction

1.1 Justification of the PhD Thesis

Railway trains are an essential mean of communication for people and freight due to a series of competitive advantages in reference to other transports. Their load capacity, high efficiency and safety, combined with their minimal environmental impact have made trains one of the most important transports. In addition to these characteristics, during the last decades a great technologic and innovative development has been carried out with the implementation of high speed trains. Thus, the travel time has been reduced to make railway more competitive with other means of communication, allowing development of a global and interconnected society.

Although railway has advantages, with the aim of maintaining the importance of railway as fundamental mean of transport as well as its beneficial effect in the actual society, it is necessary a continuous technologic development and improvement of the infrastructure in order to allow increase in train speed without reducing safety and comfort. The increase in train speed leads to higher dynamic overloads on the railway track, which makes necessary to enhance its mechanical performance and its design characteristics.

Besides, during the track service there is a series of problems associated to the passage of trains (degradation of geometric quality of the track, propagation of waves and noise, deterioration and fatigue of components, etc.) whose effect must be reduced in order to avoid the increase in maintenance costs and the limitation of the benefits related to the railway transport.

In this context, it is necessary to enhance the durability of railroad tracks and its mechanical performance when trains circulating with high load capacity at high speed. With this purpose, an effective practice consists of introducing elastic elements into the track since these materials could reduce the effect of problems such as wave propagation, noise and components degradation due to a greater distribution of forces, and therefore, lower stress in the sub layers. In addition, elastic elements allow variation of the global vertical stiffness in order to obtain an optimal value for this parameter, maintaining appropriate track strength.

Elastic elements are frequently used in diverse positions of the railway superstructure in order to reduce the stress in different levels of the track as

well as the energy transmitted by the trains. Among the diverse types of elastic elements, the most commonly used are rail pads, under sleeper pads and under ballast mats, which are mainly composed by elastomeric materials with high capacity to deform without decreasing its elastic and mechanical properties.

However, the use of this type of components in railway tracks leads to over costs due to the price of these high performance materials, increasing therefore the initial invest need to the construction of railway infrastructures. This fact, join to the establishment of recent politics focus on the rational consumption of raw materials and the reuse of waste, has leaded to develop new elastic elements from resilient wastes generated in diverse industrial sectors.

In this sense, a common practice consists of manufacturing elements from end-of-life tires since this material present adequate elastic and mechanical properties at the same time that it is an abundant waste which is difficult to remove cleanly. Thus, this application makes possible to reduce the accumulation of these wastes as well as the consumption of raw materials during the production of elastic elements.

The main technique used to elaborate this type of components consists of crushing the tires and then classifying the different former materials in order to obtain separately the crumb rubber, which is mixed with a binder resin. However, this technique involves important economic and environmental costs associated to the tire crushing at the same time that the degradation of the main material characteristics (tensile resistance, climatic strength, elastic properties, deformation capacity, etc.) could take place.

As a result, the present thesis aims to develop elements to be used in railway track from the elastic layers that compose the end-of-life tires, which are obtained by an industrial process capable of deconstructing these wastes in layers without the need of grinding the material. Thus, in addition to the benefit of reusing end-of-life tires, the development of this type of elements could be a more economic and environmental competitive product at the same time that the consumption of waste material is higher than in the case of elements from crumb rubber with resin.

On the other hand, this thesis arises from a research project titled *“Diseño y Puesta en Valor Paneles Anti-vibración Fabricados con Material Secundario Procedente de Neumáticos Usados para su Aplicación en el Campo de las Infraestructuras Ferroviarias - Design of used tire pads to be utilized as anti-vibration systems in railway tracks”* (IPT 2011-1963-310000). This project, part

**Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso
para su Aplicación en Vías Ferroviarias**

of the INNPACTO plan of the National Spanish Program Public-Private Cooperation, has been developed in the period 2011-2014.

1.2 Content of the Thesis

The present document is composed of eight different chapters that collect the detailed work carried out during the thesis. This first chapter presents a brief justification and motivation of the study focused on the development of elastic elements from the layers that form the end-of-life tires to be used in railway tracks. In the same way, a brief description of the content of each part of the document is presented in this first chapter.

Chapter 2 collects a study of the state of the art carried out with the aim of reviewing the knowledge about railway infrastructures and its performance when trains passing as well as the main characteristics, functions and experiences on elements used as elastic components in railway tracks. With this purpose, in this second chapter is presented a description of the railway system and the forces that soliciting the track, analysing its effect on the track performance. On the other hand, it is collected the origin and effect of the main problems that can take place when trains circulating. In addition, the most effective solutions to reduce those problems are described, among which highlight the use of elastic elements. For this last solution, the main characteristics, studies and cases related to the performance of elastic elements in railway are collected. In a last part of this chapter, a state of the knowledge about end-of-life tires is presented as well as its application in railway tracks.

After the discussion of the literature, the main objective of the thesis is described in a third chapter, which also includes a series of specific goals stated in order to achieve the overall objective of the thesis.

Chapter 4 explains the methodology carried out with the aim of developing elastic elements from end-of-life tires to be used as components in railway tracks. Thus, this chapter contains the description of the raw materials and the testing plan followed during the thesis in order to achieve the objectives established from the revision of the literature. Among this testing plan, a number of common stages are presented to develop different elastic elements such as rail pads, under sleeper pads and under ballast mats.

From the study realized according to the methodology, a fifth chapter presents the results obtained in the different steps carried out to develop elastic elements from used tires and the analysis of its performance evaluated by laboratory tests. Besides, a discussion of the results is included with the aim of determining the optimal design of these components and its viability to be used

as elastic elements in different types of railway tracks, collecting as well a study of the use of tire elements in a real scale section.

Once the results are analysed for the development of different types of elastic elements from used tires, chapter 6 lists the main conclusions extracted during the course of the present study, which response to the objectives stated at the beginning of the research.

From the knowledge acquired during the course of the present thesis, chapter 7 exhibits a series of possible future lines of research susceptible of being carried out to complete the study of the elastic elements from used tires applied as components in railway infrastructures.

Finally, the bibliography cites used during the progress of the thesis are presented in a last chapter (number 8). In addition, an annex is collected at the end of the document to describe the process of the different laboratory tests carried out to evaluate the properties and performance of the materials used during the development of elastic components for railway tracks.

Estado del Arte

State of the Art

2. Estudio del Estado del Arte

2.1 Estructura ferroviaria

Para el estudio y desarrollo de componentes elásticos ferroviarios, tema principal del presente trabajo de investigación, es necesario conocer las características del sistema en el que van a ser utilizados, así como las sollicitaciones a las que van a estar sometidos. De esta forma, en este primer epígrafe del estado del arte se recoge una descripción general de la estructura ferroviaria, y los principales esfuerzos que tienen lugar como consecuencia del paso de vehículos por la vía.

2.1.1 Descripción de la vía

La infraestructura ferroviaria tiene por objeto guiar la circulación de los vehículos de forma segura, y eficiente desde un punto de vista temporal y económico, sin dejar de lado el aspecto medioambiental. Para ello, la vía de ferrocarril se compone de un conjunto de elementos dispuestos a lo largo de la pista de manera que se consigue una estructura estable y duradera en el tiempo, a partir de una adecuada distribución de la carga procedente del paso de los trenes.

Dentro del sistema del ferrocarril se pueden distinguir fundamentalmente dos tipos de infraestructuras, la vía tradicional y la vía en placa. Esta última tipología (Figura 1), cuyo origen se sitúa en los años 60 cuando la antigua "Japanese National Railways" generalizó el uso de este tipo de estructura en Japón, se caracteriza por el empleo de una losa de hormigón como soporte de los elementos de guiado para los vehículos.



Figura 1: Vía en placa en una sección en túnel (Pañero, 2006).

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Dada la rigidez vertical del sistema de vía en placa, se utilizan de forma habitual elementos elásticos, los cuales pueden ser utilizados en distintos niveles dentro de la estructura. Así, atendiendo al número y disposición de los elementos elásticos, se pueden obtener diversos tipos de vía en placa, clasificados según muestra la Tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de vía en placa según los niveles elásticos (Pañero, 2006).

Clasificación de la vía en placa <i>(según niveles elásticos)</i>						
Niveles de elementos elásticos	<i>1 nivel elástico</i>	Carril embebido	Apoyo directo del carril			
	<i>2 niveles elásticos, sin bloque intermedio</i>		Apoyo indirecto del carril	Monolítica con traviesas	Traviesas apoyadas sobre losas	Losa apoyada con mortero no elástico
	<i>>2 niveles elásticos</i>		Bloques recubiertos de elastómero	Traviesas recubiertas de elastómero	Losa flotante con traviesas	Losa flotante sin traviesas

Por otro lado, la vía ferroviaria sobre balasto, tipología en la que se centra el presente estudio de investigación, consiste en un medio granular sobre el que apoya el emparrillado superior formado por los carriles y las traviesas. Este sistema ha sido tradicionalmente el más utilizado debido a una serie de ventajas frente a la vía en placa, como puede ser su menor coste de construcción y mayor capacidad para amortiguar las cargas y vibraciones transmitidas al terreno (Selig y Waters, 1994; Esveld, 2001).

Los componentes que forman la estructura de la vía sobre balasto pueden ser clasificados dentro de dos grupos atendiendo a la posición que ocupan dentro del sistema (Figura 2): superestructura y subestructura. La superestructura está formada por los elementos que reciben de forma más directa las cargas procedentes del paso de los vehículos, pudiendo distinguir entre carril, sistema de sujeción del carril, traviesas, balasto, y de forma cada vez más habitual, elementos elásticos. Por otra parte, la subestructura está compuesta por el subbalasto y un conjunto de capas de asiento (entre las que se encuentra la capa de forma, normalmente compuesta por material granular de menor tamaño que las partículas de balasto) sobre las que descansan los componentes de la superestructura, teniendo como principal objetivo el reparto de las cargas transmitidas a la plataforma de la estructura ferroviaria (Dahlberg, 2003; Ferreira, 2010).

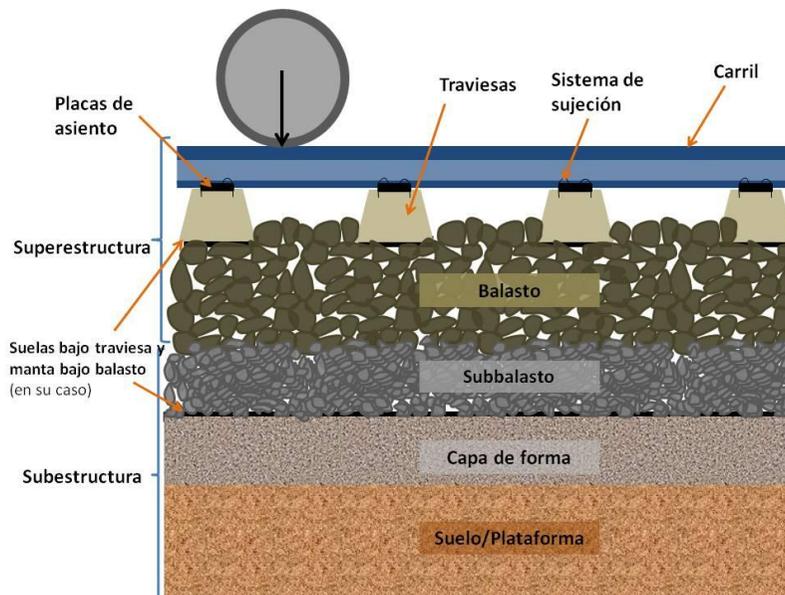


Figura 2: Estructura tradicional sobre balasto (Elaboración propia).

El carril, compuesto de acero, es el elemento utilizado como dispositivo de guiado para el material rodante, sirviendo de soporte para parte de las acciones dinámicas generadas por la velocidad de circulación de los trenes. Su resistencia y rigidez deben de ser adecuadas para mantener constante la geometría de la vía, y proporcionar un sistema de rodadura suave (Selig y Waters, 1994; Kaewunruen y Remennikov, 2008a). En Europa, los tipos de carril más utilizados en vías ferroviarias son el UIC 54 y UIC 60, (el número la masa de este elemento por metro de longitud). En vías de alta velocidad, el carril más utilizado es el de mayor peso debido a la necesidad de aumentar la inercia para incrementar así su resistencia a flexión, y poder soportar mayores solicitaciones sin que se deteriore la calidad geométrica de la vía (Ruano Gómez, 2007; Dahlberg, 2007).

Respecto a la traviesa, este es el elemento que, situado en dirección transversal al eje de la vía, transmite los esfuerzos verticales, laterales y longitudinales procedentes del carril, a la capa de balasto, permitiendo la nivelación y alineación de la pista. Actualmente, las traviesas más empleadas en líneas europeas de nueva construcción son las tipo monobloque de hormigón, dado que éstas tienen mayor peso (en torno a 400 kg) que las bibloque (alrededor de 300 kg), por lo que proporcionan mayor estabilidad a la vía. No obstante, las bibloque también son muy empleadas en algunos países, como Francia (Ferreira, 2010; Dahlberg, 2007).

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Para unir los dos componentes anteriores se emplean los sistemas de sujeción, los cuales están formados por diversos elementos que fijan el carril a la traviesa, asegurando la posición y geometría del mismo, así como el ancho de la vía. Las sujeciones pueden clasificarse atendiendo a la disposición de los elementos que las componen, como directas (la función de fijar el carril es realizada por un único conjunto de elementos), indirectas (existen dos conjuntos independientes, uno para sujetar el carril, y otro para fijar el sistema de sujeción a la traviesa) o mixtas.

Por otra parte, en relación a la naturaleza de los elementos de la sujeción, se puede dividir en rígida o elástica, siendo esta última la más empleada en vías con traviesas de hormigón, y en particular, en líneas de alta velocidad, dado que permiten mayor amortiguación de movimientos del sistema y una circulación más suave de los vehículos, a la vez que cuentan con mayor vida útil (Carrascal, 2006). Dentro de los diversos tipos de sistemas, cabe destacar la sujeción tipo Vossloh (empleada de forma habitual en vías de alta velocidad en España y Alemania), Nabla y Pandrol (empleadas en diversas líneas ferroviarias, como vías de alta velocidad francesas).

Los componentes anteriores de la superestructura apoyan sobre una capa formada por material granular (piedra triturada), conocida como balasto, la cual proporciona estabilidad vertical y lateral a la vía. Las partículas de balasto deben ser resistentes a la fragmentación, teniendo un tamaño comprendido entre 22,4 y 60,0 mm. Respecto al conjunto, la capa de balasto cuenta con un espesor bajo las traviesas próximo a 30 cm (siendo recomendado un espesor mínimo de 20-25 cm, dependiendo de las características de la vía) aunque se llegan a espesores de hasta 50 cm con el fin de rodear las traviesas con material granular, proporcionando mayor resistencia lateral al sistema (UIC Code 719-1, 2011).

Con el incremento de la velocidad de circulación de los trenes, así como de la carga transportada por éstos, han ido aumentándose las exigencias de la capacidad portante de la estructura ferroviaria, de forma que es necesario disponer bajo la traviesa no sólo el balasto directamente sobre la plataforma, sino también un conjunto de capas intermedias que permitan mejorar la distribución de las presiones (López Pita, 2006). Este tipo de capas son las denominadas capas de asiento, las cuales forman parte de la subestructura. Este hecho, tal y como muestra la Figura 3, se vio acentuado con el desarrollo de la Alta Velocidad.

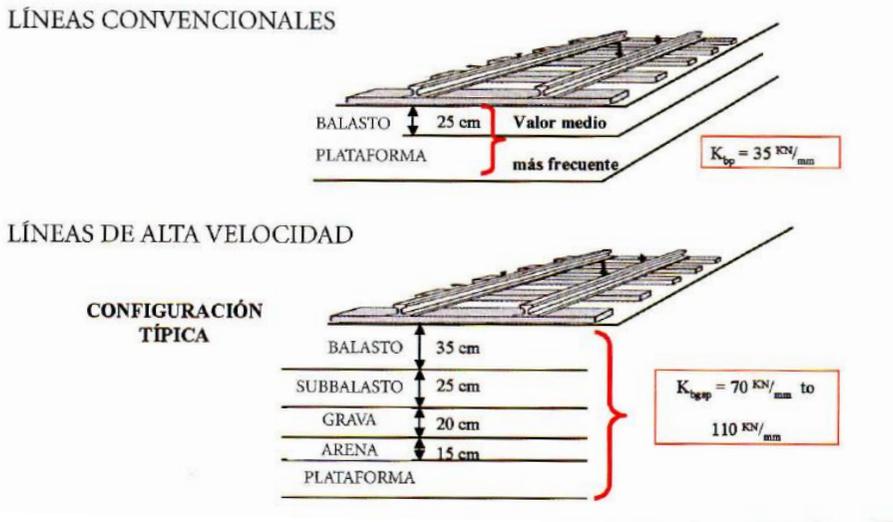


Figura 3: Configuraciones típicas de las capas de asiento en líneas convencionales y en líneas de Alta Velocidad (López Pita, 2006).

Esta tendencia, junto con el uso generalizado de las traviesas de hormigón, ha llevado a un importante incremento de la rigidez del sistema, siendo así necesario introducir componentes elásticos (o modificar sus propiedades) que permitan reducir el incremento de sobrecargas dinámicas provocado por dicho aumento de rigidez de la vía (López Pita, 2006).

Dentro de las distintas posibilidades para incorporar elementos elásticos, los más utilizados son las placas de asiento (dispuestas entre el carril y las traviesas), suelas bajo traviesa y mantas elásticas bajo la capa de balasto (Figura 4). Además, estos materiales elásticos son empleados para mitigar o reducir otros problemas existentes en la infraestructura ferroviaria, tal y como se verá a lo largo de esta tesis doctoral.



Figura 4: Aspecto visual de placa de asiento (izquierda), suela bajo traviesa (centro) y manta bajo balasto (derecha) (UIC Project, 2006; Kaewunruen y Remennikov, 2009; Bongini, 2012).

2.1.2 Esfuerzos transmitidos a la vía

Para el estudio del comportamiento de los materiales de la infraestructura ferroviaria, es imprescindible conocer los esfuerzos transmitidos a través de la sección transversal de la vía de ferrocarril. Para el análisis del efecto de las cargas, es necesario conocer el origen y las características de éstos. Así, una posible clasificación de los distintos esfuerzos puede realizarse atendiendo a su naturaleza, distinguiendo entre cuasi-estáticas, y dinámicas. Las cargas cuasi-estáticas son las correspondientes al peso y mercancía de los vehículos, la fuerza centrífuga al paso del tren por un tramo en curva, y acciones exteriores como puede ser el viento transversal a la vía o los cambios de temperatura.

En relación a las cargas dinámicas, éstas son las causadas por la aplicación de una masa a una velocidad determinada, siendo éstas incrementadas como consecuencia de la presencia de irregularidades en las vías (defectos del carril o variaciones de rigidez), discontinuidades (soldaduras de carril, cambios de vías, etc.) y defectos de los vehículos (defectos en las ruedas, oscilaciones naturales, etc.) (Carrascal, 2006).

Por otra parte, los distintos esfuerzos generados por el paso de los vehículos pueden ser clasificados según su dirección de actuación sobre el carril, distinguiendo entre verticales, transversales y longitudinales, tanto para las acciones del tráfico como de los agentes climáticos (Figura 5).

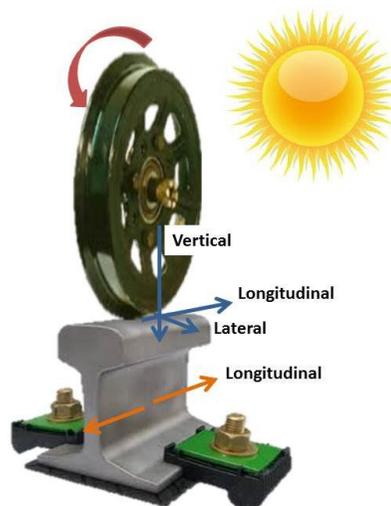


Figura 5: Esquema de esfuerzos que solicitan la vía ferroviaria (Elaboración propia).

Cada uno de estos tipos de solicitaciones tiene un efecto sobre el comportamiento del sistema de ferrocarril (Giannakos, 2004), pudiendo verse influenciados por las características de la vía y de los vehículos, así como por las condiciones de circulación, como puede ser la velocidad de paso de los trenes. En este contexto, diversos autores han analizado el efecto de los distintos tipos de esfuerzos, planteando formulaciones que tratan de predecir las características de los mismos, generalmente realizando estos estudios de forma independiente para cada esfuerzo (vertical, transversal o longitudinal).

2.1.2.1 Esfuerzos verticales

Las solicitaciones verticales son generadas principalmente por el peso de los trenes, al cual hay que sumarle la carga transportada. Además, los esfuerzos verticales son incrementados como consecuencia de la velocidad de circulación, dado que la carga móvil provoca unas solicitaciones dinámicas que son superiores a las consideradas en reposo. Los esfuerzos verticales son los más importantes debido a que son los de mayor magnitud, pudiendo dar lugar al fallo de la vía o al asiento de la misma. De esta forma, a la hora de diseñar la vía y sus componentes es importante conocer la distribución de los esfuerzos verticales a través de la sección de la pista. Así, la Figura 6 muestra un ejemplo de distribución, de acuerdo con Esveld (2001), de una carga de 200 kN por eje, lo que supone un esfuerzo de 100 kN por rueda.

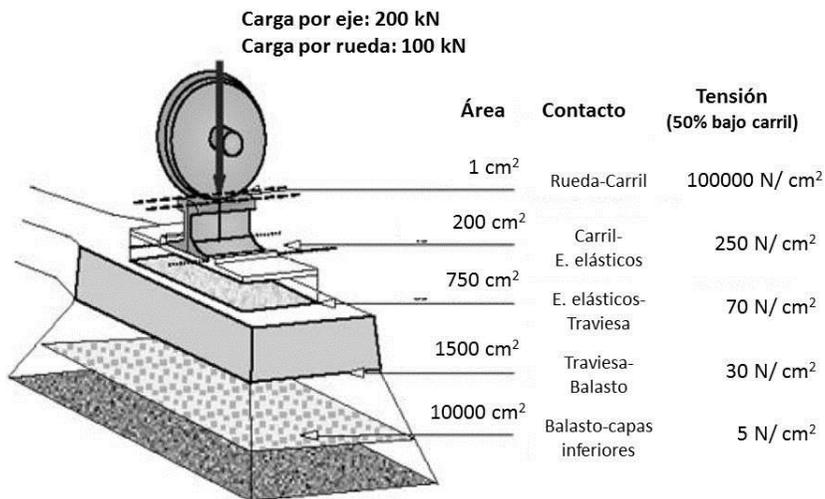


Figura 6: Representación de la distribución de esfuerzos a través de la vía (Esveld, 2001).

En Europa, la carga estática máxima por eje de los trenes que circulan por las líneas convencionales, es limitada a 225 kN. Este valor de carga es sólo

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

alcanzado por los vehículos destinados al transporte de mercancías o por las locomotoras, dado que para el transporte de pasajeros la carga máxima de los vehículos no suele superar los 150 kN por eje. No obstante, estos límites son establecidos para líneas donde la velocidad de circulación es inferior a 200 km/h, ya que para vías de Alta Velocidad (superior a 250 km/h), el máximo valor permitido es de 170 kN por eje, tratando así de reducir los daños provocados a la vía (Teixeira et al, 2008; Ferreira, 2010).

A pesar de estas limitaciones de carga estática, en el transporte ferroviario se debe de tener en cuenta la amplificación de los esfuerzos estáticos del contacto rueda-carril como consecuencia del efecto dinámico. En este sentido, diversos autores como López Pita (1982) y administraciones ferroviarias (Deutsche Bahn; comité D-71 de la O.R.E., 1968), han propuesto diferentes coeficientes de mayoración de las cargas en régimen dinámico, en función de la velocidad de circulación. Actualmente, para el diseño de vías convencionales con velocidad de proyecto igual o inferior a 200 km/h, sigue siendo de utilidad la formulación (Ecuación 1) propuesta por Eisenmann (1970). La generalización del uso de esta expresión matemática es debido a que ha sido ampliamente probada su aptitud mediante datos experimentales recogidos en diversas líneas ferroviarias.

$$C_d = 1 + t * s * \varphi \quad (1)$$

siendo:

t: factor de confianza estadística

t = 1 para el 68,3% de los casos

t = 2 para el 95,5% de los casos

t = 3 para el 99,7% de los casos

s: factor dependiente de la calidad de la infraestructura

s = 0,1 para vías en muy buen estado

s = 0,2 para vías en buen estado

s = 0,3 para vías en mal estado

φ : factor dependiente de la velocidad de circulación

$\varphi = 1$ para $V \leq 60$ km/h

$$\varphi = 1 + \frac{V-60}{140} \text{ para } V \leq 60 \text{ km/h}$$

Además, como consecuencia de la implantación de la Alta Velocidad, Eisenmann (1993) modificó la forma de calcular (Ecuación 2) el parámetro dependiente de la velocidad de los trenes (φ), pudiendo así calcular la mayoración de cargas dinámicas para velocidades superiores a 200 km/h.

$$\varphi = 1 + \frac{V-60}{380} \quad (2)$$

Por otra parte, debido a las dispersiones en las mediciones experimentales de las sobrecargas dinámicas según la última formulación de Eisenmann, los ferrocarriles franceses (SNCF) desarrollaron una campaña de estudios teóricos y experimentales para analizar con mayor detalle la influencia de distintos factores en las sobrecargas dinámicas. En estos estudios, Prud'homme (1970) tuvo en cuenta que la frecuencia propia oscilante de las cargas no suspendidas (aquellas que inciden directamente sobre el carril sin pasar por ningún tipo de suspensión, como son las cargas procedentes de los ejes, cajas de grasa y todo o parte del peso de los motores y/o de la transmisión de los vehículos) es sustancialmente superior a la propia de las masas suspendidas (las que pasan por el sistema de amortiguación de los trenes).

Así, Prud'homme (1970) desarrollo una formulación (Ecuación 3) específica para el cálculo de las sobrecargas dinámicas producidas por las masas no suspendidas del vehículo, las cuales están influenciadas por los defectos de la vía.

$$\sigma_{(\Delta Q_{NS})} = 0,45 * \frac{V}{100} * b * \sqrt{m_{NS} * k * \gamma(\varepsilon)} \quad (3)$$

siendo:

$\sigma_{(\Delta Q_{NS})}$: desviación típica de las sobrecargas dinámicas debidas a las masas no suspendidas del vehículo.

V: velocidad de circulación (km/h)

b: variable relacionada con los defectos de la vía y del vehículo.

M_{ns} : masa no suspendida del vehículo (t)

k: rigidez vertical de la vía (t/mm)

$\gamma(\varepsilon)$: amortiguación de la vía.

De igual modo, este autor, también propuso el empleo de una relación empírica para la estimación de las sobrecargas dinámicas provocadas por las oscilaciones de las masas suspendidas:

$$\sigma_{(\Delta QS)} = \alpha * Q_n \quad (4)$$

donde:

$\sigma_{(\Delta QS)}$: desviación típica de las sobrecargas dinámicas debidas a las masas suspendidas del vehículo.

α : coeficiente que varía entre 0,11 (material remolcado) y 0,16 (material motor convencional).

Q_n : carga estática por eje transmitida por los vehículos.

A partir de estas ecuaciones, se puede obtener la desviación típica de las sobrecargas dinámicas totales a partir de la suma de las sobrecargas debidas a las masas suspendidas y a las masas no suspendidas, siendo esta formulación verificada por diversos ensayos desarrollados en la línea de alta velocidad entre Paris y Lyon. Así, esta expresión es la utilizada de forma habitual para predecir los esfuerzos dinámicos transmitidos a las vías de ferrocarril donde la velocidad de circulación excede los 200 km/h.

2.1.2.2 Esfuerzos transversales

Las solicitaciones transversales pueden ser generadas como consecuencia del deterioro de la vía (provocando un movimiento oscilatorio de los trenes a lo largo de la infraestructura, conociendo este fenómeno como movimiento en lazo), por la fuerza centrífuga producida por el paso en curva de los vehículos, o por asimetría de las ruedas o ejes de los trenes, teniendo además en cuenta el efecto de la conicidad de las ruedas de los trenes, y la propia geometría de los carriles. Así, dada la diversidad del origen de las excitaciones laterales que tienen lugar en la circulación de los vehículos a lo largo de la vía, el análisis de las acciones transversales constituye un problema de gran complejidad (López Pita, 2006).

A partir de estudios realizados por la SNCF francesa, se consideró el esfuerzo transversal (representado como H_s) como la suma de dos términos, uno de ellos debido a la fuerza centrífuga en curvas (H_c), y el otro (H_a) como resultado de los esfuerzos generados de forma aleatoria debido a los defectos existentes a lo largo de la vía. El primer término (H_c), se puede calcular (Ecuación 5) a partir del peralte (elevación del carril exterior de la curva) y radio de curva, así como

la geometría de la vía y la velocidad de circulación de los trenes, siendo estos factores establecidos a partir de la consideración de la aceleración que recibirán los pasajeros.

$$H_c = \alpha \left[\frac{PV^2}{127R} - \frac{Ph}{S} \right] \quad (5)$$

donde:

P: peso por eje de los vehículos (t)

V: velocidad de circulación (km/h)

h: es el peralte de la vía (mm)

S: separación entre los ejes de los carriles (mm)

R: radio de la curva (m)

α : ángulo de inclinación de la vía respecto a la horizontal (°)

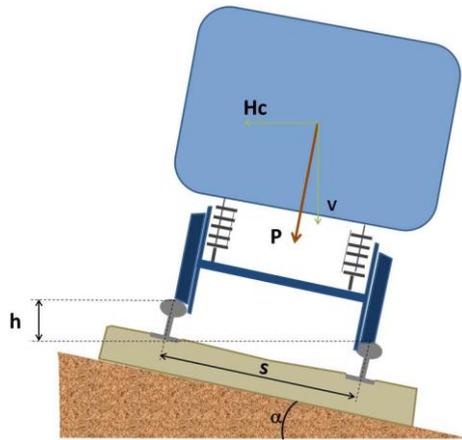


Figura 7: Esquema de las principales fuerzas que tienen lugar en el vehículo a su paso por un tramo en curva (Elaboración propia).

En el segundo caso (H_a), a pesar de la existencia de diversas formulaciones que tratan de estimar los esfuerzos transversales provocados por defectos de la vía (López Pita, 2006), no existe una expresión generalizada que relacione el esfuerzo ejercido sobre la vía con las características constructivas de los vehículos y con la calidad de cada vía. No obstante, suele ser empleada la Ecuación (6) como límite superior de los esfuerzos encontrados para distintos vehículos sobre distintas vías.

$$H_a < \frac{PV}{1000} \quad (6)$$

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

De esta forma, se debe de garantizar que la resistencia de la vía es superior a los límites de esfuerzos obtenidos de la siguiente forma:

Alineación recta:

$$\frac{PV}{1000} < \text{resistencia vía} \quad (7)$$

Alineación curva:

$$\frac{PV}{1000} + \alpha \left[\frac{PV^2}{127R} - \frac{Ph}{S} \right] < \text{resistencia vía} \quad (8)$$

Además de estas formulaciones, los esfuerzos transversales ejercidos por los vehículos ferroviarios han sido medidos en diversas líneas con el fin de conocer la magnitud y efecto de dichas cargas. Un ejemplo de ello se muestra en la Figura 8, la cual representa los esfuerzos transversales medidos para el ICE en función de la velocidad de circulación del mismo.

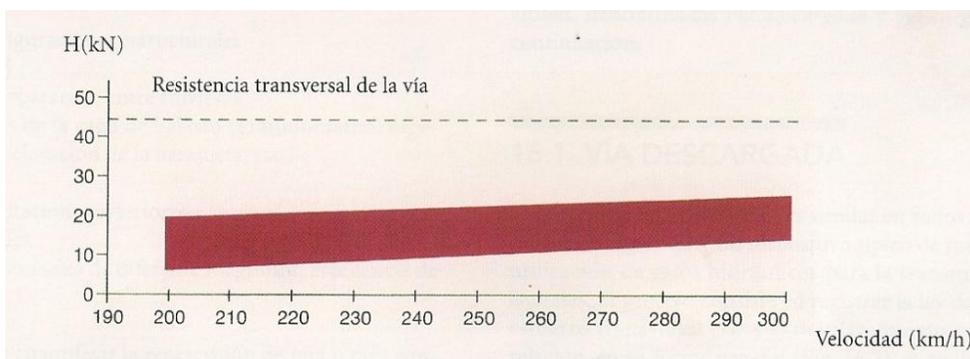


Figura 8: Nivel de esfuerzos laterales que solicitan la vía en función de la velocidad de los trenes (extraído de López Pita, 2006).

2.1.2.3 Esfuerzos longitudinales

Por otra parte, las solicitaciones longitudinales son generadas principalmente por los esfuerzos de tracción y frenado de los trenes, a lo que hay que añadirle los efectos de las variaciones climáticas, los cuales pueden provocar movimientos de carril como consecuencia de la dilatación y contracción del acero (Ferreira, 2010).

Respecto a los esfuerzos provocados durante las fases de arrancado y frenado de los vehículos, diversas medidas tomadas por distintas administraciones ferroviarias han puesto de manifiesto que estas fuerzas son prácticamente

despreciables en comparación con los que tienen un origen térmico, asociados a las variaciones de temperatura (López Pita, 2006).

Prud'homme (1962), para el caso de la vía sobre carril continuo soldado, consideró que el esfuerzo térmico puede dar lugar a un alargamiento de la barra igual al obtenido a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta L = \alpha * \Delta t * dl \quad (9)$$

siendo:

α : coeficiente de dilatación. Para el caso del acero, el valor se sitúa entre 10,5 y 11,5x10⁻⁶ (°C⁻¹)

Δt : cambio de temperatura (°C)

dl : variación de la longitud de un elemento de la barra (m)

Para evitar el alargamiento de la barra, se debe de ejercer una fuerza longitudinal (F) sobre la sección del carril, que produciría un acortamiento igual a:

$$\Delta L = \frac{F dl}{ES}, \text{ dado que } \sigma = \frac{F}{S} = E \frac{\Delta L}{dl} \quad (10)$$

Así, para obtener una variación nula de la longitud del carril, el esfuerzo que resta la acción térmica se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

$$F = E * S * \alpha * \Delta t \quad (11)$$

donde:

F: esfuerzo que anula la acción térmica (t)

E: módulo de elasticidad del carril (2x10⁶ kg/cm²)

S: sección transversal del carril (cm²)

Dado que los carriles se colocan a una temperatura tal que la variación térmica máxima esperada no supere los 45°C, el esfuerzo longitudinal máximo esperado para una vía con carril tipo UIC 54 (sección de 69,34 cm²) es de 65 t, y para el caso del carril UIC 60 (76,86 cm²) es de 72 t.

Estos esfuerzos deben de ser principalmente absorbidos por el sistema de balasto, impidiendo que el conjunto traviesas-carril se desplace longitudinalmente. De acuerdo con múltiples medidas realizadas en vías sobre balasto, han mostrado que para el caso más desfavorable (vía desconsolidada),

la resistencia es próxima a 250 kg/ml, mientras que este valor asciende a 600 kg/ml para el caso de vía consolidada. De esta forma, la resistencia longitudinal de la vía es función de la longitud del carril. Para garantizar la estabilidad de la vía, se debe cumplir que la resistencia es mayor a la sollicitación longitudinal:

$$r * x > E * S * \alpha * \Delta t \quad (12)$$

siendo:

r: la resistencia longitudinal de la vía (dependiendo de si se trata de vía consolidada o desconsolidada)

x: longitud de vía que se dilata, conocida como zona de respiración.

2.2 Principales problemas en la estructura ferroviaria

A pesar de las ventajas que ofrece el transporte por ferrocarril (alta capacidad de carga y velocidad de circulación, reducido impacto ambiental, etc.) frente a otros medios de comunicación, éste no queda exento de dificultades técnicas y problemas que son necesarios de mitigar. Entre los diversos problemas que pueden tener lugar en el sistema de ferrocarril, en esta tesis doctoral se recogen aquellos relacionados con el comportamiento de la vía ante el paso repetido de los vehículos, resaltando los aspectos en los que los elementos elásticos pueden tener mayor influencia.

Dentro de los diversos problemas asociados al paso de los trenes a través de infraestructura ferroviaria, se describe el origen, efecto y consecuencias derivadas del deterioro de la geometría de la vía, transmisión de vibraciones al terreno y emisión de ruido, tratando de identificar el posible efecto beneficioso de emplear elementos elásticos como medida preventiva para estos problemas.

2.2.1 Deterioro de la calidad geométrica de la vía

De acuerdo con los autores Nielsen et al. (2003) y Teixeira (2003), existen diversos tipos de deterioro de la pista ferroviaria, los cuales tienen distinto origen y provocan diferentes mecanismos de daño o fallo del sistema. A partir de la literatura revisada, en esta tesis doctoral se propone una posible clasificación de los principales tipos de deterioro atendiendo a los componentes de la infraestructura implicados, de acuerdo con la Tabla 2.

Tabla 2: Clasificación de los tipos de deterioro en función de los componentes ferroviarios implicados (Elaboración propia).

Componente ferroviario	Fallo/deterioro	Causa	Efecto
Carril	<i>Defectos localizados</i>	-Deslizamiento rueda-carril -Cargas de impacto -Contacto irregular rueda-carril	-Vibraciones de onda corta -Incremento de esfuerzos (cargas de impacto)
	<i>Defectos periódicos</i>	-Cargas dinámicas -Cambios temperatura	-Transmisión de ondas y ruido
Sistema de sujeción	<i>Fatiga</i>	-Acciones dinámicas (verticales y transversales)	-Reducción de estabilidad -Pérdida de geometría
Traviesa	<i>-Fisuración (bajo carril o zona central) -Fatiga</i>	-Cargas dinámicas -Cargas de impacto	-Reducción resistencia vertical y lateral -Pérdida de geometría
Balasto y capas de asiento	<i>-Deformación vertical/asiento</i>	-Deformación de la plataforma -Degradación de las partículas granulares -Cargas repetidas	-Pérdida de geometría -Descenso capacidad portante del sistema

El primer ámbito es el correspondiente al deterioro asociado al carril, dentro del cual destacan los defectos localizados provocados por fenómenos como el patinado de las ruedas de los vehículos (durante el arranque o frenado), el golpeo de partículas de balasto u otros objetos, o la propia acción dinámica de las ruedas. Este tipo de deterioro provoca principalmente el aumento de vibraciones de onda corta transmitidas al terreno, así como la generación de cargas de impacto de elevada magnitud. Para mitigar estos defectos, se emplean los vehículos de amolado, que son aquellos que mediante muelas permiten eliminar una capa delgada del carril, devolviendo a éste una superficie lisa y homogénea.

De igual modo, debido a la aplicación periódica de cargas, se produce la ondulación de la superficie de los carriles, lo que lleva al movimiento oscilatorio de los vehículos. Este fenómeno también puede ser provocado por la dilatación de los carriles, dando lugar a la deformación de los mismos. Estas formas de deterioro del carril causan el incremento de transmisión de ondas largas al terreno, así como una circulación incómoda de los vehículos que lleva a la reducción del confort de los pasajeros. Para reducir estos problemas, una solución apropiada puede ser un diseño adecuado de las características de las

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

placas de asiento utilizadas (Egana et al., 2006), lo cual también puede reducir los defectos localizados en el carril, disminuyendo así el número de tareas paliativas relacionadas con los vehículos de amolado.

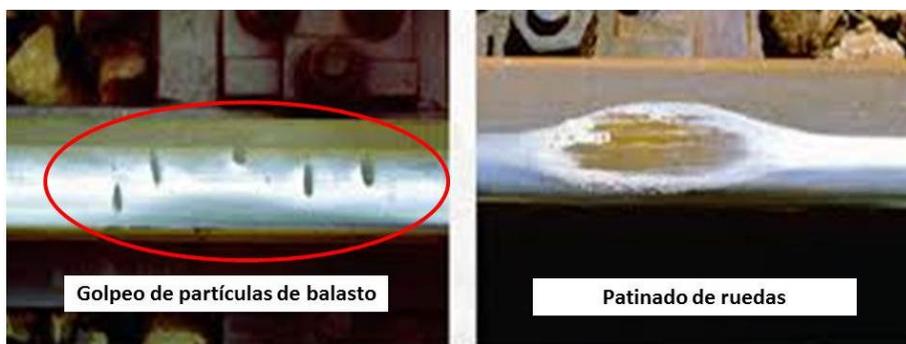


Figura 9: Aspecto visual de algunos tipos de defectos en carriles (elaboración propia a partir de [venzario.wordpress](http://venzario.wordpress.com)).

En relación a las traviesas y los sistemas de sujeción, éstos no sufren en general deterioros relevantes a no ser que se produzcan problemas como el descarrilamiento de vehículos (López Pita, 2006). No obstante, estos componentes pueden fallar por fatiga como consecuencia de la aplicación repetida de cargas dinámicas, provocando la fisuración del hormigón en las traviesas (bajo la sección del carril o en la parte central de las traviesas) o la pérdida de fuerza de apriete de las sujeciones, derivando en ambos casos en posibles descarrilamientos de vehículos, cargas de impacto por irregularidades, etc. Como principal solución, debido a su baja frecuencia de deterioro en relación al resto de tareas de conservación, la solución más eficiente y efectiva es la sustitución de estos componentes ferroviarios para evitar defectos geométricos y problemas de seguridad. No obstante, la introducción de elementos elásticos en la infraestructura ferroviaria puede reducir el deterioro de estos elementos debido al descenso de tensión ejercida sobre éstos (Giannakos, 2010).

Por parte del deterioro asociado a las capas granulares, éste tiene una importante influencia en la pérdida de la calidad geométrica de la vía. Este tipo de deterioro está principalmente asociado al asiento de las capas granulares como consecuencia de las deformaciones en la plataforma de la infraestructura, o incluso por el descenso de capacidad portante de dichos medios granulares debido a la pérdida de contacto entre partículas o la propia trituración de las mismas provocada por la aplicación repetida de cargas.

La deformación del balasto y de las capas de asiento es uno de los problemas de mayor interés dentro de la explotación ferroviaria, dado que es un factor fundamental para la correcta circulación de trenes, lo que provoca una continua necesidad de mantenimiento de la vía. Como se verá a lo largo de la tesis, para reducir la necesidad y frecuencia de las tareas de mantenimiento, una posible solución es reducir la tensión en las capas granulares mediante la introducción de elementos elásticos.

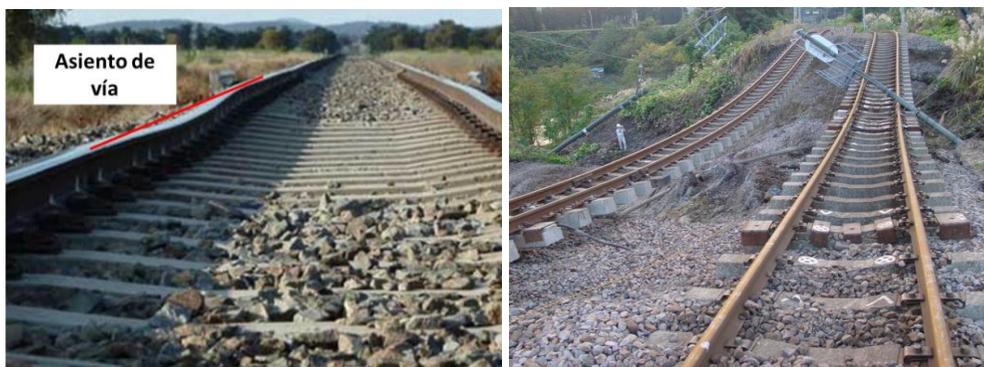


Figura 10: Problemas de asiento (izquierda) o pérdida de capacidad portante (derecha) de la vía (elaboración propia a partir de www.atsb.gov.au y www.geerassocia.com).

Dentro de los distintos fenómenos de deterioro de la calidad geométrica, los defectos causados por el asiento de las capas granulares dispuestas como capas de asiento son los más notables en la variación de los parámetros geométricos de la vía. El asiento producido en las capas granulares es la suma de la reducción de espesor de cada una de estas capas (generalmente, balasto, subbalasto y capas de formación). Sin embargo, de acuerdo con Selig y Waters (1994), la capa de balasto es el elemento con mayor contribución a los asientos de la vía (Figura 11), provocando ésta una deformación de hasta el 50-70% del total.

De esta forma, diversos autores (Selig y Waters, 1994; Suiker, 2002; Bhanitiz, 2007; Kennedy, et al. 2013) han centrado sus estudios en analizar el comportamiento de la vía ante los asientos permanentes del balasto, los cuales se ven influenciados por diversos factores como son el nivel de tensión transmitido a la capa de balasto, la densidad del balasto, gradación del mismo, contenido de finos, tamaño máximo de árido, historia de tensiones, humedad, etc. (Indraratna, 2006; Bhanitiz, 2007).

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

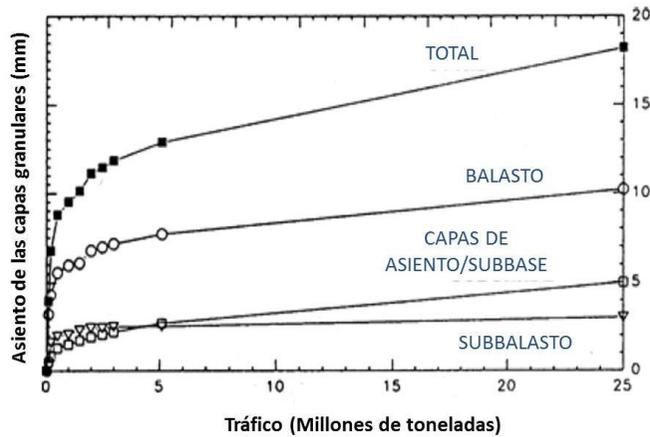


Figura 11: Contribución de las distintas capas de la subestructura al asentamiento de vía (Selig y Waters, 1994).

Otros autores como Prud'homme (1978 a) y Shenton (1978), a partir de medidas tomadas en líneas ferroviarias en Francia y Japón, respectivamente, han comprobado que los asentamientos de la pista responden a una ley exponencial, donde el mayor cambio de cota de la pista ocurre al comienzo de la puesta en servicio de la vía debido principalmente a la falta de compactación de la capa de balasto. Este fenómeno se puede observar en la Figura 12, la cual representa un ejemplo de resultados obtenidos por Anderson y Key (2000) a partir de un ensayo de laboratorio para evaluar el asentamiento de la pista, comparando los resultados con los registrados a partir de medidas tomadas en pista y aproximaciones numéricas (recogidas por la O.R.E., Shenton, 1978; Sato, 1995).

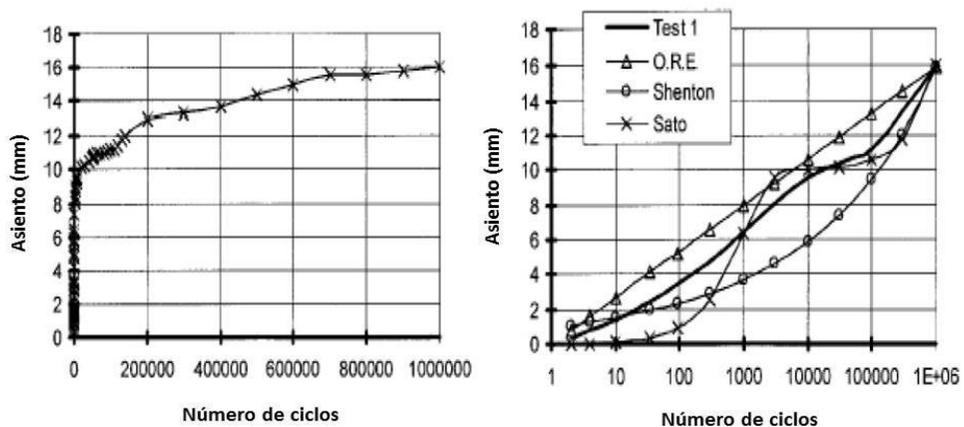


Figura 12: Datos de asentamiento recogidos en diversas vías ferroviarias (Anderson y Key, 2000).

No obstante, posterior a la fase inicial de la puesta en servicio de la vía, con el paso repetido de los vehículos el asentamiento de la vía ferroviaria sigue incrementándose, lo que provoca un continuo deterioro de la calidad geométrica de la vía, produciendo irregularidades tanto en dirección vertical como horizontal, en forma de ondas de longitud media y larga. Estas deformaciones producen oscilaciones de baja frecuencia que inducen cambios en las cargas dinámicas que solicitan la vía, lo que puede intensificar los defectos y asentamientos de la pista en algunos puntos concretos de forma aleatoria a lo largo de la vía (asiento diferencial).

Dada la importancia de este fenómeno, algunos autores (Selig y Waters, 1994) han tratado de relacionar el asiento medio de la vía con la deformación diferencial producida en algunos puntos aleatorios de líneas ferroviarias (Figura 13), poniendo de manifiesto que el asentamiento diferencial incrementa de forma lineal al aumentar el asiento global generado en la vía. Así, se comprueba que ambos parámetros se encuentran estrechamente relacionados, siendo necesario controlar su magnitud con el fin de evitar problemas derivados de la pérdida de calidad geométrica (cambios en los factores geométricos) de la vía.

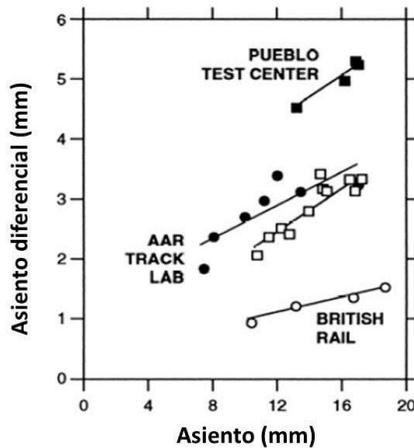


Figura 13: Relación entre asiento diferencial y asiento global de la vía (Selig and Waters, 1994).

2.2.1.1 Cambio en los parámetros geométricos de la vía

El problema de asiento diferencial del balasto, y por tanto de la vía en su conjunto, da lugar a una serie de efectos y problemas que llevan a importantes cambios en los parámetros que definen la geometría de la vía. Estos parámetros pueden ser clasificados según la dirección de deformación, como verticales

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

(nivelación longitudinal, nivelación transversal y alabeo) y horizontales (ancho de vía, alineación y alabeo) (Admetlla Pérez y López Pita, 2010):

- **Nivelación longitudinal:** Parámetro que define las variaciones de cota de la superficie de rodadura a cada hilo de carril, respecto a un plano de comparación.
- **Nivelación transversal:** Parámetro que establece la diferencia de cota existente entre las superficies de rodadura de los hilos de carril en una sección normal al eje de la vía.
- **Ancho de vía:** Parámetro que determina la distancia existente entre las caras activas de las cabezas de los carriles, siendo evaluada 14 mm por debajo de la superficie de rodadura.
- **Alineación:** Parámetro que, para cada hilo de carril, representa la distancia en planta respecto a la alineación teórica.
- **Alabeo:** Parámetro que define la distancia existente entre un punto de apoyo teórico de una rueda de las ruedas de un vehículo, y el plano determinado por los puntos de apoyo reales de las otras tres. El alabeo es considerado uno de los parámetros geométricos más importante ya que puede ser el responsable de los problemas de descarrilamiento.

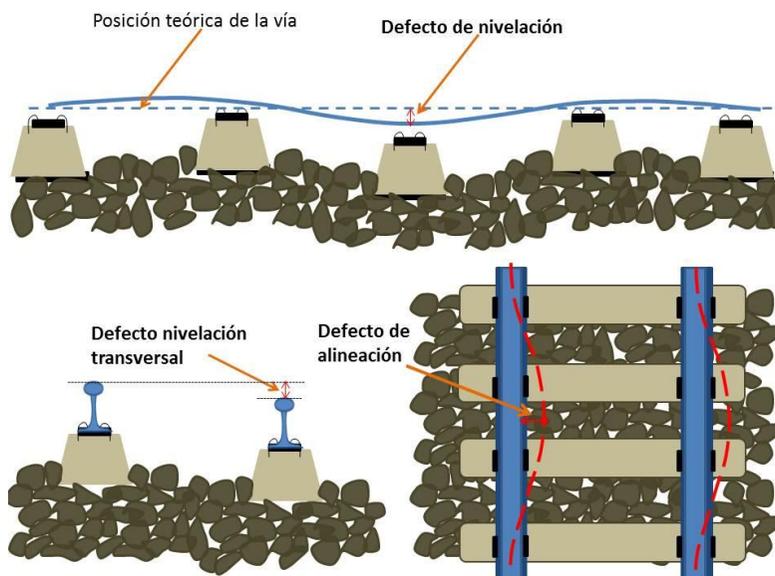


Figura 14: Defectos de nivelación longitudinal, transversal y de alineación (Elaboración propia).

Para conservar la calidad geométrica de la vía, y por tanto su funcionalidad y seguridad para la circulación de trenes, para los parámetros geométricos se definen distintos valores límite (referidos generalmente en tramos de 200 m de longitud) en función de las exigencias de la vía, y de las condiciones de servicio bajo las que va a estar sometida la estructura. Estos parámetros límite para la calidad geométrica de la vía quedan recogidos en una normativa europea (EN 13848-1, 2004) que establece las tolerancias máximas permitidas, a partir de las cuales sería necesario recurrir a tareas de mantenimiento (Ferreira, 2010).

En nuestro país se establecen distintos valores que definen la calidad geométrica en función del tipo de línea, distinguiendo entre vía convencional y Alta Velocidad. La Tabla 3 recoge los límites fijados, de acuerdo con los datos recopilados por Ruano Gómez y López Pita (2007).

Tabla 3: Tolerancias medias de los parámetros geométricos de la vía, para tramos con longitud de 100 m y con curvatura mayor de 10.000 m (Ruano Gómez y López Pita, 2007).

Tipo de línea	Alineación (mm)	Nivelación longitudinal (mm)	Alabeo (mm/m)	Nivelación transversal (mm)	Ancho de vía (mm)
Línea convencional	± 5	± 5	2-3	± 5	-7 / +20
Línea Alta Velocidad	±3,5	±2,5	1,5	±2	-1 / +5

2.2.1.2 Posibles soluciones para reducir el deterioro geométrico de la vía

Dado que el asiento diferencial del balasto es identificado como el problema principal asociado al cambio de los parámetros que definen la calidad geométrica de la vía, una de las soluciones habituales para recuperar los valores límites de los parámetros geométricos consiste en las tareas de bateo, las cuales permiten reordenar las partículas granulares, a la vez que se realiza la nivelación del sistema. Además, en ocasiones es necesaria la aportación de balasto bajo las traviesas para asegurar el apoyo de las mismas.

En relación a esta solución, autores como Lichtberger (2005) han comprobado que es necesario realizar tareas de mantenimiento del balasto tras un valor determinado de ejes de carga transportados antes de que se pierda la linealidad de la curva que define el crecimiento de los defectos geométricos (Figura 15). Sin embargo, este proceso será repetido solamente hasta que se produzca la fatiga de los materiales granulares de las capas de asiento, situación que ocurre cuando las actividades de mantenimiento no permiten recuperar un nivel aceptable de la calidad geométrica inicial de la vía.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

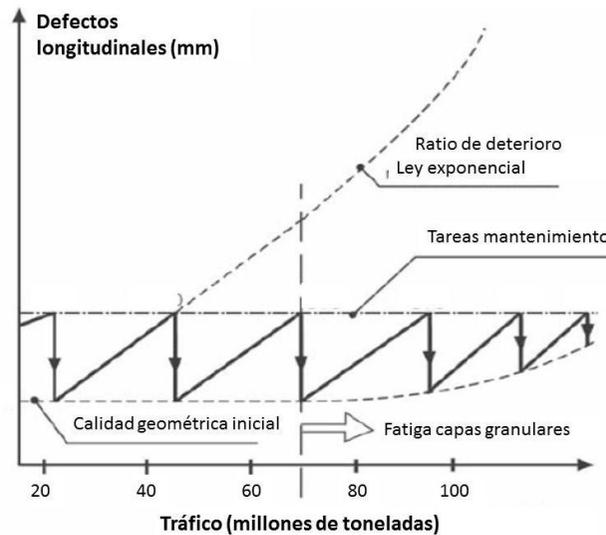


Figura 15: Relación entre el tráfico de una vía y sus defectos geométricos, indicando la necesidad de tareas de mantenimiento (Lichtberger, 2005).

Así, es necesario realizar tareas de rehabilitación de la vía para conseguir recuperar la geometría de la pista y su capacidad portante para soportar las cargas procedentes del tráfico de vehículos. En estas tareas, suele ser habitual la reposición de la capa de balasto mediante la incorporación de nuevo material. Esto lleva a una serie de problemas económicos, sociales y medioambientales, dado que es necesaria una importante inversión en tareas de mantenimiento de la vía, además interrupciones en el tráfico de vehículos y consumo de recursos naturales para sustituir el material granular deteriorado.

Estas tareas de mantenimiento y rehabilitación de la capa granular son medidas paliativas que tratan de corregir los defectos originados por el deterioro del balasto. Así, surgen otras soluciones con carácter preventivo que tratan de aumentar la durabilidad de la vía, a la vez que se reduce el número de tareas de mantenimiento necesarias. En este ámbito se encuentra la posibilidad de incorporación de geomallas (Thom et al., 2006; Brown et al., 2007) para reducir el asiento de balasto, así como otros elementos elásticos como placas de asiento, suelas bajo traviesa y mantas bajo balasto, que además permite incrementar la elasticidad del sistema, reduciendo así las sobrecargas dinámicas que solicitan la vía. Además, estos materiales contribuyen a distribuir las cargas procedentes del paso de los trenes, lo cual reduce la tensión transmitida a la capa de balasto, y por consiguiente, a las capas de asiento de la pista ferroviaria.

2.2.2 Vibraciones

La transmisión de ondas provocadas por la circulación de trenes es uno de los problemas de mayor importancia del transporte ferroviario, dado que además de los efectos medioambientales, puede causar desplazamientos y movimientos perjudiciales y peligrosos para la infraestructura, poniendo en peligro la seguridad de circulación de los trenes. Debido a la importancia de este problema, las vibraciones ocasionadas por el tránsito de trenes han sido estudiadas experimentalmente desde mediados del siglo XIX, con estudios como los de South (1864), y Hyde y Lintern (1929).

Para el análisis de las vibraciones, dentro del problema de transmisión de ondas se pueden encontrar dos efectos negativos diferenciados: la emisión de ruido aéreo; y la transmisión de vibraciones al terreno, y a través de éste a las cimentaciones de los edificios colindantes (Krylov, et al. 2000).

2.2.2.1 Transmisión de ondas al terreno

Para el estudio del efecto de los elementos elásticos en la reducción de las vibraciones transmitidas a la estructura ferroviaria, es necesario conocer el origen de las mismas. Atendiendo a este hecho, los focos de generación de oscilaciones causadas por el paso de los vehículos pueden dividirse en tres:

- Efecto de la velocidad de los trenes:

La circulación de los vehículos a una cierta velocidad genera unas cargas cuasi-estáticas y dinámicas que solicitan a la vía, provocando la oscilación de los materiales que componen ésta. De esta forma, se generan unas ondas vibratorias que se transmiten al resto de la estructura, y consecuentemente, al terreno subyacente. La velocidad de circulación de los trenes tiene un notable efecto en las vibraciones generadas, dado que de acuerdo con diversos autores (Müller-Boruttau y Breitsamter, 2004), el aumento de este parámetro lleva al incremento de la frecuencia de aplicación de las cargas, y por tanto de las vibraciones transmitidas a través de la vía.

- Irregularidades del contacto rueda-carril:

Dependiendo del tipo de irregularidades presentadas en el contacto entre las ruedas de los vehículos y el carril de la vía, las características de las vibraciones generadas variarán, pudiendo encontrar ondas de larga o corta longitud.

En primer lugar, las oscilaciones de longitud larga ($\lambda > 300$ mm) (Sato et al., 2002) pueden ser provocadas por diversas fuentes: presencia de deformaciones y ondulaciones (de varios metros) en los carriles originadas durante el proceso

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

de fabricación; variaciones de rigidez a lo largo de la vía; espaciado de las traviesas; y existencia de excentricidad en las ruedas de los vehículos, como consecuencia del desgaste de una de ellas, para un mismo eje. Este último efecto es conocido internacionalmente como “out-of-roundness (o-o-r)” (Dahlberg, 2007).



Figura 16: Ondulaciones de carril (elaboración propia a partir de www.andian.com).

Por otro lado, el segundo tipo de vibraciones (ondas cortas, $\lambda < 300$ mm) son propias de vías con existencia de pequeñas deformaciones en los carriles o en las ruedas de los trenes, lo que puede dar lugar a vibraciones de muy corta longitud de onda. Además, es común este tipo de oscilaciones en vías que presentan irregularidades ondulatorias en la cabeza de los carriles, provocando un fenómeno conocido como corrugación.



Figura 17: Aspecto visual del fenómeno de corrugación de carril (Egana et al., 2006).

La corrugación provoca principalmente vibraciones laterales del sistema, generando una aplicación periódica de impactos y un proceso cíclico de daños a

la estructura (Remennikov y Kaewunruen, 2008). Así, este fenómeno da lugar al incremento de ruido, circulación incómoda, y daños en vía y vehículos (Dahlberg, 2003). Autores como Grassie y Kalousek (1993) y Sato et al. (2002) recogen estudios sobre el fenómeno de la corrugación, poniendo de manifiesto la importancia de este problema en la transmisión de vibraciones en las vías ferroviarias, siendo las cargas dinámicas el principal origen de la aparición de este fenómeno.

- Irregularidades de la pista:

Las vibraciones transmitidas a la estructura ferroviaria y el terreno subyacente también tienen su origen en irregularidades de la pista provocadas por problemas como el asiento diferencial de la vía, la diferencia de comportamiento dinámico en tramos adyacentes con distintas características, heterogeneidad del suelo subyacente de la pista, o por las variaciones de rigidez del sistema, entre otros factores.

Los tres focos de vibraciones mencionados dan lugar a ondas que se transmiten a través del terreno (considerado semiespacio elástico), y que pueden ser clasificadas dentro de tres grupos atendiendo a su dirección de oscilación (Lamb, 1904): las ondas P (conocidas como primarias o de compresión), las ondas S (secundarias o de cortante) y las ondas Rayleigh, formadas en la superficie libre como consecuencia de las interacciones entre las ondas P y la componente vertical de las ondas S, induciendo así un desplazamiento de partículas en forma de elipse retrógrada (Kaewunruen y Remennikov, 2008a).

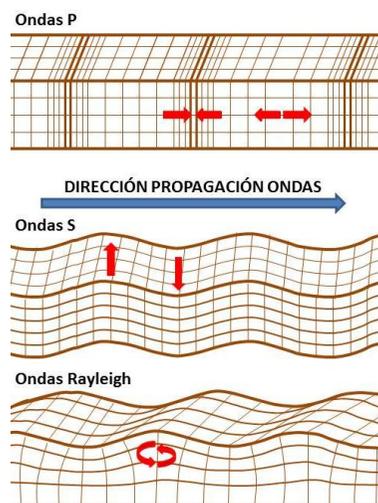


Figura 18: Propagación de ondas en el terreno (elaboración propia).

2.2.2.1.1 Frecuencias de las vibraciones

En el estudio de las vibraciones es fundamental conocer la frecuencia de oscilación de las mismas, así como la relación entre este parámetro y el foco que las origina, pudiendo de esta forma llevar a cabo soluciones efectivas como la introducción de elementos elásticos que mitigan su efecto, dependiendo del rango de frecuencias que se quiera tratar.

Las vibraciones transmitidas al terreno pueden ser clasificadas según su frecuencia de oscilación como ondas de frecuencia alta (superior a 200 Hz), media (50-200 Hz), y baja (menores de 50 Hz), siendo estas últimas las más complejas de aislar debido a su mayor capacidad para propagarse y llegar hasta los edificios cercanos, causando molestias y problemas socio-económicos. Las ondas de alta frecuencia dan lugar principalmente a un deterioro local de la vía. No obstante, éstas son más fáciles de amortiguar dado que tienen picos de desplazamiento muy cercanos (Dahlberg, 2003; Ferreira, 2010).

Atendiendo al origen de las vibraciones, las causadas por el paso de los vehículos a una velocidad determinada dependen de la fuente de las acciones que solicitan la vía. Así, la velocidad de oscilación de las cargas originadas por los pesos suspendidos de un vehículo se sitúa en torno a 1Hz, mientras que la frecuencia del sistema rueda-carril se sitúa en el intervalo comprendido entre 25-35Hz, alcanzándose valores en torno a 200Hz como consecuencia de irregularidades entre rueda-carril (López Pita, 2006). No obstante, estos valores pueden llegar a oscilar entre 0-20 Hz, mientras que para las masas no suspendidas el rango asciende a 20-125Hz, pudiendo alcanzarse frecuencias muy superiores dependiendo de la velocidad de circulación de los trenes (Kaewunruen y Remennikov, 2006a).

En relación al origen de las vibraciones por irregularidades tanto del contacto rueda-carril como de la propia vía, las ondas de alta frecuencia (mayores a 500 Hz) son causadas por pequeñas deformaciones en las ruedas o en la superficie de rodadura del carril (menores de 20 cm), así como por la existencia de cruces, cambios de vía, etc. (Ferreira, 2010). Por otro lado, las oscilaciones provocadas por corrugación del carril o deterioro del asiento de la vía tienen generalmente menor frecuencia de movimiento de partículas, aunque dependiendo de la longitud de las deformaciones pueden llegar a ser vibraciones de frecuencia media o alta.

Por parte de los cambios de rigidez, éste es considerado como uno de los fenómenos más influyentes en la transmisión de vibraciones, generando ondas de baja frecuencia provocadas por cambios de rigidez aleatorios a lo largo de la vía, y ondas de alta frecuencia causadas por la existencia de traviesas colgantes (traviesas que pierden su apoyo sobre el balasto como consecuencia del asentamiento de éste), y zonas de transición de vía sobre balasto y vía en placa y entre vía sobre terraplén y sobre obra de fábrica, entre otros (Dahlberg, 2003; Dahlberg, 2007).

En resumen, la Figura 19 muestra una gráfica realizada por Müller-Boruttai y Breitsamter (2004), en la que se recoge la frecuencia y longitud de las vibraciones generadas por el paso de trenes con diferentes características y a distintas velocidades, a su paso por vías con diversos parámetros de diseño y estado de las mismas.

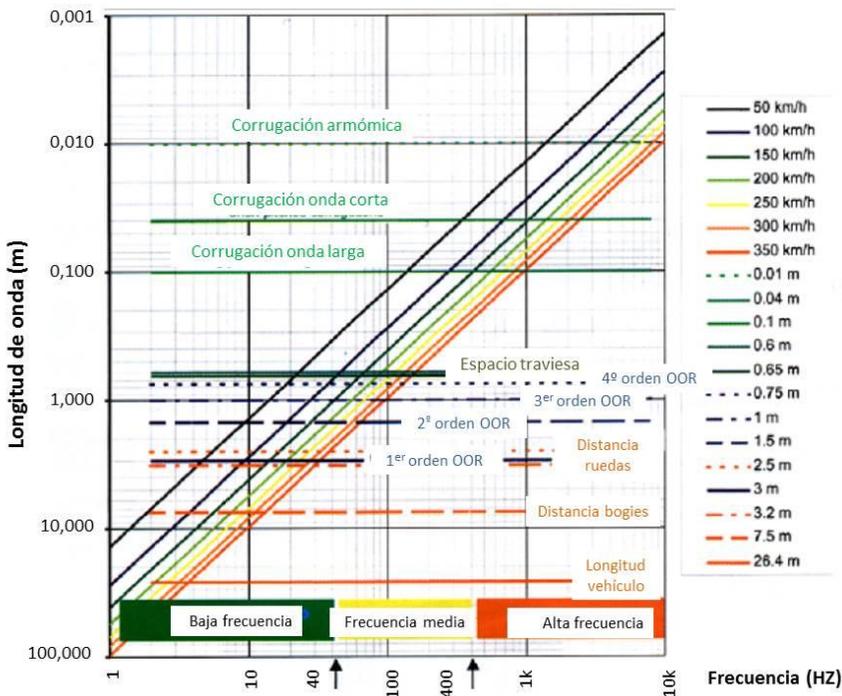


Figura 19: Características de las vibraciones atendiendo a su fuente de generación (Müller-Boruttai y Breitsamter, 2004).

Independientemente de la fuente generadora de vibraciones, atendiendo a la oscilación de los componentes de la pista y el conjunto de éstos, la frecuencia de resonancia de la vía (vibración de unos elementos sobre otros) puede ser clasificada de la siguiente forma (Dahlberg, 2007; Ferreira, 2010):

- Conjunto carril-traviesas y balasto, sobre la infraestructura: 20-50 Hz
- Conjunto carril-traviesas, sobre el balasto: 50-300 Hz
- Movimiento del carril sobre traviesas (con placas de asiento): 400-1000 Hz
- Flexión del carril, entre las traviesas: 1000-1200 Hz

2.2.2.1.2 Efecto de la propagación de ondas en el terreno

Dentro de los distintos tipos de ondas, en referencia a la dirección de movimiento de las partículas (ondas P, S o Rayleigh) que se transmiten por la infraestructura ferroviaria, las ondas Rayleigh son las más importantes en el caso de la vía de ferrocarril, dado que son las de menor velocidad de propagación y mayor consumo de energía, debido a los mayores desplazamientos de las partículas. A partir del estudio de la velocidad de vibración de estas ondas superficiales, diversos autores (Kenney, 1954; Alias, 1987) han determinado la velocidad crítica de propagación de las ondas para evitar desplazamientos excesivos del sistema, representado la vía como una viga sobre un medio elástico. En el caso de la Ecuación (13) propuesta por Alias (1987), se pone de manifiesto la importancia de la calidad y capacidad portante del terreno sobre el que asienta la infraestructura ferroviaria.

$$c_{cr}^2 = \frac{2}{m} \sqrt{k * E * I} \quad (13)$$

siendo:

k=constante elástica del material.

E= módulo de elasticidad.

I=momento de inercia de la viga.

m=masa por unidad de longitud.

De esta forma, se comprueba que el terreno puede tener un papel fundamental en el comportamiento dinámico de la vía, dado que la velocidad crítica de propagación de ondas disminuye al reducir la constante elástica de la infraestructura. Así, este hecho debe de ser estudiado en detalle al introducir elementos elásticos en la vía de ferrocarril dado que estos materiales permiten incrementar la elasticidad del sistema.

En el caso de un importante incremento de la flexibilidad de la vía al introducir distintos niveles de elementos elástico, o la disposición de la infraestructura sobre un terreno blando (como pueden ser las arcillas o turbas), la velocidad de

circulación de los trenes actuales puede alcanzar la velocidad crítica de las ondas, produciéndose un notable incremento de los desplazamientos verticales que tienen lugar en la vía como consecuencia del fenómeno conocido como resonancia. Este problema ocurre cuando la energía de las ondas provocadas por una carga (en este caso el tren), se desplaza a la misma velocidad que la carga en sí, produciendo una acumulación de energía directamente bajo el peso a medida que avanza el tiempo (Álvarez, 2011; Lázaro et al, 2011).

La importancia de la calidad del suelo subyacente de la vía ferroviaria ha sido probada en otras líneas europeas de ferrocarril, donde se realizaron medidas de los desplazamientos verticales del sistema a su paso sobre terreno blando (Tabla 4). Entre los distintos casos, cabe destacar el plan de ensayos desarrollado por la Administración del Ferrocarril Sueca a finales de los 90'. En estas pruebas se pudo observar que a velocidades inferiores a los 150 Km/h, la respuesta dinámica de carril, balasto y terreno era muy similar a la estática, mientras que al llegar el tren a velocidades próximas a los 200 Km/h, los desplazamientos se amplificaban acusadamente, llegando a temerse el descarrilamiento del tren (Madshus, 1997).

Tabla 4: Medidas de desplazamientos verticales en distintas vías europeas (Woldringh y New,1999; Van Staalduinen y Van Oosterhout, 1997;Madshus y Kaynia, 2000).

Año	País	Línea de ferrocarril	Capas de forma y terraplen	Velocidad máxima (km/h)	Deflexión carril (mm)
1993	Reino Unido	Stilton-Fen	-Cenizas (2,6 m) -Arena limosa y grava -Turba y arcilla limosa	180	12
1997	Suecia	Göteborgo-Malmö (Ledsgard)	-	200	17
1997	Países Bajos	Amsterdam-Utrecht	-Arena (2m) -Arcilla y turba (6m) -Losa hormigón bajo balasto	200	1,8

Esto fue debido al paso del vehículo por una zona de arcillas muy blandas en la línea que une Gotemburgo y Malmö, donde la velocidad de propagación de las ondas provocadas por el paso de la carga dinámica era muy similar a los 200 Km/h que alcanzaba el tren, y aparecía el citado fenómeno de resonancia, generándose niveles de vibración excesivos en el suelo, balasto, y en los postes que soportaban la catenaria.

En el caso de las otras líneas recogidas en la Tabla 4, también se pudo comprobar que dependiendo del terreno sobre el que apoya la vía, al aproximarse la velocidad de los trenes a la velocidad crítica del sistema, las deflexiones dinámicas pueden llegar a ser superiores a dos o tres veces las deformaciones estáticas (Figura 20), lo que puede dar lugar a la fatiga de materiales y otros problemas derivados de las deflexiones excesivas del sistema.

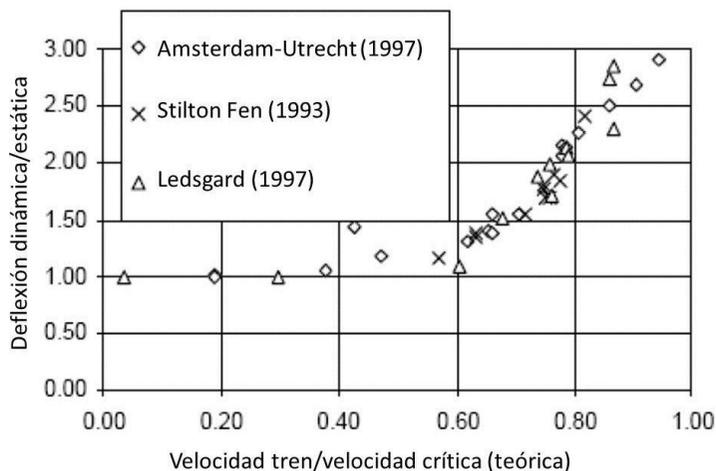


Figura 20: Representación del efecto de la velocidad de circulación en las deflexiones dinámicas (Woldringh y New,1999; Van Staalduinen y Van Oosterhout, 1997;Madshus y Kaynia, 2000).

A parte de las medidas realizadas en tramos experimentales en líneas europeas, los autores Krylov et al. (2000) presentaron unos modelos matemáticos para calcular las vibraciones generadas por la circulación de trenes a alta velocidad, llegando a probar que si se sobrepasa la velocidad de las ondas Rayleigh ocurre un “boom” debido a la acumulación de energía bajo tren, que lleva asociado un incremento muy elevado de las vibraciones y las deflexiones de carril. Por otro lado, además de las deflexiones del carril, existen estudios (Clark et al, 1982; Grassie y Cox, 1984; Knothe y Grassie, 1993) que evalúan la resonancia de vibración de las traviesas, concluyendo en que ésta no sólo afecta al comportamiento de este elemento, sino que el efecto también se transmite hacia la parte superior de la estructura, modificando el esfuerzo entre rueda y carril.

En el caso del estudio de la vibración de las partículas de balasto, en las líneas de alta velocidad la aceleración de estas partículas puede llegar a ser elevada afectando en gran medida al comportamiento de la capa de balasto, y su capacidad de reacción respecto a los esfuerzos procedentes de las traviesas (Morgan y Marklnd, 1981). Estos problemas aparecen cuando, a partir de aceleraciones del orden de 0,7-0,8g, el material granular empieza a sufrir un fenómeno de descompactación, llegando a un nivel crítico (aceleración de partículas comprendida entre 1,4 y 1,6g) en el que se produce la licuefacción de balasto, pasando éste a comportarse como un fluido, lo que conlleva a un rápido deterioro de la estabilidad del lecho de balasto (UIC, 2001; Kaewunruen y Remennikov, 2008a).

2.2.2.1.3 Posibles soluciones para reducir las vibraciones

En vista de los diversos efectos negativos que provoca la transmisión de vibraciones a través de la infraestructura ferroviaria y el terreno subyacente, se hace imprescindible desarrollar distintas soluciones que mitiguen los problemas derivados de la propagación de ondas. Para ello, el primer paso es mantener la calidad de la vía, así como la geometría y el buen estado de los diversos materiales que componen la vía, principalmente los involucrados en la rodadura, como son las ruedas de los vehículos y los carriles del sistema (Soriano, 2013).

En relación a los efectos del fenómeno de la resonancia que puede tener lugar en vías sobre terrenos blandos, se puede recurrir a la construcción de una base rígida conocida como viaducto enterrado, con la cota de tablero al mismo nivel que el terreno circulante, aumentando así la velocidad crítica de transmisión de vibraciones (Melis, 2006). Esta solución es efectiva para evitar problemas de resonancia, aunque el desarrollo de esta medida podría incrementar de forma considerable los costes de construcción.

Otra medida para reducir las vibraciones podría ser el aumento del espesor de la capa de balasto, dado que estudios realizados por Galvín (2007) evidenciaron el efecto disipatorio de este material. Galvín, mediante modelización del sistema ferroviario, estableció una relación entre la velocidad de vibración y la distancia al eje de la vía, comparando los resultados obtenidos para una vía sobre balasto y una vía apoyada directamente sobre el terraplén (considerado en la modelización como un semiespacio). La Figura 21 muestra la capacidad de amortiguación de vibraciones de ambos medios, pudiendo destacar el caso de las infraestructuras con balasto, la cual muestra menores velocidades de vibración en zonas cercanas a la vía. Por tanto, una posible solución sería

incrementar el espesor de la capa de balasto. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el espesor de la capa de balasto queda limitado por la necesidad de contar con una adecuada compactación, tarea que se ve afectada por el aumento de de espesor de esta capa.

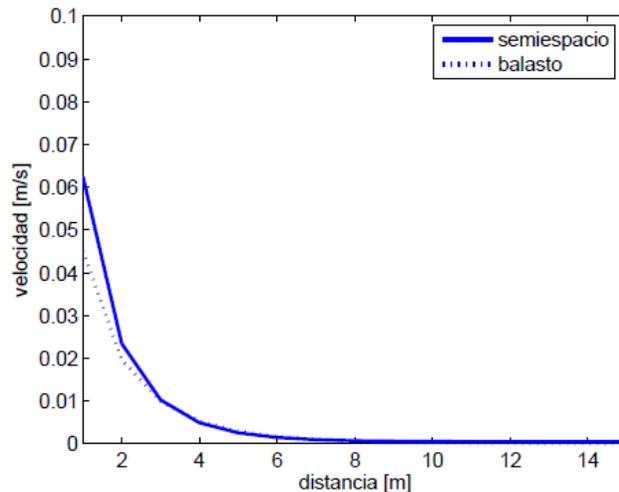


Figura 21: Velocidad de vibración en función de la distancia al eje de la vía, sin considerar y considerando el efecto del balasto (Galvín, 2007).

Por otra parte, una solución efectiva sería la incorporación de elementos elásticos con capacidad para amortiguar movimientos y mitigar vibraciones. Los materiales elásticos más usados para reducir la transmisión de vibraciones son placas de asiento, suelas bajo traviesas y mantas elásticas. El empleo de estos componentes y el establecimiento de sus propiedades mecánicas como rigidez y capacidad de amortiguación, dependerán de las características de las vías, así como de las propiedades de las vibraciones que sean necesarias reducir. Además, se debe de tener en cuenta un diseño apropiado de la elasticidad vertical de la vía para evitar reducir la velocidad crítica que daría lugar a posibles efectos de resonancia.

2.2.2.2 Ruido

El ruido provocado por la circulación de trenes, también constituye un grave problema medioambiental, causando molestias a los ciudadanos que habitan en zonas cercanas a la explotación ferroviaria, y a los propios usuarios del transporte por ferrocarril. Además, el ruido emitido por los movimientos de los distintos materiales que componen la vía, provoca que estas oscilaciones

disminuyan la vida útil de los componentes implicados, aumentando por tanto el coste de mantenimiento de la vía (Wu, 2008).

Para estudiar el efecto del ruido generado en el sistema de ferrocarril, es importante identificar el foco de emisión predominante. Existen diversas fuentes de ruido, pudiendo ser englobadas dentro de las vibraciones estructurales y las fluctuaciones aerodinámicas, pudiendo variar el foco dominante según las características de la vía, los vehículos, y las condiciones de circulación (Thompson, 2009).

El ruido aerodinámico puede llegar a ser dominante en las líneas ferroviarias de alta velocidad, siendo éste generado por inestables corrientes de aire que son provocadas principalmente como consecuencia de la separación entre los distintos vagones de los trenes, la zona entre los bogies de los vehículos, postes de señalización y red eléctrica, etc. Además, se debe de considerar que el nivel de ruido aerodinámico aumenta de forma más rápida con relación a la velocidad de los trenes, que el ruido provocado por las vibraciones mecánicas que tienen lugar en la estructura ferroviaria.

No obstante, las vibraciones transmitidas por la estructura ferroviaria también tienen notable importancia en la generación de ruido, siendo predominante el sonido emitido por el contacto rueda-carril para velocidades inferiores a 300 km/h. El ruido de rodamiento es causado principalmente por las vibraciones que se producen por el contacto entre las ruedas de los vehículos y el carril, siendo éste acentuado con la existencia de irregularidades en estos elementos.

Similar mecanismo de ruido se produce por el impacto entre las ruedas y el carril debido a discontinuidades existentes en la superficie de alguno de estos componentes. Dentro del ruido estructural también se incluye el producido por el contacto irregular de fricción entre las ruedas y el carril al paso de los trenes por un tramo en curva. Todos estos mecanismos, se pueden ver acentuados dependiendo de las características de los elementos elásticos utilizados en la vía (tal y como se verá más adelante), de acuerdo a estudios realizados por autores como Vincent et al. (1996) y Thompson y Jones (2006).

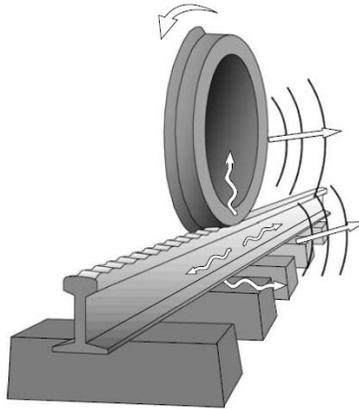


Figura 22: Representación del ruido emitido como consecuencia del contacto rueda-carril (Thompson y Jones, 2006).

La frecuencia del ruido de rodamiento se puede obtener como el cociente entre la velocidad de circulación de los trenes y la longitud de las irregularidades, siendo las longitudes entre 5 y 500 mm las de mayor importancia en la emisión de ruido. Para las ondas cortas, la amplitud de las oscilaciones se sitúa en torno a $1\mu\text{m}$, mientras que las ondas largas cuentan con amplitudes próximas a $50\mu\text{m}$.

De acuerdo con Thompson (2006), cuando la longitud de las ondas de rugosidad entre el carril y las ruedas es corta comparado con el área de contacto entre ambos elementos (generalmente una elipse con unos 15 mm de eje principal), se produce la atenuación del ruido emitido, siendo este hecho más significativo para velocidades superiores a 160 km/h.

En relación al ruido provocado por los impactos entre ruedas y carril, los autores Wu and Thompson (2002), mediante modelización de la vía, compararon el nivel sonoro producido por las irregularidades aleatorias en ruedas y carril (Figura 23a), con el ruido generado por la rugosidad (irregularidades periódicas) de ambos materiales (Figura 23b).

A partir de los datos registrados en la Figura 23 comprobaron que los niveles de ruido producido por irregularidades aleatorias superan al ruido de rodamiento para todas las frecuencias y velocidades (hasta 120 km/h) de los trenes considerados en el estudio, lo que pone de manifiesto la importancia del estado de la vía en el ruido emitido. No obstante, se pudo ver que el ruido de rodamiento aumentaba de forma más acentuada al incrementar la velocidad de los vehículos, lo que este tipo de sonido puede llegar a ser predominante a

partir de cierta velocidad de circulación. Este hecho está en consonancia con el estudio realizado por Remington (1988), el cual indicaba que la intensidad del ruido de rodamiento puede incrementarse hasta en 9 dB cuando la velocidad del tren se duplica, siendo esto consecuencia del aumento de las aceleraciones de los movimientos de las ruedas y los carriles.

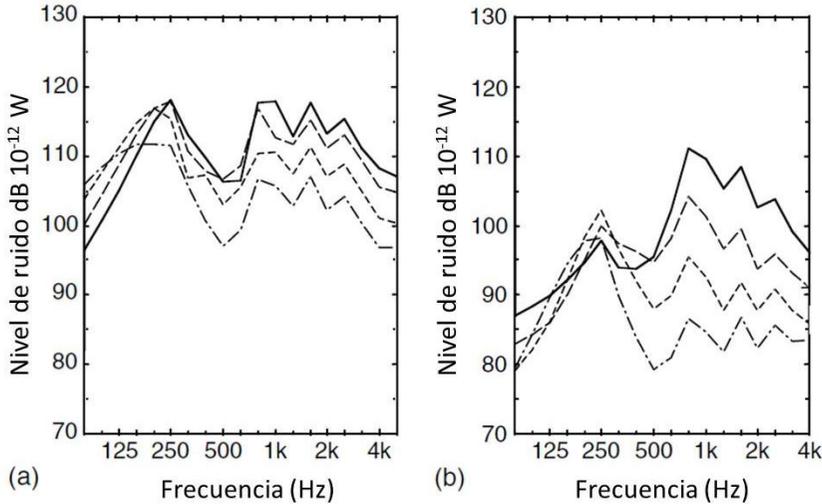


Figura 23: Comparativa entre el ruido provocado por (a) irregularidades aleatoria y (b) periódicas del contacto rueda-carril (Wu y Thompson, 2002).

Por otra parte, la circulación de trenes a través de tramos en curva de radios reducidos, provoca el fenómeno conocido como “ruido de chirrido”. Este es especialmente molesto en líneas urbanas debido a la proximidad de viviendas. La Figura 24 muestra un esquema del contacto que tiene lugar entre las ruedas y el carril, tanto en el lado interno de la curva como en el externo, el cual es el que lleva al incremento del nivel sonoro (entre 200 y 2000 Hz) debido a la intensidad del contacto lateral entre rueda y carril.

Este hecho podría ser reducido mediante el cambio de las propiedades de los elementos elásticos utilizados, estando esta solución en consonancia con otros autores (Egana et al., 2006) centrados en el estudio de los problemas derivados de estos esfuerzos laterales. Así, la rigidez de los elementos como placas de asiento, puede tener notable influencia dado que puede modificar la amplitud de los movimientos del carril, y por tanto, graduar la intensidad del contacto rueda-carril.

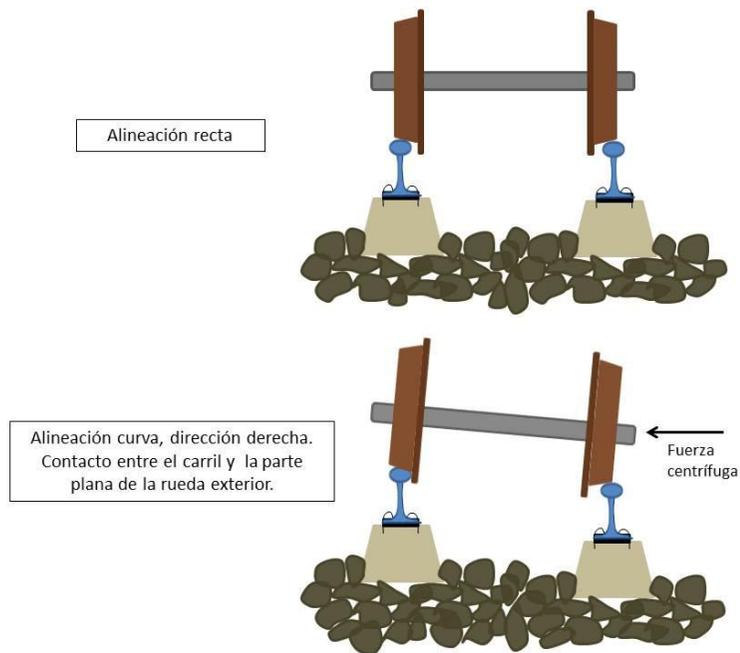


Figura 24: Contacto rueda-carril en tramos en curva, dando lugar al conocido como "ruido de chirrido" (Elaboración propia)

Además, existen otros tipos de ruido estructurales asociados a los movimientos de los distintos componentes, y su contacto entre sí. En este sentido, destaca el contacto carril-traviesa provocado por el movimiento del carril (a una frecuencia entre 400-1000 Hz) en su zona de apoyo sobre la traviesa, lo cual genera niveles sonoros que pueden ser mitigados variando la rigidez de la placa de asiento utilizada. De igual modo, el cambio de características de este elemento elástico, así como de suelas bajo traviesa, puede llegar a reducir el ruido generado por el movimiento de las traviesas sobre la capa de balasto. Como ejemplo, el uso de placas de asiento blandas, las cuales pueden reducir las sollicitaciones transmitidas al conjunto traviesa-balasto, permite reducir de 300 Hz a 100 Hz la frecuencia de oscilación de las traviesas, así como la amplitud de sus movimientos, disminuyendo así la intensidad sonora (Gassie et al., 1982; Ferreira, 2010).

2.2.2.2.1 Posibles soluciones para disminuir el ruido

Para reducir el nivel sonoro emitido por el paso de los vehículos, las soluciones más efectivas son aquellas que actúan directamente en los focos de generación del ruido. Así, para reducir el ruido de rodamiento y el provocado por irregularidades en ruedas o carriles, una solución efectiva es conseguir una

interacción rueda-carril más suave a partir de la eliminación o reducción de los defectos y pequeñas deformaciones en ambos materiales. Para ello, es habitual el uso de un tren de molado, encargado de mejorar la superficie de rodamiento de los carriles de la vía. Además, mantener la calidad geométrica de la vía es fundamental para evitar problemas de incremento del nivel sonoro emitido al paso de los trenes.

Por otra parte, como se ha podido comprender en el análisis de los principales focos de ruido, otra solución efectiva puede ser la introducción de elementos elásticos con capacidad para amortiguar vibraciones y movimientos de los componentes ferroviarios que originan niveles de ruido molestos. Además, estos componentes permiten mejorar y mantener la calidad de la vía y su geometría, lo que colabora a reducir el incremento de ruido sonoro provocado durante la vida de servicio de la infraestructura ferroviaria. Así, como se verá más adelante, autores como Thompson y Jones (2006) o Egana et al. (2006) han comprobado la eficiencia de los elementos elásticos en la reducción del efecto de los principales focos de emisión sonora, debido principalmente a los cambios de movimiento de carril que pueden ser graduados al emplear estos materiales, así como la intensidad del contacto rueda-carril puede ser reducida, disminuyendo así el nivel sonoro emitido.

2.3 Importancia de la rigidez vertical de la vía: necesidad de un valor óptimo

Este apartado del estudio del estado del arte se centra en el análisis de la influencia que tiene el parámetro de rigidez vertical de la vía en su comportamiento mecánico, y la necesidad de obtener un valor óptimo. Este estudio es debido a que el empleo de elementos elásticos (tema principal de la tesis doctoral) pueden ser utilizados para modificar la rigidez del conjunto de la vía, por lo que es necesario conocer qué influencia podría tener este hecho. Además, en el estudio de los problemas asociados a la pérdida de geometría de la vía y a la propagación de vibraciones, se ha podido ver que la rigidez de la vía, así como sus fluctuaciones, es un parámetro fundamental en el efecto de dichos problemas.

2.3.1 Definición de la rigidez vertical de la vía

La resistencia vertical de la vía ha sido tradicionalmente evaluada a partir de parámetros como el coeficiente de balasto (N/mm^3) o el módulo de la vía (N/mm^2). No obstante, a partir de los años 50 empezó a tomar especial importancia el parámetro de rigidez vertical de la vía, el cual permite

cuantificar de forma global la elasticidad de la vía. Esta última magnitud, en el análisis estático, se define como el cociente entre la carga que solicita la vía y el asiento vertical producido en la misma (Figura 25), obteniendo los valores máximos en zonas de carril apoyado en una traviesa.

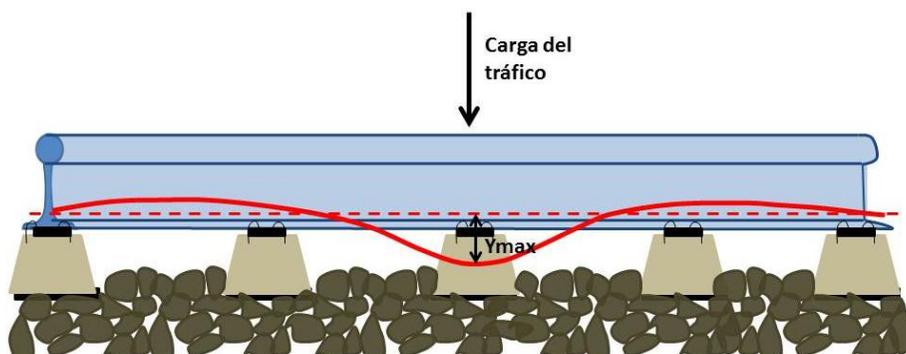


Figura 25: Representación de la deflexión de vía ante la aplicación de carga (concepto de rigidez de vía) (Elaboración propia).

En el caso del análisis dinámico, la rigidez vertical queda determinada por la respuesta de la vía ante las cargas verticales dinámicas transmitidas por las ruedas de los vehículos. En el caso del estudio en el dominio de la frecuencia, es más habitual utilizar su valor inverso, definido como la receptancia de la vía, compuesta por una parte real (R) que se corresponde con la inversa de la rigidez estática, y por una parte imaginaria (α), la cual indica el desfase entre la onda de desplazamiento y la onda de la fuerza (Teixeira, 2003).

Dado que la rigidez vertical estática de la vía es un parámetro más sencillo de cuantificar, es habitual emplear éste para estudiar la respuesta de la vía. No obstante, se debe tener en cuenta que la consideración de este parámetro como una constante de la vía es una aproximación, debido a que el análisis de las curvas de fuerza/deformación de la vía muestran un comportamiento no lineal de la misma, a la vez que se debe de considerar un factor de amortiguamiento (Berggren y Jahlenius, 2002).

Debido a esta no linealidad del comportamiento de la vía, la cuantificación de su rigidez vertical suele realizarse mediante el cálculo de la secante entre dos puntos de carga característicos (para vías de buena calidad). El primero de ellos se corresponde con una magnitud de esfuerzo reducido, que permite caracterizar la deflexión de asiento de la traviesa sobre el balasto. El segundo

punto queda fijado en el nivel máximo de la carga cuasi-estática esperada sobre la vía. Así, el parámetro de rigidez se calcula de acuerdo a la Ecuación 14.

$$K = \frac{Q_f - Q_i}{\delta_f - \delta_i} \quad (14)$$

siendo:

K: rigidez vertical de la vía por carril (kN/mm)

Q_f y Q_i : carga final e inicial (respectivamente) por carril (kN)

δ_f y δ_i : deflexión del carril bajo la carga final e inicial (mm)

2.3.2 Efecto de la rigidez vertical en los esfuerzos transmitidos a la vía

Desde la aparición del ferrocarril, la magnitud de la capacidad portante de la vía ha sido un tema continuo de estudio debido a su importancia para garantizar la estabilidad del sistema, y a su efecto sobre los esfuerzos transmitidos al carril. Así, ya en el siglo XIX el autor alemán Zimmermann (1888) analizó la relación entre el parámetro de la rigidez vertical del sistema y las cargas verticales transmitidas a la vía. Este autor dedujo que los esfuerzos verticales transmitidos al sistema, tanto estáticos como dinámicos, se ven incrementados con la raíz cúbica de la rigidez vertical de la vía, produciéndose además el aumento de la flexión del carril como consecuencia del incremento de las solicitaciones.

De igual modo, en trabajos posteriores realizados por Eisenmann (1969, 1993) se pudo comprobar que, para velocidades inferiores a 200 km/h, la carga dinámica podía alcanzar valores de 1,2 a 2,8 veces las solicitaciones estáticas, dependiendo de la rigidez y calidad de la vía. Por otra parte, a partir de estudios desarrollados para vías de alta velocidad por parte del autor francés Prud'homme (1970), se pudo analizar la incidencia de distintos parámetros en las cargas dinámicas máximas transmitidas a la vía.

La Figura 26 muestra los resultados del efecto de los distintos factores analizados (b = calidad geométrica de la vía y las ruedas de los vehículos; v = velocidad de circulación; m_{ns} = masa no suspendida de los trenes; k = rigidez de la vía; $Sob.m_s$ = sobrecarga de la masa suspendida), en función de los valores límite (representados entre paréntesis) susceptibles de ocurrir en líneas de altas prestaciones, tomando como referencia las características de una vía y un vehículo de alta velocidad francesa.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

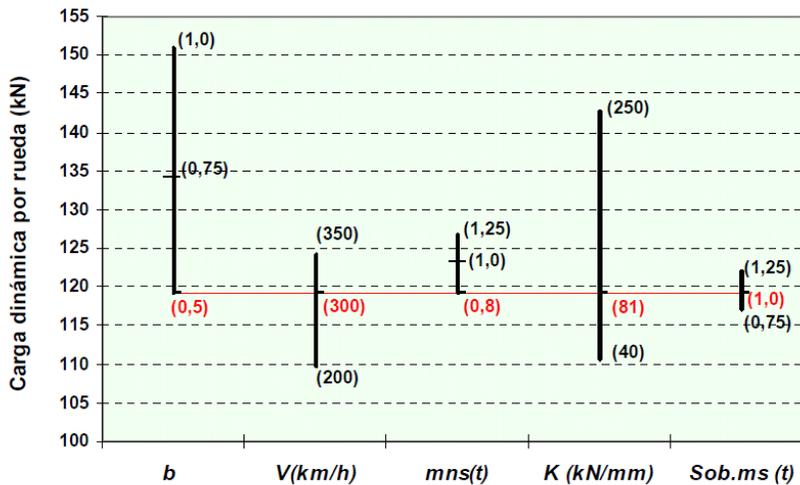


Figura 26: Incidencia de los diferentes parámetros en las sobrecargas dinámicas transmitidas a la vía (extraído de Teixeira, 2003, a partir del concepto de Prud'Homme, 1970).

A partir de estos resultados, se puede comprobar que los parámetros que mayor incidencia tienen en la variación de las cargas dinámicas, son la rigidez de la vía, y su calidad geométrica. Teniendo en cuenta que las nuevas líneas de alta velocidad tienen unas elevadas exigencias geométricas, reduciendo los defectos de carril, y por tanto las sobrecargas dinámicas, el parámetro más influyente es la rigidez de la vía. De esta forma, resulta necesario profundizar en el análisis de esta magnitud.

Dada la importancia de la rigidez en las sobrecargas dinámicas máximas recibidas por el carril al paso de los trenes, otros autores como Teixeira (2003) han analizado la influencia de este parámetro en distintas vías con diferentes estados de calidad geométrica, para la circulación de vehículos a diversas velocidades. A modo de ejemplo, la Figura 27 recoge curvas obtenidas para vehículos tipo TGV empleados en líneas de alta velocidad francesas, circulando a una velocidad entre 200 y 300 km/h sobre una vía en muy buen estado ($b=0,5$ para la fórmula de las cargas dinámicas propuesta por Prud'homme), pudiendo comprobar el notable incremento de cargas dinámicas en relación a la rigidez.

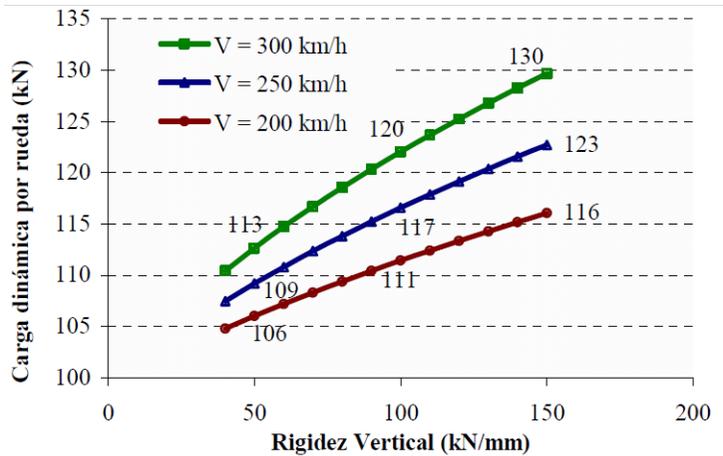


Figura 27: Relación entre la rigidez de la vía y las sobrecargas dinámicas transmitidas al carril (Teixeira, 2003).

Al analizar estos resultados, de nuevo se comprueba que la rigidez del sistema juega un importante papel en las cargas dinámicas transmitidas a la infraestructura, viendo que al incrementar esta magnitud aumenta de forma notable la sollicitación dinámica transmitida por los vehículos, lo cual llevaría a mayores esfuerzos mecánicos sobre los materiales de la pista, así como el incremento de las vibraciones transmitidas.

2.3.3 Importancia de un valor óptimo de rigidez

A pesar del efecto negativo del incremento de rigidez vertical en los esfuerzos transmitidos a la vía (los cuales aumentan de forma considerable), en la construcción de nuevas líneas ferroviarias se emplea de forma habitual mayor número y espesor de las capas de asiento, lo cual va en sentido contrario a la reducción de rigidez del sistema, y con ello los sobre esfuerzos dinámicos. Esto fue puesto de manifiesto por los autores Sauvage y Larible (1982), quienes a partir de estudios realizados en la línea de alta velocidad entre Paris y Lyon, comprobaron que la rigidez equivalente del sistema balasto-plataforma puede llegar a duplicarse dependiendo del sistema de capas de asiento dispuesto, incrementándose de igual modo la rigidez del conjunto de la vía.

No obstante, esta tendencia a incrementar el número y espesor de capas de asiento es debida a la necesidad de incrementar la capacidad del sistema para distribuir las cargas transmitidas por los trenes actuales (mayor capacidad de carga y mayor velocidad de circulación). Además, existe la tendencia a incrementar la capacidad portante del sistema dado que, como se ha podido comprobar, este hecho va en sentido positivo desde la perspectiva de la

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

velocidad crítica de los trenes para evitar el efecto de resonancia, a la vez que se reducen los problemas geométricos asociados al asiento de las capas granulares.

Así, podría ser adecuado desarrollar soluciones que permitieran reducir la rigidez de la vía con el fin de disminuir los esfuerzos dinámicos, pero sin que ello comprometa la capacidad portante del sistema ferroviario. Sin embargo, el estudio del efecto de la rigidez vertical de la vía no debe de limitarse al análisis de los esfuerzos. Así, el autor Fortin (1982) desarrolló una serie de estudios teóricos sobre el fenómeno de la deformación dinámica de la línea Paris-Lyon, poniendo de manifiesto la influencia de la rigidez vertical de la vía en la resistencia al avance de los vehículos.

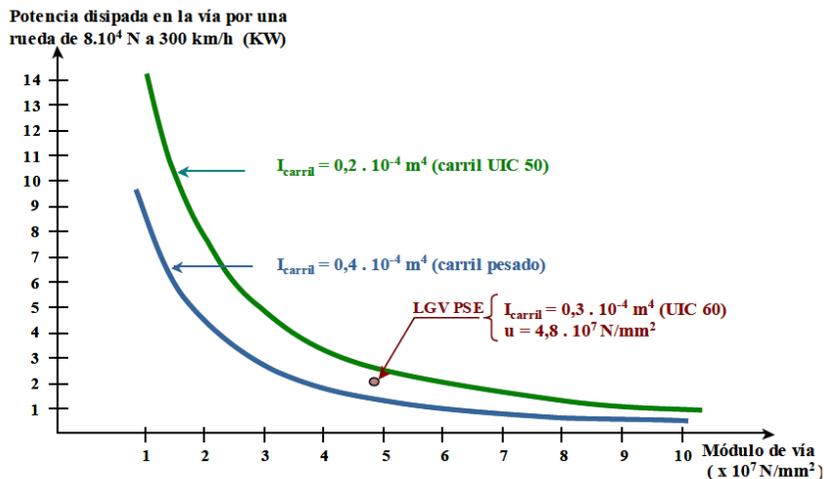


Figura 28: Relación entre la rigidez de la vía y energía disipada al paso de los vehículos (Sauvage y Fortin, 1982).

A partir de los resultados registrados (para un tren tipo TGV 100, considerando dos tipos de carril) en la Figura 28, se puede comprobar cómo el descenso de rigidez da lugar al incremento de la potencia requerida a los vehículos para su circulación por la vía, lo que daría lugar a mayor consumo energético. Así, se pone de manifiesto la necesidad de considerar el valor de rigidez de la vía a la hora de su diseño, dado que este factor puede tener notable incidencia en los costes de explotación comercial.

En vista de estas consideraciones, se hace imprescindible determinar un valor óptimo de la rigidez vertical de la vía, tratando así de evitar una serie de problemas:

- Infraestructuras con excesivo valor de rigidez vertical: se generan elevadas tensiones en el contacto rueda-carril, así como mayores sollicitaciones dinámicas y aceleraciones verticales en las traviesas y el balasto, intensificándose de esta forma el deterioro de la vía.
- Infraestructuras con reducida rigidez vertical: se produce mayor asiento del sistema de capas granulares, y por tanto, se incrementa el deterioro de la geometría de la vía. Además, se generan mayores tensiones de flexión en el carril, a la vez que aumenta la fatiga de materiales como el sistema de sujeción entre carril y traviesa. Todo ello sin olvidar el mayor consumo energético durante la explotación de la vía.

A partir de estas consideraciones, la importancia de conseguir un valor óptimo de rigidez se planteó por primera vez a partir de los estudios realizados por Prud'homme (1970, 1978 b) en los años 70, dada la necesidad de no incrementar excesivamente la rigidez vertical de la vía, lo cual también fue puesto de manifiesto a partir de investigaciones desarrolladas en Japón, Gran Bretaña y Rusia (Hirano, 1972; Kuroda, 1973; Amielin, 1974; Jenkins, 1974).

Esto motivó a autores como Raymond y Bathurst (1994) y Selig y Li (1994), a analizar el comportamiento de la vía en función de la rigidez del sistema, determinando un valor mínimo del módulo de la vía (35 MPa y 28 MPa, respectivamente) para evitar un deterioro excesivo de la calidad geométrica de la vía como consecuencia de su asiento. Sin embargo, debido a que un ligero incremento del aumento en la capacidad portante de la plataforma da lugar a un importante aumento de la rigidez de la vía, y por tanto el incremento de los esfuerzos, a finales de la década de los 70, en España se desarrolló un catálogo de secciones estructurales con el fin de limitar la magnitud de la rigidez vertical. Estos estudios, conducidos por López Pita (1978), definieron secciones de vía con la menor rigidez posible, a la vez que los esfuerzos sobre todos los componentes fuesen inferiores a los máximos admisibles.

Basándose en los estudios anteriores, López Pita (1984) formuló que la magnitud óptima de rigidez vertical de una vía debería ser tal que se optimizase el binomio entre sollicitaciones dinámicas verticales y energía disipada en la vía, estableciendo este valor óptimo en torno a 50-60 KN/mm para vías con circulaciones a 200 km/h, y a 70-90 KN/mm para una velocidad de 300 km/h.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Por otra parte, el autor Hunt (1997) mostró que la flexibilidad óptima de la pista debía de situarse en torno a 50-100 kN/mm bajo traviesa, consiguiendo de esta forma mayor intervalo entre las tareas de bateo, además de contar la vía con un periodo de vida de carril apropiado. De igual modo, el autor Sussmann et al. (2001) estableció similar rango de rigidez óptima del sistema con el fin de reducir el deterioro de la vía.

Posteriormente, Teixeira (2003) profundizó en este tema, desarrollando una metodología que permitiera obtener un valor óptimo de rigidez vertical de la vía para líneas de alta velocidad. Para ello, representó (Figura 29) por medio de formulaciones matemáticas la relación de la energía disipada por los vehículos y del deterioro de la vía con la rigidez vertical global, en base a los costes energéticos y de mantenimiento derivados.

A partir del análisis en conjunto de dichas formulaciones matemáticas, se obtuvo que el valor de la rigidez óptima que optimiza los costes mencionados queda establecido en 78 kN/mm, pudiendo este factor verse modificado dependiendo de las características de la vía y los vehículos, así de la fluctuación de los precios del mercado. Así, el rango de rigidez óptima podría quedar definido entre 70 y 80 kN/mm, el cual también fue establecido tras estudios de mantenimiento en las líneas Paris-Lyon y Madrid-Sevilla (recogido en Dahlberg, 2010), en los que se consideró la evolución de dichos costes de mantenimiento frente a la rigidez vertical de las líneas consideradas.

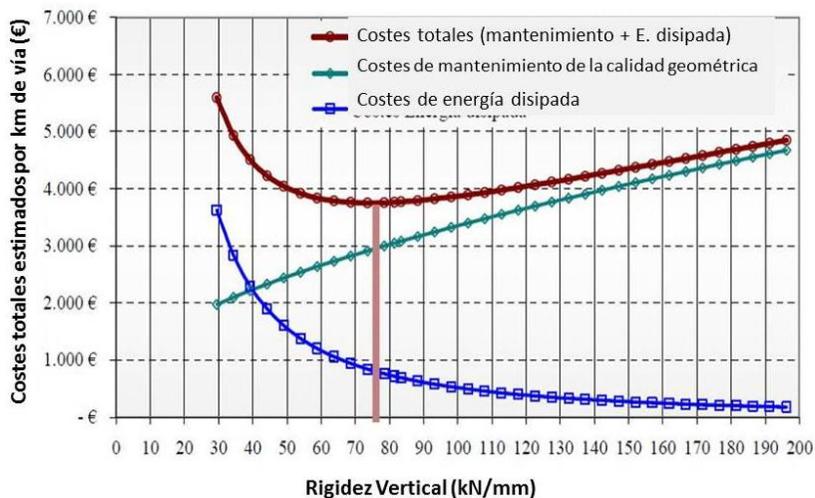


Figura 29: Evolución de los costes totales de mantenimiento de la calidad geométrica de la vía y de energía disipada con la rigidez vertical de la vía (Teixeira, 2003).

De esta forma, se demuestra que la adopción de un valor óptimo de la rigidez del conjunto es un factor importante de diseño de las vías de ferrocarril, siendo éste analizado por diversos autores bajo distintos criterios, dado que este parámetro puede influir de forma considerable en el comportamiento del sistema. Así, resulta necesario desarrollar soluciones (como elementos elásticos con distintas características) que permitan graduar la rigidez de la vía.

2.3.4 Variaciones de la rigidez vertical de la vía

Por su parte, a pesar de la definición de un valor óptimo de rigidez a lo largo de la vía, se debe tener en cuenta que en la práctica dicho valor fluctuará por diversos motivos, lo que puede llevar a una serie de problemas en relación al comportamiento del sistema, así como en su deterioro geométrico y el efecto de las vibraciones transmitidas por el paso de los trenes. El origen de las variaciones de rigidez vertical de la vía puede ser diverso, siendo los principales:

- Variaciones en la capacidad portante de la infraestructura debido a singularidades geológicas a lo largo del trazado de la vía, así como cambios de rigidez entre tramos sobre terreno natural y obras de fábrica (vía en placa, túneles, viaductos, etc.). Como ejemplo, el autor López Pita (1983) a partir de los datos medidos en la vía convencional que une Madrid y Barcelona (tramo entre Baidés y Siguëenza), comprobó que podían darse variaciones de rigidez de hasta el 50% en tramos inferiores a 100 metros.

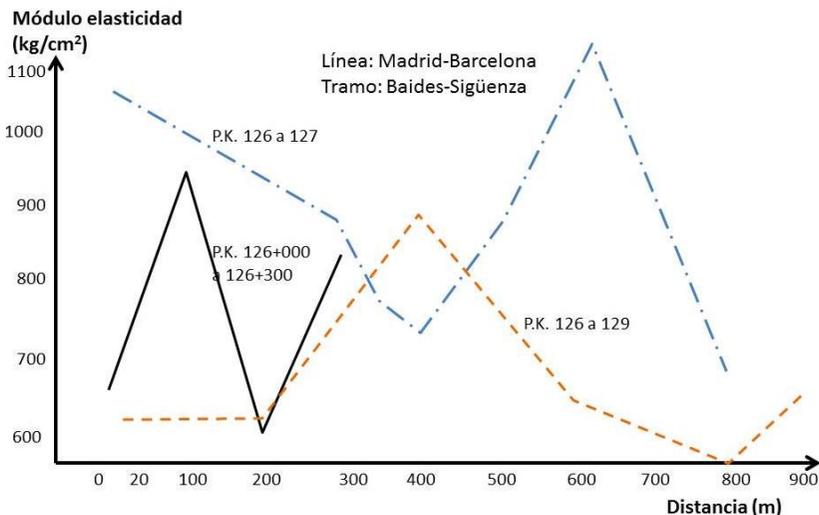


Figura 30: Medidas anteriores al año 1983 de cambios de rigidez a lo largo de la línea convencional Madrid-Barcelona, España (López Pita, 1983).

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

- Heterogeneidades en la capa de balasto como consecuencia de variaciones en la compactación del material, así como su naturaleza. También pueden existir cambios de comportamiento debidos al deterioro diferencial de la capa de balasto, y a las tareas de bateo con adición de áridos (Ebersöhn y Selig, 1994).
- Defectos de danza de traviesas relacionados con el asiento del balasto que puede dar lugar a la pérdida del apoyo directo de las traviesas (conocidas como “traviesas colgantes”; en inglés “hanging sleepers”). Este hecho hace que la traviesa quede literalmente suspendida por encima de la capa de balasto, disminuyendo así el número de apoyos que ofrecen soporte real, a la vez que incrementan los desplazamientos verticales de la vía al paso de los trenes. Además, este fenómeno se ve acentuado con el tiempo y el deterioro de la vía (Olsson y Zackrisson, 2002).
- Singularidades a lo largo de la vía como pueden ser los casos de desvíos de vía, cruces o incluso juntas de carril. En estos puntos pueden aparecer heterogeneidades en la respuesta del sistema como consecuencia de las variaciones como la distancia entre las traviesas o la masa e inercia del carril.

En el análisis del fenómeno de cambios de rigidez de la vía, Amielin (1974) comprobó que las cargas dinámicas pueden variar de forma considerable dentro de un mismo tramo de vía sobre terreno natural, siendo este hecho acentuado (pudiendo multiplicarse las sobrecargas dinámicas hasta por un factor igual a 2) en zonas de transición entre tramos sobre terreno natural y secciones de vía sobre obras de fábrica.

También la Administración Nacional Sueca de Banverket (Berggren, 2007) desarrolló una campaña de medidas en pistas para evaluar el comportamiento de la vía y las posibles variaciones de rigidez a lo largo de la misma (Figura 31), comprobando que en general existe una continua oscilación de la rigidez del sistema como consecuencia de la capacidad de flexión del carril. Esto se debe a que ante el paso de los vehículos sobre las traviesas, la respuesta de la vía es más rígida, mientras que en los puntos entre las traviesas (espaciadas 65 cm en dicho estudio sueco) se obtienen mayores deflexiones del carril (Witt, 2008; Dahlberg, 2010).

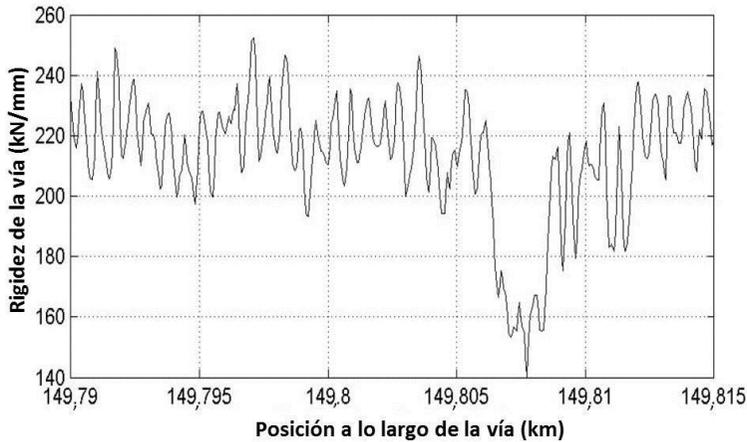


Figura 31: Oscilaciones de rigidez medidas en una vía sueca (Berggren, 2007).

De igual modo, otros autores (Esveld, 1980; López Pita, 1983; 1978; Stewart, 1985; Ebersöhn y Selig, 1994) han comprobado que las variaciones de rigidez del sistema formado por capas de asiento y plataforma de la vía, aceleran el deterioro geométrico de la misma. Además, el autor austriaco Riessberger (1978) analizó las variaciones de rigidez vertical que pueden tener lugar a lo largo de las vías ferroviarias, y el efecto de la operación de bateo, comprobando que las variaciones de rigidez de la vía pueden incluso incrementarse (Figura 32) como consecuencia de problemas de asiento de la capa de balasto o deterioro del mismo por las propias tareas de mantenimiento.

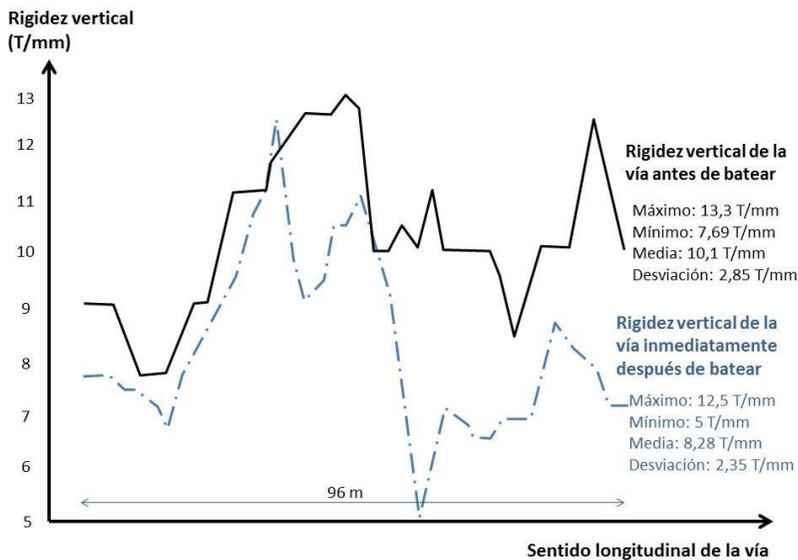


Figura 32: Efecto de las operaciones de bateo en la rigidez de la vía (Riessberger, 1978).

De esta forma, se pone de manifiesto que las tareas de mantenimiento habitualmente llevadas a cabo en líneas de ferrocarril no permiten mejorar las variaciones de rigidez, las cuales se demuestra que son muy comunes, y sus efectos pueden ser perjudiciales tanto desde el punto de vista del deterioro de la vía como desde la transmisión de vibraciones. Así, sería necesario desarrollar medidas que permitan mitigar los cambios de rigidez, y por tanto, sus consecuencias.

2.3.5 Posibles soluciones para obtener un valor óptimo y homogéneo de rigidez

En relación a las posibles soluciones de diseño para conseguir un valor óptimo de la rigidez vertical de la vía, el autor Teixeira (2003) puso de manifiesto que la opción más efectiva y viable es la variación de la rigidez de las placas de asiento de carril. Esto es debido a que si se quiere reducir la rigidez vertical del sistema mediante el descenso de la rigidez de los carriles, de las traviesas, o la capacidad portante de las capas granulares, esta medida provoca una importante disminución de la resistencia vertical del sistema. Sin embargo, al modificar la flexibilidad del sistema mediante el uso de elementos elásticos con características apropiadas (placas de asiento, suelas bajo traviesa y mantas elásticas) se mantiene la capacidad resistente vertical de la vía, siendo esta medida una solución efectiva para conseguir un valor apropiado de la rigidez vertical de la vía.

Además, de acuerdo con las recomendaciones de la UIC (2011, 2013) establecidas a partir de diversas experiencias, para evitar la aceleración del deterioro de la pista como consecuencia de los cambios de rigidez, una solución apropiada es conseguir una variación gradual de las deflexiones de la vía mediante la introducción de elementos elásticos con distinta flexibilidad vertical. Esta solución es requerida cuando los cambios en la deflexión del carril son superiores a 0,5 – 1,0 mm (dependiendo de la velocidad del tren), siendo necesario realizar una zona de transición con variación gradual de la rigidez vertical de la vía. La longitud del tramo de cambio de flexibilidad del sistema debe ser superior al resultado de multiplicar la velocidad de proyecto de la vía por 0,5 segundos (tiempo mínimo considerado para evitar problemas en la circulación de los trenes y el deterioro de la vía).

De esta forma, el uso de elementos elásticos para conseguir un valor adecuado de rigidez vertical homogéneo a lo largo de la vía podría dar solución a problemas asociados al deterioro de la vía y su calidad geométrica dado que se

podrían reducir los asientos diferentes. De igual modo, desde el punto de vista de las vibraciones, esta solución evitaría la transmisión de ondas generadas por irregularidades de larga longitud en la vía.

2.4 Elementos elásticos

En el análisis de los principales problemas de la infraestructura ferroviaria, así como la importancia de adoptar un valor óptimo de rigidez vertical, se ha podido comprobar que el uso de elementos elásticos puede ser una medida efectiva para prevenir el efecto de dichos problemas. Así, en muchos países, el sistema de la estructura incorpora de forma habitual elementos elásticos ante la circulación de vehículos a mayores velocidades y con mayor capacidad de carga, puesto que permiten disminuir el efecto de fenómenos como la licuefacción del balasto, el deterioro de la geometría, la variación de rigidez a lo largo de la vía o la propagación de ondas, entre otros.

Los elementos elásticos están formados principalmente por polímeros, los cuales cuentan con ventajas como peso ligero, alta resistencia, antioxidante y fácil de moldear. No obstante, presentan como principal problema que pueden deteriorarse por diversos factores medio ambientales como temperatura, oxidación o hidrólisis, teniendo una vida útil de aproximadamente 20 años (Ito y Nagai, 2008; Lakuši et al., 2010). Además, su elevado coste también supone un inconveniente para generalizar su uso, por lo que existe la tendencia actual a desarrollar nuevos componentes a partir de materiales elásticos alternativos que permiten reducir el sobrecoste asociado al uso de estos elementos en vías de ferrocarril.

Las posibilidades de disposición de los componentes elásticos son múltiples, pudiendo situarse entre diversos elementos dentro tanto del sistema con balasto como en la vía en placa. Sin embargo, los dispositivos más estudiados son las placas de asiento del carril, suelas bajo traviesas y mantas elásticas fijadas bajo el balasto o el subbalasto.

2.4.1 Placas de asiento

El uso habitual de traviesas de hormigón a partir de mediados del siglo pasado, cuya rigidez es de 3 a 5 veces superior a la de las traviesas de madera, provocó el incremento de la rigidez de la vía, en torno al doble según datos recogidos por el Comité D-117 del ORE (1974). Este hecho generalizó el empleo de placas de asiento elásticas (internacionalmente conocidas como URP, "Under Rail Pad"), debido a la necesidad de intercalar un elemento elástico entre el carril y

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

la propia traviesa para contrarrestar el incremento de rigidez del sistema. Además, con la disposición de estos elementos se trata de reducir las vibraciones e impactos entre ambos componentes.

Las placas de asiento suelen ser empleadas de forma habitual como componente elástico en sujeciones tipo directas, es decir, interponiéndose directamente entre el carril y las traviesas (Figura 33), pudiendo ser utilizadas también en sujeciones indirectas (Figura 34) en las que se colocan las placas de asiento entre los componentes de la sujeción y el carril.



Figura 33: Sistema de sujeción directo, con placa de asiento (Sistema MLG).



Figura 34: Placas elásticas debajo del sistema de sujeción indirecta (Edilon Sedra).

Las placas de asiento proporcionan una serie de beneficios al sistema ferroviario gracias a su comportamiento elástico y su capacidad para amortiguar cargas procedentes del tráfico de vehículos. El uso de estos materiales permite obtener una mayor distribución de las solicitaciones transmitidas por el carril a las traviesas, y por tanto, a la capa de balasto. Sin embargo, como se ha dicho para el caso genérico de los elementos elásticos, para las placas de asiento su principal inconveniente también está asociado al elevado precio de estos componentes debido al uso de elastómeros de altas prestaciones para su fabricación, lo que puede incrementar de forma

considerable los costes de construcción dependiendo del material empleado en la producción de las placas de asiento.

2.4.1.1 Principales características de diseño de las placas de asiento

Las placas de asiento, por ser el elemento de la sujeción encargado de amortiguar los esfuerzos aplicados sobre el carril y transmitidos a la traviesa, requieren una buena capacidad de amortiguación con el fin de conseguir una mejor conservación de los elementos de la vía, así como mejorar el confort en la marcha del vehículo (Kaewunruen y Remennikov, 2005a; Manescu, 2009)

El material utilizado en su fabricación debe tener cierta elasticidad para permitir la disipación de vibraciones y cargas, contando además con adecuada resistencia al rozamiento y al deterioro climático. Los principales materiales usados en su elaboración son: caucho, polímeros, polietileno de alta densidad (HDPE), elastómero termoplástico de poliéster (TPE) y etileno vinil acetato (EVA) (Carrascal, 2006; Kaewunruen y Remennikov, 2006a).



Figura 35: Distintos tipos de placas de asiento (Carrascal, 2006; Carrascal et al. 2007).

Sin embargo, debido a que el precio de estos materiales supone un hándicap para su uso, en los últimos años se está tratando de desarrollar nuevos elementos a partir de materiales reciclados, pudiendo destacar el uso de placas fabricadas a partir de partículas de caucho (Figure 36) procedentes de neumáticos triturados (CDM, Isolgoma, etc.). No obstante, estos materiales también tienen asociado un importante coste derivado de la necesidad de triturar los neumáticos, y su posterior tratamiento para obtener los gránulos de caucho.



Figura 36: Placas de asiento fabricadas a partir de polvo de neumático (CDM).

En relación a las propiedades geométricas de las placas de asiento, en general, estos componentes cuentan con diversos diseños para su mejor adaptación al sistema de sujeción entre la traviesa y el carril, permitiendo de esta forma un comportamiento solidario del conjunto.

No obstante, en general, sus dimensiones horizontales suelen ser próximas a 180 mm x 140 mm para carril tipo UIC 54, y 180 mm x 148 mm para carril UIC 60. Respecto al espesor de las placas, éstas suelen tener un valor comprendido entre 4,0 y 15,0 mm lo cual permite obtener sistemas elásticos con distintas respuesta ante cargas verticales, pudiendo de esta forma graduar la rigidez de las placas para conseguir un valor óptimo de su rigidez.

Por otra parte, el parámetro característico de las placas de asiento es el valor de su rigidez vertical (k), dado que esta magnitud tiene una notable incidencia en el comportamiento vertical global del sistema. Estos materiales presentan en términos generales un comportamiento no lineal, por lo que para el estudio de su influencia dentro de la pista, es habitual considerar el valor de rigidez tangente para la carga de diseño de la vía, o el valor secante entre la carga mínima y máxima de diseño (AEA Technology Rail, 2005).

La Figura 37 muestra un ejemplo del comportamiento de placas de asiento fabricadas con distintos materiales para una vía con carga de diseño igual a 70 kN.

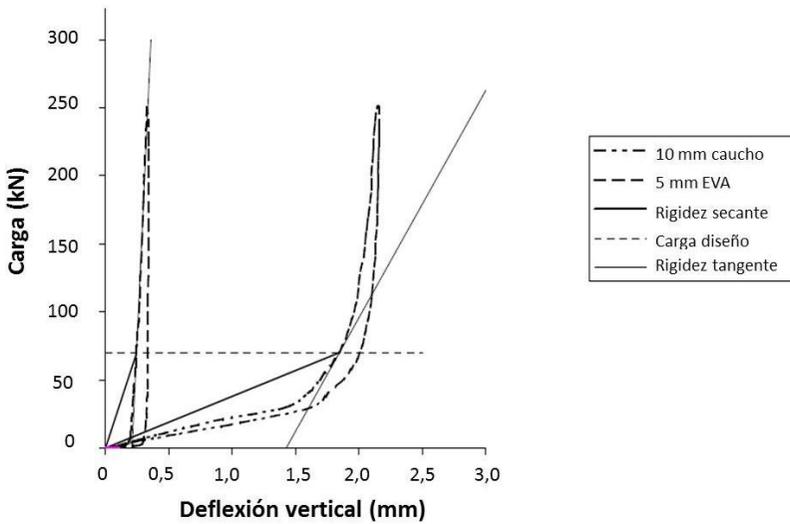


Figura 37: Típicas curvas carga/deflexión registradas para placas de asiento (AEA Technology Rail, 2005).

A partir de estos dos parámetros de rigidez (tangente y secante), el utilizado de forma habitual para clasificar las placas de asiento se corresponde con el valor de rigidez secante del material (k). De esta forma, una de las posibles clasificaciones, propuesta por López Pita (2006), consiste en dividir las placas en blandas ($k < 80$ kN/mm), de rigidez media (80 kN/mm $< k < 150$ kN/mm), y rígidas ($k > 150$ kN/mm).

También Vincent et al. (1996) en su estudio sobre la influencia de la rigidez de las placas en la emisión de ruido de rodamiento, clasificaron las placas como blandas ($k \approx 130$ kN/mm), medias ($k \approx 410$ kN/mm), rígidas ($k \approx 1300$ kN/mm), muy rígidas ($k \approx 4100$ kN/mm), y extremadamente rígidas ($k \approx 13000$ kN/mm). Por su parte, ADIF (Administrador Ferroviario Español) indica que para el uso de placas blandas en Alta Velocidad, su rigidez estática debe situarse en valores comprendidos entre 80-125 kN/mm.

De esta forma, se comprueba que no existe un consenso general para la clasificación de las placas de asiento atendiendo a su valor de rigidez, ya que se ha visto que existen notables diferencias dependiendo de la bibliografía consultada, y en función del problema a tratar dentro del comportamiento de la vía. No obstante, en esta tesis doctoral, la clasificación utilizada será a partir del criterio establecido por ADIF, distinguiendo entre placas muy blandas (rigidez inferior a 80 kN/mm), placas blandas (entre 80 y 125 kN/mm), y placas de rigidez media y alta (mayor a 125 kN).

2.4.1.2 Evolución de las características de diseño de las placas de asiento

El progresivo aumento de la velocidad y carga transportada en el ferrocarril, junto con los cambios desarrollados en el diseño de la estructura ferroviaria con la aparición de las vías de alta velocidad, han llevado a una importante evolución en las características de diseño de las placas de asiento, así como los materiales utilizados en la elaboración de estos elementos. Las primeras placas empleadas en líneas convencionales fueron de tipo rígido, con el fin de no deteriorar las traviesas de madera sobre las que apoyaban los carriles. Su misión básica era repartir la carga del carril sobre una superficie mayor que la ocupada por el patín del carril, sobre su asiento en la traviesa.

Sin embargo, la introducción de traviesas de hormigón, que incrementaba notablemente la rigidez vertical de la vía (de acuerdo con la ORE, 1974), llevó a la necesidad de que las placas de asiento, además de distribuir la carga en una superficie mayor, permitieran reducir la rigidez del sistema. Así, este hecho supuso el descenso de rigidez de las placas de asiento, pasándose a utilizar elementos elásticos con mayor flexibilidad compuestos principalmente de caucho o polietileno (López Pita, 2001; Pahisa Rouna y López Pita, 2012).

Esta tendencia a disminuir la rigidez también se puede apreciar con la llegada de la Alta Velocidad. Así, a la hora de diseñar las primeras líneas de alta velocidad francesas, y buscando la finalidad de no aumentar excesivamente los esfuerzos verticales sobre el balasto, y consecuentemente los costes de mantenimiento, los Ferrocarriles Franceses (SNCF), introdujeron placas de asiento de mayor elasticidad, para así compensar el aumento de rigidez aportado por el incremento de espesor de las capas de asiento.

De este modo, en la nueva línea París-Lyon optaron por emplear una placa de asiento entre la traviesa y el carril, caracterizada por tener un espesor de 9,0 mm frente a los 4,5 mm utilizados habitualmente en las líneas francesas con velocidades máximas de 200 Km/h. A partir de la Figura 38 se comprueba que la introducción de estas placas de asiento, las cuales tenían una rigidez de 90 kN/mm frente a los 150 kN/mm de las de 4,5 mm, permitía aumentar el espesor de las capas de asiento de la vía (y por tanto la capacidad portante de la misma) sin incrementar el coeficiente de rigidez de la pista (López Pita, 2001).

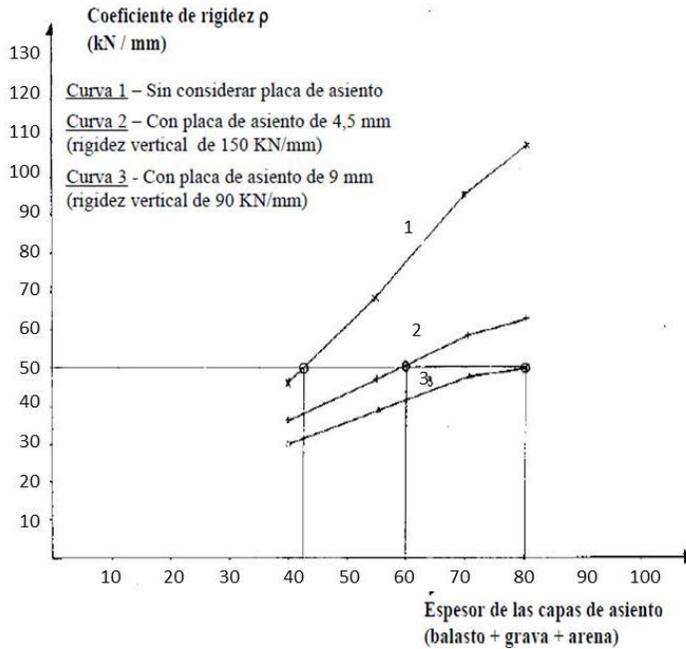


Figura 38: Relación entre el coeficiente de rigidez de apoyo (Sauvage y Larible, 1982)

A partir de los datos (Tabla 5) registrados en ensayos realizados en líneas francesas, se puede comprobar que la introducción de placas de asiento más flexibles en vías de alta velocidad lleva a mayor flexibilidad de la vía en global, para un mismo valor de rigidez del conjunto formado por capas granulares y la plataforma.

Tabla 5: Rigidez vertical del soporte del carril para diversas estructuras de asiento y placa de asiento en Francia (recogido en López Pita, 2001).

Rigidez vertical del sistema balasto + plataforma (kN/mm)	Rigidez vertical de la placa de asiento (kN/mm)		Rigidez vertical global (kN/mm)	
	Líneas convencionales	Líneas de alta velocidad	Líneas convencionales	Líneas de alta velocidad
46	150	90	35,2	30,4
68	150	90	46,8	38,7
96	150	90	58,5	46,4
107	150	90	62,4	48,8

Además, se pudo comprobar que este hecho es más notable al disminuir la flexibilidad del conjunto. Así, para una rigidez de las capas de asiento de 46 kN/mm, el descenso de la rigidez del sistema al incorporar placas más blandas

fue de 4,8 kN/mm (un 13,6%, dado que se pasó de 35,2 kN/mm a 30,4 kN/mm), mientras que para el caso de una vía con rigidez de la subestructura igual a 107 kN/mm, la reducción de rigidez del sistema provocada por pasar de placas de 150 kN/m a 90 kN/m fue de 13,6 kN/mm (21,8%) (recogido en López Pita, 2001).

Siguiendo esta misma tendencia a disminuir la rigidez de las placas de asiento, los ferrocarriles alemanes, en sus primeras líneas de alta velocidad, Hannover-Würzburg y Mannheim-Stuttgart, emplearon placas de asiento (tipo ZW 687) con una rigidez vertical de 500 kN/mm, con características muy similares a las empleadas tradicionalmente en vías convencionales. Sin embargo, debido al deterioro de las partículas de balasto, se decidió reducir la rigidez de las placas de asiento con el objetivo de disminuir las tensiones y vibraciones transmitidas a la capa de balasto.

Así, en líneas de alta velocidad como la que une Hannover con Berlín, se emplearon placas de asiento de rigidez próxima a 60 kN/mm. En paralelo, en esta misma línea, se proyectó un nuevo tipo de superestructura de vía formada por carriles de 60 kg/m y traviesas distanciadas 63 cm entre ellas, incorporando placas de asiento de rigidez vertical de 27 kN/mm y con espesor de hasta 10 mm. Este modelo de sección de vía se colocó en un tramo de ensayo de 14 km entre Hannover y Berlín, a su paso por el entorno de la población de Stendal (López Pita, 2001; Teixeira, 2003), permitiendo así reducir la rigidez del sistema, y el deterioro del balasto.

Por otra parte, en España, las primeras experiencias se realizaron en la línea de alta velocidad entre Madrid y Sevilla donde se utilizaron placas de asiento de 6 mm, compuestas por material EVA, con una rigidez vertical de 400 a 500 kN/mm. Posteriormente, en la línea de alta velocidad entre Madrid y Barcelona, el criterio adoptado fue el de utilizar placas de asiento de 7 mm de espesor, cuya rigidez del material era inferior al utilizado en las placas empleadas en la primera experiencia, consiguiendo así una reducción de la rigidez de las placas entre cuatro y cinco veces, estableciéndose el valor de estas últimas en 100 kN/mm (Puebla, 1999).

De igual modo, en la Tabla 6 (la cual resume la evolución de la rigidez de las placas de asiento en algunos países europeos), se puede observar que otros países como Bélgica e Italia emplean placas de asiento más flexibles en vías de alta velocidad.

Tabla 6: Rigidez vertical de la placa de asiento en diferentes países europeos (Teixeira, 2003).

País	Línea	Rigidez vertical placa de asiento K_{pa} (KN/mm)
<i>Francia</i>	Líneas convencionales	150 (o superior)
	Líneas alta velocidad	90
<i>Alemania</i>	Líneas convencionales	500 (o superior)
	Líneas alta velocidad	
	-Hannover-Wüzburg	500
	-Mannheim-Stuttgart	500
	-Hannover-Berlin	60
- Stendal	27	
<i>España</i>	Líneas convencionales	500 (o superior)
	Líneas alta velocidad	
	-Madrid-Sevilla	500
	-Madrid-Barcelona	100
<i>Italia</i>	Líneas alta velocidad	100
<i>Bélgica</i>	Líneas convencionales	100
	Líneas alta velocidad	60

Sin embargo, ante la tendencia a disminuir la rigidez de las placas de asiento empleadas en vías ferroviarias, en particular en vías de alta velocidad, diversos autores se han planteado la cuestión de saber hasta cuánto se puede reducir este parámetro para conseguir mayor amortiguación del sistema, sin que surjan dificultades derivadas del comportamiento dinámico de la pista, como problemas de giro de carril o fatiga del sistema de sujeción.

Además, en relación a la necesidad de obtener un valor óptimo de la rigidez del conjunto, de acuerdo con autores como López Pita (2006) y Teixeira (2003), las placas de asiento deben tener un valor de rigidez apropiado para cada tipo de vía. Así, Teixeira (2003), tras ensayos realizados en Francia, relacionó la energía disipada y la rigidez vertical del sistema, llegando a decir que para una vía de alta velocidad estándar, es decir, vía balastada sobre plataforma natural y velocidad de circulación de 300 km/h, la rigidez óptima de la placa de asiento es próxima 60 kN/mm.

De esta forma se puede comprobar que la rigidez de las placas de asiento queda determinada por las características de la vía, siendo necesario establecer un valor óptimo para evitar problemas en el comportamiento del sistema. Así, por un lado, el descenso de la rigidez del elemento elástico lleva a menores cargas dinámicas y reduce los esfuerzos transmitidos a traviesas, aunque podría provocar un hundimiento excesivo de la vía, con una importante elevación de la tensión de los carriles y un mayor consumo de energía. Mientras que por otro lado, el aumento de la rigidez de la placa produce un incremento de las sobrecargas dinámicas debido a las masas no suspendidas, mayor fatiga de carril y sujeciones, menor energía disipada y posibles giros de carril, así como problemas de levante y de sobre ancho, lo que acelera el deterioro de la vía.

Por tanto, para mantener la calidad de la vía, a la vez que se consigue el equilibrio entre los costes de mantenimiento y explotación de la pista, algunas administraciones ferroviarias han establecido límites máximos y mínimos del valor de rigidez secante de las placas de asiento. En el caso de ADIF, la rigidez vertical de estos materiales debe estar comprendida entre 80 y 125 kN/mm, para una carga máxima de diseño de la vía de 190 kN por eje.

2.4.1.3 Estudios y experiencias sobre placas de asiento

En Grecia, como consecuencia de la aparición en los años 80 de fisuras en más del 60% de las traviesas bloque de hormigón empleadas en vías ferroviarias griegas, se llevó a cabo un amplio programa de estudios para determinar el origen del problema, y establecer posibles soluciones. Se comprobó que las traviesas empleadas en vías griegas eran similares a las utilizadas en el mismo periodo por los ferrocarriles franceses (SNCF). Sin embargo, mientras que en las vías francesas (con tráfico superior a 50.000 t/día a velocidad próxima a 200 km/h) las traviesas se mantenían en buen estado, en las líneas griegas (velocidad de los trenes inferior a 140 km/h y menos de 10.000 t/día) aparecieron fisuras bajo la zona de asiento del carril (Giannakos, 2010).

La principal diferencia entre ambas experiencias residía en la disposición de placas de asiento rígidas (250 kN/mm) en el caso de la vía ferroviaria en Grecia. Así, a partir de diversos estudios, y el desarrollo de otras experiencias (como en el caso de Alemania) en las que se empezaron a utilizar placas de asiento de menor rigidez (40 kN/mm), se pudo comprobar que el origen de la fisuración de las traviesas estaba relacionado con la flexibilidad de los elementos elásticos bajo carril.

La influencia de las placas de asiento en la resistencia de las traviesas también ha sido evaluada mediante ensayos de laboratorio que tratan de analizar la capacidad de las placas para atenuar cargas de impactos, dado que aunque la probabilidad de que el contacto rueda-carril provoque un esfuerzo de impacto que conlleve al fallo extremo de la traviesa es muy baja (sólo una o dos veces durante la vida útil de este componente), es importante conocer la respuesta del sistema ante dichas cargas. Un ejemplo de ello es un estudio realizado por Kaewunruen y Remennikov (2008b), los cuales emplearon un equipo (Figura 39) capaz de dejar caer un peso desde gran altura (6 m). Las placas elásticas utilizadas para atenuar el impacto entre traviesa y carril estaban constituidas por material HDPE, con un espesor de placa de 5,5 mm.



Figura 39: Equipo de gran capacidad de impacto (Kaewunruen y Remennikov, 2008b).

A partir de este estudio, se llegó a la conclusión de que este elemento puede reducir hasta un 50% la tensión dinámica que el carril transmite a las traviesas (dependiendo de la rigidez de las placas), siendo el resto atenuado por las propias traviesas, el sistema de suspensión de los propios vehículos, y a partir de la degradación de las partículas de balasto.

De igual modo, un estudio realizado por Carrascal et al. (2011) trató de determinar la capacidad de amortiguación de impactos por parte de placas de asiento, evaluando a su vez la influencia de la rigidez de estos elementos en su

comportamiento. Este tipo de placas, con 7 mm de espesor y compuestas por un material elastómero termoplástico (TPE), tenían en ambas superficies horizontales una serie de oblongos, que se comportaban como pequeños muelles capaces de absorber los esfuerzos ocasionados por la circulación de trenes.

A partir de la caída de una maza sobre un conjunto formado por carril-placa de asiento-traviesa, simulando los impactos que tienen lugar en la vía, se pudo medir que las placas de asiento utilizadas en este estudio (con rigidez próxima a 100 kN/mm) permiten una atenuación del orden del 50 %, en referencia con placas de asiento rígidas (en este caso, con rigidez estática superior a 450 kN/mm). Además, la Figura 40 muestra que la deformación máxima medida en la parte superior e inferior del lateral de las traviesas de hormigón disminuye al reducir la rigidez de las placas de asiento. Esto pone de manifiesto la importancia de la rigidez de estos materiales en la capacidad para disipar las cargas transmitidas a los componentes subyacentes, y por tanto, su efecto en la conservación de la calidad de la vía.

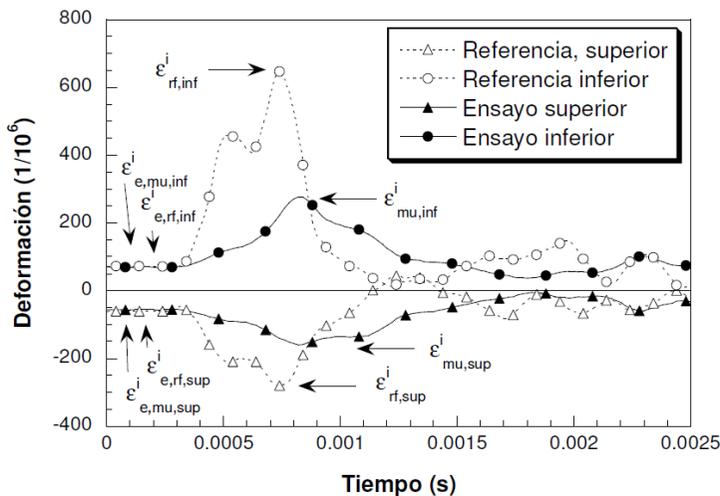


Figura 40: Curvas deformación vertical/tiempo para evaluar la capacidad de atenuación de placas de asiento tomando una muestra rígida como referencia (Carrascal et al., 2011).

Otro trabajo (Egana et al., 2006) centrado en el estudio del efecto de las placas de asiento en el deterioro de la vía, analizó la influencia de estos materiales en la evolución del fenómeno de la corrugación del carril, el cual además tiene notable importancia en el problema de transmisión de vibraciones. Previo a este estudio, Ilias (1999) ya había probado que la rigidez de las placas de

asiento puede tener un importante efecto en la formación de ondulaciones de carril.

De igual modo, Egana et al. (2006) analizaron la influencia de sustituir las placas de asiento empleadas en una línea de metro de Bilbao (España) por otras más blandas. Para ello, se midieron las modificaciones en el perfil del carril (en un tramo en curva) antes y después de realizar el cambio de elementos elásticos (placas con rigidez de 90 kN/mm por placas de 60 kN/mm), llevando el estudio un periodo de ensayos de 19 meses. Como conclusión se pudo extraer que el empleo de placas de asiento blandas reducía el crecimiento de la corrugación del carril, aumentando la longitud de las ondas y reduciendo su amplitud (Figura 41) hasta un 55%, en relación a los datos tomados para placas con mayor rigidez.

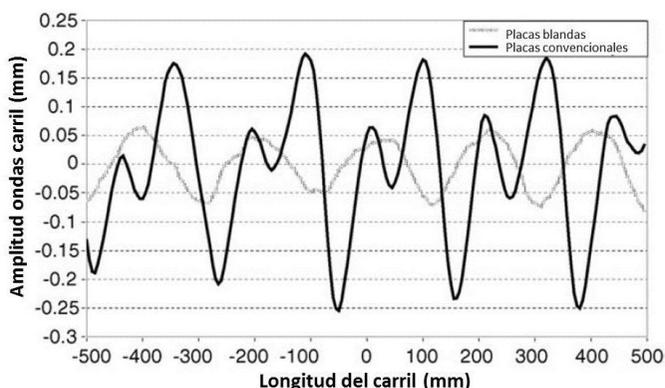


Figura 41: Medidas de la influencia de la rigidez de las placas de asiento en la amplitud de la corrugación de carril (Egana et al., 2006).

Por su parte, Teixeira (2003) también analizó la influencia de las placas de asiento en su comportamiento, evaluando en este caso mediante estudios teóricos, la incidencia de este parámetro en la respuesta global del sistema ferroviario. Así, en la Figura 42 se puede observar que para una vía con similar capacidad portante del sistema balasto-plataforma, la utilización de placas rígidas (en este estudio 500 kN/mm) lleva al incremento de la rigidez del sistema global, mientras que en el caso de placas blandas (90 kN/mm), éstas permiten reducir el exceso de rigidez de la vía, siendo este hecho más acentuado al aumentar la rigidez del sistema balasto-capas de asiento. Como ejemplo, para una rigidez de 100 kN/mm del conjunto de capas granulares, el uso de placas blandas puede llevar a un descenso de rigidez de la vía superior al 35%.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

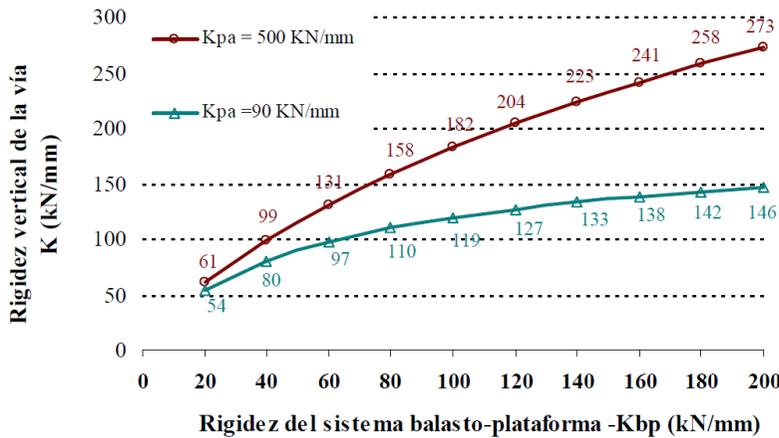


Figura 42: Influencia de la rigidez de las placas de asiento en la rigidez global de la vía (Teixeira, 2003).

No obstante, un descenso notable de la rigidez de las placas puede dar lugar a elevadas deflexiones, y por tanto, consumo de energía por parte de los vehículos. En base a estos resultados, Teixeira (2003) expuso que las placas de asiento permiten regular la magnitud de la rigidez vertical global de la vía, con el objeto de conseguir un valor óptimo.

Otro aspecto a considerar es la incidencia de las placas de asiento en los cambios de rigidez del sistema, dado que éstos pueden acelerar el deterioro de la vía, así como la intensificación de las vibraciones transmitidas a la infraestructura. Como caso específico, transiciones de vía de 40 kN/mm a 80 kN/mm se traducen en unos incrementos de la tensión transmitida al balasto de 40% en la traviesa más solicitada con relación a las traviesas inmediatamente contiguas del lado flexible (López Pita, 2006). Con el empleo de placas de asiento de mayor elasticidad se reduce y homogeniza la rigidez vertical de la vía en tramos de diferente capacidad portante, permitiendo atenuar de forma muy relevante las sobrecargas sobre el balasto (Teixeira, 2003). La rigidez de estas placas debe de ser menor de 100 kN/mm, obteniéndose los mejores resultados con placas muy elásticas (50kN/mm) (López Pita, 2006; Dahlberg, 2007).

En cuanto a la influencia de la rigidez de las placas de asiento en las vibraciones y el ruido generado por componentes de la vía como carril y traviesas, Thompson y Jones (2006) evaluaron mediante modelos de vía la incidencia de este parámetro en la magnitud y frecuencia de oscilación de las ondas. De

acuerdo con la Figura 43, la instalación de placas rígidas llevará a una disminución de las vibraciones (verticales y laterales) a lo largo del carril como consecuencia de la reducción del movimiento de este componente, dado que la disposición de placas rígidas permite fijar el carril a las traviesas, limitando los desplazamientos de ambos componentes. Sin embargo, el uso de este tipo de placas puede dar lugar al incremento del ruido y vibraciones emitidas por las traviesas debido a la menor capacidad de estas placas de asiento para amortiguar las cargas y movimientos transmitidos por el carril.

Por otro lado, si se utilizan placas de asiento blandas, éstas permiten reducir los esfuerzos sobre las traviesas y la capa de balasto, disminuyendo de esta forma el deterioro de los mismos, pero a su vez incrementan las vibraciones y ruido emitido por el carril dado que estas placas permiten mayor movimiento de del conjunto carril-sujeción (Thompson y Jones, 2006).

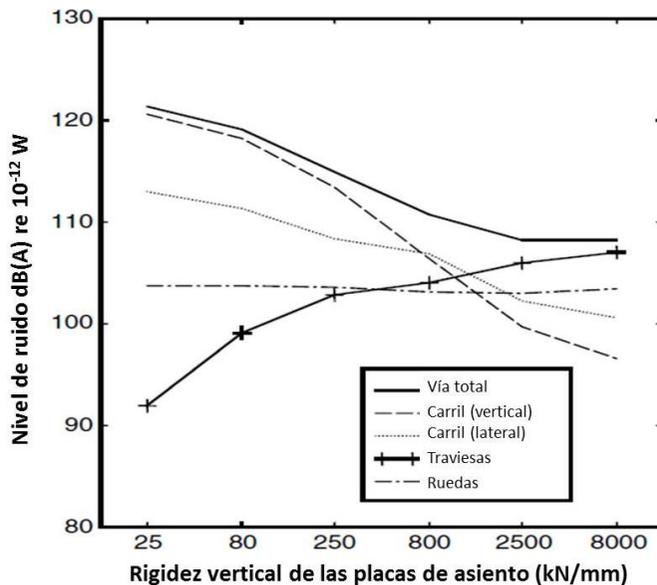


Figura 43: Efecto de la rigidez de las placas de asiento en la emisión de ruido de diversos componentes ferroviarios (Thompson y Jones, 2006).

Además, en este estudio se llegó a la conclusión de que estos elementos elásticos tienen especial influencia en frecuencias medias de emisión de ruido. Así, las placas blandas tienen mayor efecto en las ondas de frecuencia inferior a 250 Hz, mientras que para el caso de placas de asiento clasificadas como de rigidez media o alta (según López Pita, 2006), las frecuencias aumentan hasta 450 Hz y 800 Hz, respectivamente.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

La importancia de la rigidez de las placas de asiento en las vibraciones, ya había sido puesta de manifiesto a partir de un estudio de modelización llevado a cabo por Vincent et al. (1996), los cuales indicaron que es posible conseguir un valor mínimo de emisión sonora mediante la consideración de forma conjunta del ruido transmitido por el carril y las traviesas. Así, para el estudio realizado por estos autores (los cuales consideraron distintas placas de asiento, carril UIC 60, traviesas bloque, distancia entre traviesas de 0,6 m y una rigidez vertical de la capa de balasto de 67 kN/mm) se determinó un valor óptimo de rigidez de la placa en torno a 1500 y 1800 kN/mm, para reducir la emisión de ruido total de la vía, independientemente del estado de la misma (Figura 44).

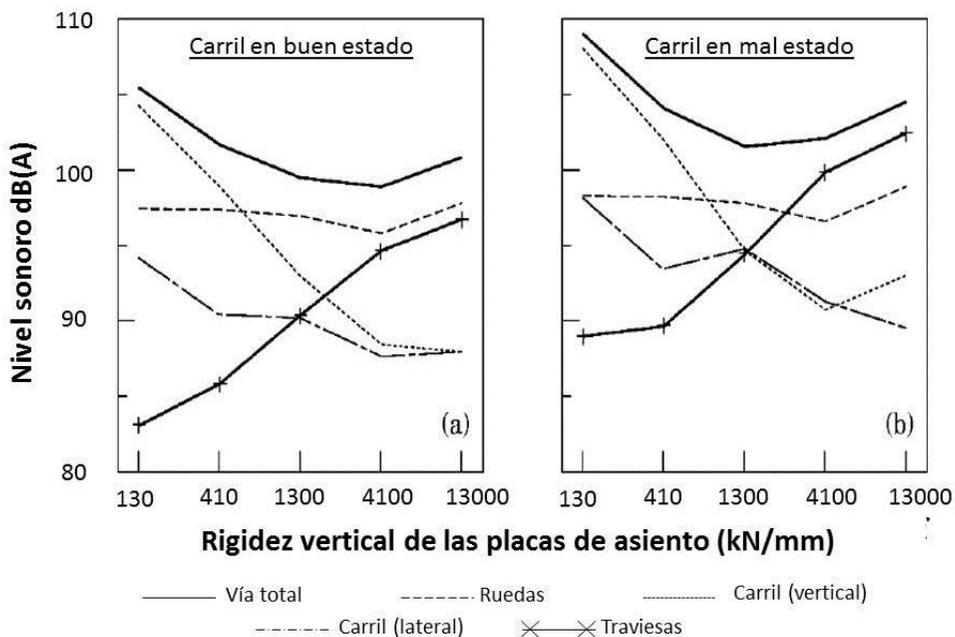


Figura 44: Influencia de las placas de asiento en la emisión sonora, en función del estado de la vía (Vincent et al., 1996).

En relación a la influencia de la rigidez de las placas en el comportamiento de la capa de balasto, Leykauf et al. (2004) pusieron de manifiesto que la introducción de placas de menor rigidez llevaba a menores velocidades de vibración de las partículas granulares que componían las capas de balasto utilizadas en líneas ferroviarias convencionales de Alemania, en las cuales se emplearon carriles tipo UIC 60 y traviesas monobloque tipo B70 (salvo en una línea que se emplearon traviesas B75). La Figura 45 muestra que los menores valores de velocidad de vibración se obtuvieron para el caso de las placas de

asiento de 27 kN/mm de rigidez, seguido de la vía con placas de 60 kN/mm, mientras que las mayores vibraciones se registraron para las placas de 500 kN/mm. Además, este hecho fue más acusado entre el rango de frecuencias comprendido entre 16 Hz y 250 Hz, pudiendo obtener un descenso máximo superior al 90% .

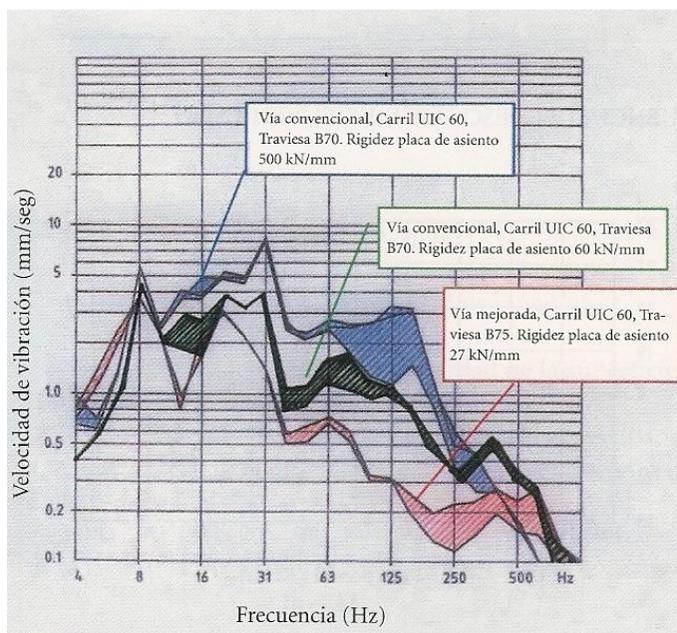


Figura 45: Efecto de la rigidez de las placas de asiento en las vibraciones de balasto (López Pita, 2006).

Al igual que para el caso de las vías ferroviarias convencionales, estudios realizados por la DB (Deutsche Bahn) comprobaron que en las líneas de alta velocidad, la reducción de la rigidez de las placas de asiento, además de permitir el aumento de la flexibilidad del sistema, llevó al descenso de las vibraciones transmitidas a la capa de balasto. En la Figura 46, se puede observar que la sustitución de placas de asiento rígidas por otras con mayor flexibilidad dio lugar a un importante descenso de las vibraciones de las partículas de balasto, siendo este hecho acentuado con el incremento de la velocidad de circulación de los trenes. Esto indicaba que el empleo de placas más blandas podría reducir el deterioro de la capa de balasto, evitando así problemas como la licuefacción del balasto (referenciado en López Pita, 2001).

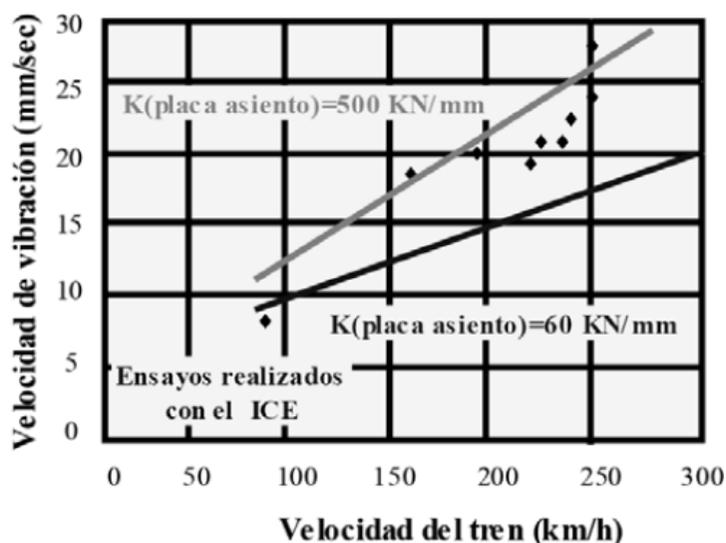


Figura 46: Influencia de la rigidez vertical de la placa de asiento en la velocidad de vibración del balasto (recogido en López Pita, 2001).

Por su parte, Kaewunrue y Remennikov (2006a) analizaron mediante modelización de la vía (considerando el modelo de viga de Timoshenko sobre muelles elásticos), la influencia de la rigidez de las placas de asiento (hasta valores de 5000 kN/mm) en la vibración de las traviesas sobre la capa de balasto, y del sistema ferroviario en su conjunto. Los resultados mostraron que la rigidez de la placa es un parámetro fundamental a la hora de estudiar el comportamiento de la vía, dado que pueden tener notable efecto en la frecuencia de resonancia de las traviesas y en los tres primeros modos de vibración del sistema, pudiendo también afectar en modos superiores.

No obstante, en los trabajos de modelización del comportamiento de la vía se debe de tener en cuenta el efecto de considerar una única rueda de los vehículos de forma independiente, o la influencia de tener en cuenta la interacción de múltiples rudas. Así, los autores (Wu y Thompson, 2001), mediante un trabajo de modelización considerando el efecto de múltiples ruedas, comprobaron que cuando se utilizan placas blandas (en este estudio con rigidez próxima a 70 kN/mm) se pueden obtener resultados que indican una emisión sonora del carril de hasta 3 dB(A) superior para el caso de considerar una única rueda actuando en la vía. Estos autores indican que este problema se reduce al incrementar la rigidez de la placa de asiento,

obteniéndose resultados más acordes con la modelización de la vía con la sollicitación de múltiples ruedas.

A partir de los estudios vistos, se puede comprobar que la rigidez de las placas de asiento puede tener notable incidencia en el comportamiento de la vía en su conjunto, siendo así necesario determinar qué tipo de placa es más apropiada para su utilización en cada caso. La Tabla 7 resume la idoneidad de cada tipo de placa (diferenciando entre rígidas y blandas) en función del problema o aspecto a considerar sobre el comportamiento del sistema. No obstante, se deben de tener en cuenta las características de la vía a la hora de seleccionar el tipo de placa a utilizar, tratando así de conseguir un valor adecuado de rigidez vertical del conjunto.

Tabla 7: Resumen de la influencia de la rigidez de las placas en la respuesta de la vía (Elaboración propia).

Campo de aplicación	Placas rígidas (>125-150 kN/mm)	Placas blandas (<125 kN/mm)
Reducción deterioro traviesa		✓
Descenso carga transmitida capas inferiores		✓
Atenuación impactos		✓
Reducción de la corrugación		✓
Descenso deflexión carril. Menor consumo de energía por los trenes	✓	
Disminución cambios rigidez		✓
Descenso movimientos carril. Reducción fatiga sujeción	✓	
Reducción vibraciones carril	✓	
Descenso ruido	✓	
Reducción vibraciones traviesas y partículas balasto		✓

Debido a la importancia de la rigidez de las placas de asiento en el comportamiento mecánico de estos materiales, y de la pista ferroviaria en general, diversos autores han centrado sus estudios en el análisis de este parámetro, y distintos factores que pueden influenciar la respuesta de las placas. En cuanto a la influencia de la temperatura en el comportamiento de la

placa de asiento, un estudio realizado por Carrascal et al. (2007) sobre placas fabricadas a partir de elastómero termoplástico (TPE), evidenciaba la disminución de la rigidez del elemento conforme aumenta la temperatura.

Así, en la Figura 47 se puede ver que tanto en régimen estático (gráfica de la izquierda) como dinámico (gráfica de la derecha), el descenso de temperatura llevó a menores valores de deformación del material, mostrando un incremento de la rigidez (por ejemplo 20% al pasar de 50°C a 20°C) del mismo. Este comportamiento es propio de materiales poliméricos, los cuales son habitualmente empleados en la fabricación de placas de asiento gracias a su capacidad elástica.

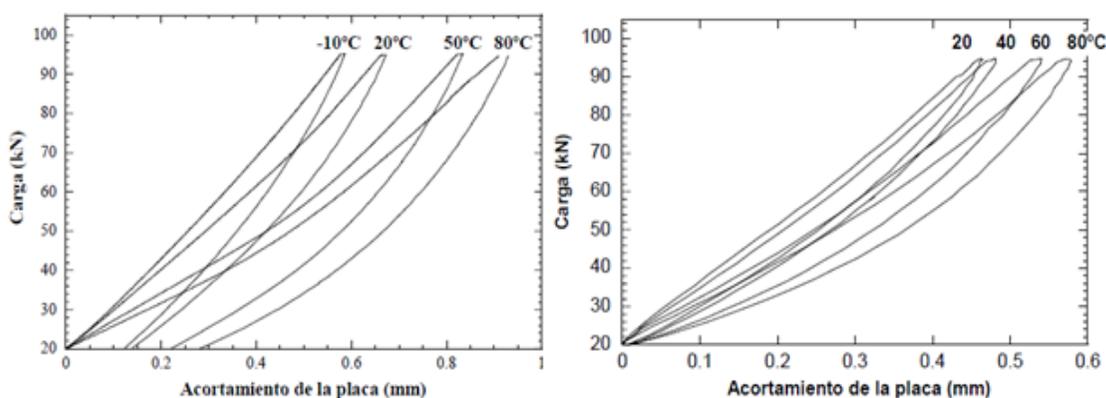


Figura 47: Comportamiento a) estático y b) dinámico a diferentes temperaturas de las placas de asiento (Carrascal et al., 2007).

En este estudio también se pudo observar que existe notable diferencia entre el comportamiento de las placas elastoméricas en régimen estático y dinámico, mostrando este último caso menor capacidad del material para deformarse, lo que indica un comportamiento más rígido (hasta un 25%, dependiendo de la frecuencia de carga) al aumentar la velocidad de aplicación de las cargas. Este hecho está en consonancia con lo mostrado por otros autores (Thompson y Verheij, 1997).

Además, a partir del análisis de la energía disipada por el material durante ensayos estáticos y dinámicos, se pudo comprobar que las placas de asiento disipan mayor cantidad de energía cuando las cargas son estáticas, siendo este hecho acentuado al incrementar la temperatura de ensayo. Esto es debido al aumento de la capacidad de deformación de los materiales poliméricos al incrementar la temperatura (Carrascal et al., 2007).

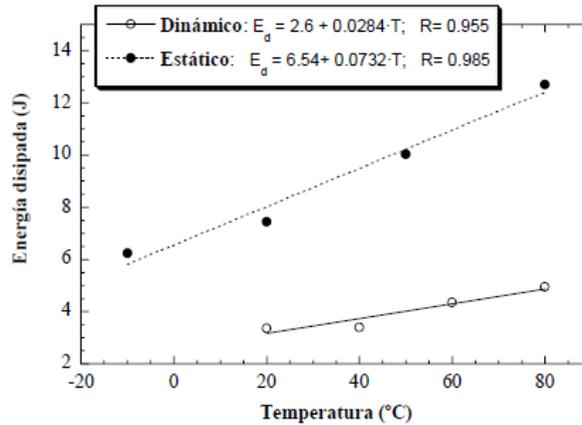


Figura 48: Energía disipada por placas de asiento (Carrascal et al., 2007).

Dentro del comportamiento dinámico, en otro estudio desarrollado por Carrascal et al., (2011) se evaluó la influencia de la frecuencia de aplicación de las cargas en la respuesta de placas de asiento, empleando para este trabajo placas con 7 mm de espesor y material elastomérico termoplástico. En la Figura 49 se puede observar que estos autores comprobaron que el aumento de la frecuencia llevaba a menores deformaciones verticales del material, mostrando así mayor rigidez. De acuerdo con los datos, un incremento de frecuencia de 10 Hz a 20 Hz, podría llevar a un incremento del 22% de la rigidez vertical. De igual modo, se pudo ver que el área encerrada por la elipse de la curva fuerza-desplazamiento incrementaba con la frecuencia de carga, poniendo de manifiesto el aumento de la capacidad del material para disipar la energía procedente de las cargas del tráfico ferroviario.

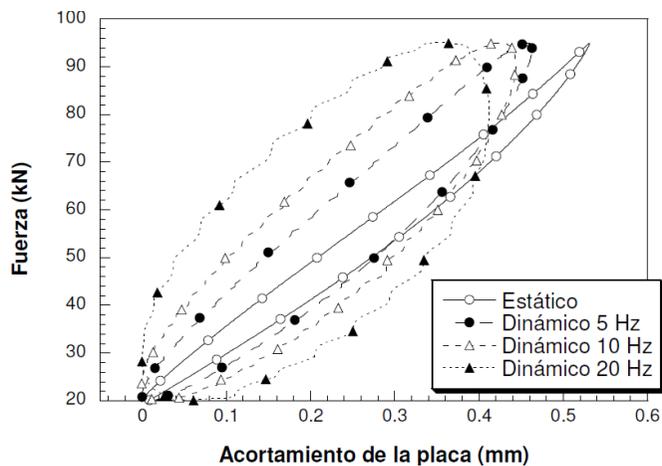


Figura 49: Curvas carga dinámica/deflexión de placas de asiento (Carrascal et al., 2011).

Otros autores como Oscarsson (2002) mostraron que la influencia de la frecuencia de aplicación de las cargas no sólo afecta a la rigidez de las placas de asiento, sino que también al factor de pérdidas de inserción sonora. Este hecho también fue probado por Thompson y Van Vliet (1996) en su estudio de laboratorio con placas de caucho, indicando un incremento superior al doble, del factor de pérdidas al pasar de 50 Hz a 1000 Hz, lo que mostraba la importancia de la frecuencia de estudio del material.

Por otra parte, otros autores (Thompson y Verheij, 1997; Kaewunruen y Remennikov, 2008c) han puesto de manifiesto que el valor de la precarga aplicada al sistema (normalmente correspondiente a la carga vertical transmitida por el conjunto de la sujeción y por el peso del carril, situándose en torno a 20 kN) tiene importante influencia en el cambio de rigidez de las placas de asiento.

Thompson y Verheij (1997), a partir de ensayos de laboratorio, y posteriores medidas en vía, indicaron que pasar de un valor de precarga de 20 kN a 40 kN puede provocar un incremento de rigidez de los elementos elásticos superior al 50 % (dependiendo de las características y material de las placas, así como del sistema de sujeción considerado), siendo este hecho acentuado al aumentar el valor de la precarga.

Estos resultados están en consonancia con los obtenidos en años posteriores por Wu y Thompson (2001), los cuales estudiaron este efecto mediante modelización del sistema. Este hecho también fue mostrado por Maes et al. (2006), quienes emplearon precargas de 15, 20, 25 30 y 40 kN, mostrando en la Figura 50 la rigidización dinámica conforme se incrementa el valor de la precarga, pudiendo ver también la influencia de la frecuencia en el incremento de rigidez del material, aunque este último factor mostró tener menor influencia que el valor de la precarga.

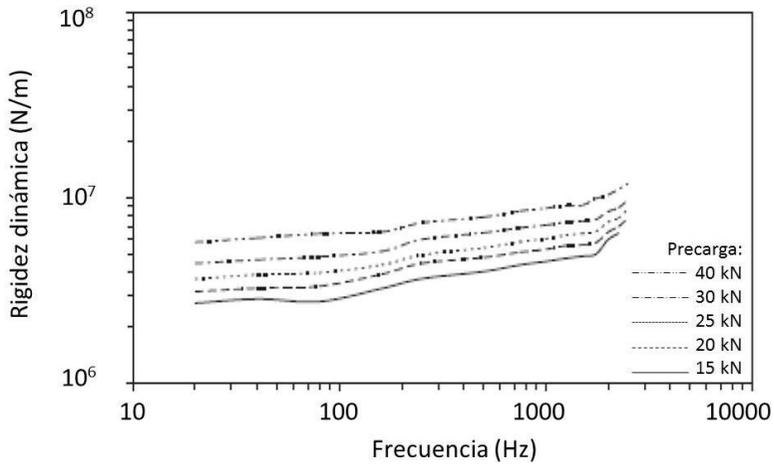


Figura 50: Influencia del valor de la precarga en la rigidez de las placas de asiento (Maes et al., 2006).

No obstante, además de analizar la influencia de distintos parámetros (como frecuencia de carga, rigidez del sistema balasto-plataforma y valor de precarga) en la respuesta mecánica de las placas de asiento, también es importante determinar la evolución de las propiedades (en especial la rigidez del material) de dichas placas. Así, a partir de la utilización de un equipo desarrollado en la Universidad de Wollongong (Australia), Kaewunruen y Remennikov (2005b y 2009) evaluaron la degradación de placas de asiento (Figura 51), y su cambio en las características mecánicas. Esto permite predecir su vida útil, lo cual es fundamental para evitar problemas (degradación de traviesas y partículas de balasto) derivados del mal estado de los elementos elásticos.



Figura 51: Aspecto visual de placas degradadas (Kaewunruen y Remennikov, 2005b).

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

El equipo mencionado (Figura 52) permite realizar ensayos no destructivos basados en la respuesta de vibración del material elástico (con un excitador capaz de aplicar cargas con frecuencia de hasta 1000 Hz), lo que ha demostrado ser un método de ensayo rápido y eficaz para la identificación de la rigidez dinámica y la constante de amortiguamiento de las placas bajo carril (Kaewunruen y Remennikov, 2005b y 2006b). En este estudio, los autores emplearon placas con 5,5 mm de espesor, compuestas por un elastómero conocido como HDPE (polietileno de alta densidad). A partir de los resultados obtenidos para placas nuevas, y placas empleadas en vías durante 18 años, se encontró que la tasa anual de degradación de la rigidez dinámica era de aproximadamente 13 kN/mm, y la tasa de amortiguación es 41 Ns/m. Esta información es muy importante en el mantenimiento y procedimiento de renovación de las placas de asiento.

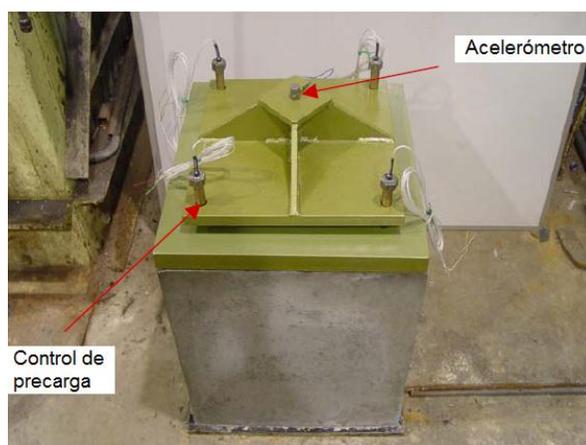


Figura 52: Equipo de ensayo para evaluar la degradación de placas de asiento (Kaewunruen y Remennikov, 2005b).

Otros autores como Carrascal et al. (2010) también han centrado sus estudios en analizar el deterioro de las propiedades mecánicas (en especial la variación de la rigidez del material) de las placas de asiento. En este caso, evaluaron el efecto de envejecimiento (reproducido de forma artificial en laboratorio) en el comportamiento de dos tipos de placas de asiento (con rigidez estática próxima a 100 kN/mm), compuestas por TPE a las que se les inyectaron dos materiales comerciales diferentes.

Los procesos de deterioro desarrollados fueron diversos (Figura 53): fatiga térmica, envejecimiento térmico, radiación UV, procesos de degradación

oxidativa, absorción de agua, fatiga mecánica, degradación por hidrocarburos, etc. El efecto de estos procesos fue evaluado mediante la determinación de los cambios de rigidez del material, comprobando que para ambos tipos de placas estudiadas el desgaste mecánico artificial (consistente en la aplicación repetida a largo plazo de ciclos de compresión), fue el proceso más dañino e influyente en la variación de la rigidez de las placas de asiento (Figura 53).

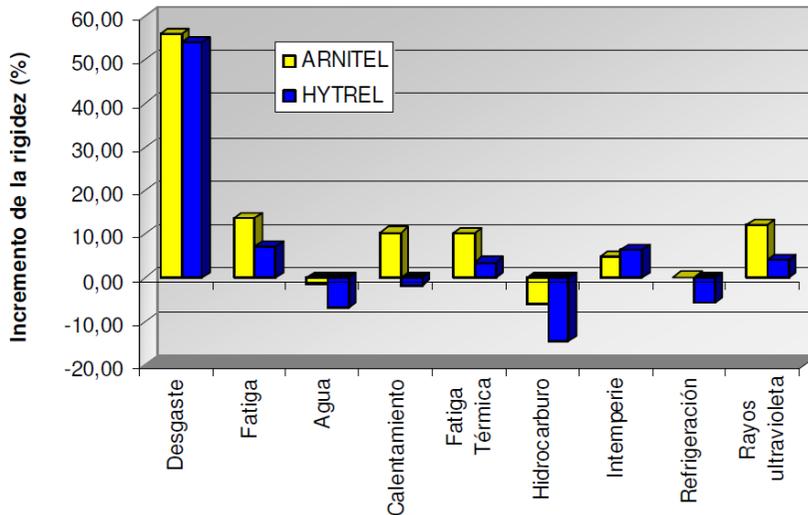


Figura 53: efecto de distintos procesos de deterioro en la rigidez vertical de las placas (Carrascal et al., 2010).

También caben destacar estudios (Folta, 1944; Kaewunruen y Remennikov, 2009) sobre la influencia del material constituyente de los elementos elásticos, los cuales llevan a decir que las placas de caucho son menos rígidas que las de HDPE y se provocan menores deformaciones en traviesas que las EVA ante impactos, siendo, por tanto, muy importante la elección del tipo de material. De igual modo, un estudio de laboratorio desarrollado por Thompson y Verheij (1997) analizó la influencia de emplear placas de caucho y placas EVA (ambas con 4,5 mm de espesor) en el comportamiento dinámico de estos materiales. Los resultados mostraron que para similares niveles de carga vertical, las placas EVA presentaron valores de rigidez dinámica (para altas frecuencias de carga, entre 100 y 1000 Hz) del orden del doble a los medidos para placas de caucho, las cuales presentaron mayor factor de pérdida de amortiguación.

Con el fin de sintetizar la influencia de diversos parámetros en el comportamiento de las placas de asiento, en la Tabla 8 se recogen los cambios

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

de rigidez esperados para estos materiales ante la variación de los factores de estudio.

Tabla 8: Resumen de la influencia de distintos parámetros en la rigidez de las placas de asiento (Elaboración propia).

Parámetros	Incremento rigidez	Descenso rigidez
Temperatura (<i>incremento</i>)		✓ Influencia media
Cargas dinámicas	✓	
Frecuencia (<i>incremento</i>)	✓ Baja influencia	
Precarga (<i>incremento</i>)	✓ Alta influencia	
Desgaste mecánico	✓ Alta influencia	
Fatiga del material	✓ Alta influencia	
Envejecimiento térmico	✓ Influencia media	
Tipo de material	✓	✓

2.4.2 Suelas bajo traviesa

Las suelas bajo traviesas, conocidas internacionalmente como “Under sleeper pads” (USP), se vienen utilizando desde hace más de 30 años, obteniéndose buenos resultados en el comportamiento de la vía donde estos elementos elásticos han sido empleados. No obstante, ha sido en la última década cuando se ha incrementado su uso y desarrollo, principalmente en Europa Central, debido a la construcción de nuevas líneas de alta velocidad con altas exigencias de calidad y que requieren elementos elásticos que reduzcan el exceso de rigidez provocado por el aumento del número y nivel de compactación de las capas de asiento de la vía para aumentar su capacidad portante (Johansson, 2006).

El ámbito de aplicación de las suelas bajo traviesa se sitúa, principalmente, en líneas de alta velocidad, trayectos con elevadas cargas sobre ejes, y vías ya existentes que necesitan elementos que permitan amortiguar las cargas procedentes del tráfico de vehículos. Dentro de estos casos, las suelas elásticas se emplean generalmente en puntos específicos y particulares del trazado de la vía, siendo los más comunes (Lakuši y Haladin, 2010; UIC Project Under Sleeper Pads, 2009).

- Cruces y desvíos (lugares donde el acceso a la compactación es difícil).
- Portadores de hormigón, especialmente en juntas de expansión y zona final de puentes largos.
- Puentes de corta longitud.
- Zona de transición entre vía con balasto y vía en placa, así como entre secciones sobre terreno natural y obras de fábrica.
- Zonas donde se requiere una reducción de las vibraciones al terreno y del nivel sonoro emitido por las traviesas y las partículas de balasto.
- Tramos de vía con reducido espesor de balasto.
- Vías que requieran mejorar la calidad de la vía, reduciendo fenómenos como el de corrugación.

Además, las suelas bajo traviesa suelen ser empleadas como solución sustitutiva del aumento del espesor de la capa de balasto o subbalasto, cuando es necesario incrementar la elasticidad de la vía y reducir las cargas transmitidas a las capas de asiento. Esta medida permite reducir el consumo de áridos naturales a la vez que se evitan problemas en la compactación de las capas granulares como consecuencia del aumento de su espesor (Lakuši y Haladin, 2010). Por otro lado, el uso de suelas elásticas también es adecuado en aquellos tramos de vía que requieren un reducido espesor de la capa de balasto, como puede ser el caso de tramos en túnel con problemas de gálibo (UIC, 2013).



Figura 54: Suelas elásticas adheridas a la parte inferior de las traviesas (recogida en López Pita, 2006).

Dentro de las diversas aplicaciones para estos materiales, el uso de suelas elásticas entre el balasto y las traviesas es una solución cada vez más extendida puesto que estos materiales contribuyen a reducir las cargas y vibraciones procedentes de las traviesas de hormigón, las cuales tienen una capacidad de amortiguamiento inferior a la deseada desde el punto de vista de minimizar el deterioro de la vía. De acuerdo con algunos fabricantes de estos materiales, como son Edilon Sedra y Getzner Werstoffe, la incorporación de suelas lleva a una pérdida de inserción de las vibraciones entre 10 y 15 dB para frecuencias próximas a 63 Hz.

A pesar de todos estos beneficios, el uso de suelas bajo traviesas sigue siendo limitado debido a su coste, el cual puede llegar a ser próximo al 40% del precio total de la traviesa (López Pita, 2006), lo que provoca importantes sobrecostes constructivos. No obstante, el incremento de coste inicial se podría ver en parte compensado por la reducción de costes derivados del mantenimiento y explotación (asociados a interrupciones del tráfico ferroviario) debido a la mejora del comportamiento a largo plazo de la vía y de su calidad geométrica. Además, el desarrollo de nuevos materiales alternativos podría suponer un impulso para su generalización de uso debido a la reducción de costes.

2.4.2.1 Características de diseño de las suelas bajo traviesa

Las suelas elásticas, ubicadas en la parte inferior de las traviesas, son componentes ferroviarios de baja rigidez fabricados a partir de elastómeros y polímeros como caucho, poliuretano y material EVA (Johansson, 2006; UIC, 2013). El espesor adoptado de forma común para las suelas suele oscilar entre 5,0 y 20,0 mm, dependiendo del comportamiento mecánico requerido para estos materiales. En relación a sus dimensiones horizontales, las suelas suelen disponerse bajo la zona de asiento del carril en la traviesa, con una longitud de 1,0 m (en traviesas monobloque) o bajo el bloque de hormigón (en traviesas bi-bloque), y una anchura de unos 18-28 cm (Müller-Boruttau y Kleinert, 2001; Especificación Técnica de ADIF-E.T. 03.360.574.2, 2010).

Para cumplir con las funciones exigidas a las suelas bajo traviesas, como reducir la tensión transmitida al balasto y amortiguar cargas y vibraciones procedentes de las traviesas, se requiere que el material constituyente de estos elementos mantenga sus propiedades elásticas con el paso repetido de los vehículos, adaptándose a las características de la vía. Además, las suelas elásticas deben

de tener una adecuada resistencia a la abrasión para evitar su desgaste provocado por el continuo rozamiento con las partículas de balasto (Witt, 2008).

En cuanto al diseño de las suelas, éstas pueden estar constituidas por una única banda elástica, o por dos capas solidarias: un núcleo situado en el interior de la traviesa, proporcionando la capacidad necesaria para la amortiguación de cargas y vibraciones; y una capa elástica en la parte inferior de la traviesa, en contacto con las partículas de balasto. Esta última tiene la función de proteger el núcleo resistente de los daños causados por el golpeo con el balasto, mientras que la otra capa se dispone para la unión con el hormigón durante la fabricación de la traviesa. Estas soluciones pueden ser utilizadas tanto en traviesas monobloque como bibloque. Además, el montaje de las suelas se efectúa durante la fabricación de las traviesas, por lo que no se requieren trabajos adicionales en la obra misma, con lo cual se puede conseguir un montaje rápido e independiente de las condiciones climáticas (UIC, 2013).



Figura 55: Aspecto de suelas adheridas a la cara inferior de traviesas de hormigón. (Getzner, www.getzner.com).

Al igual que para el caso de las placas de asiento de carril, para la clasificación de suelas bajo traviesas existen diversos criterios atendiendo principalmente a la flexibilidad del material. Así, una posible caracterización de las suelas elásticas puede realizarse según la rigidez vertical del elemento, distinguiendo según Witt (2008) entre suelas blandas (50 kN/mm), de rigidez media (400 kN/mm), y rígidas (3.000 kN/mm). Sin embargo, el parámetro habitual utilizado para caracterizar las suelas bajo traviesa es el módulo de rigidez estático C (N/mm³), que se corresponde con la rigidez del material por unidad de área. Atendiendo a este parámetro, las suelas pueden ser clasificadas como

rígidas (0,25-0,35 N/mm³), medias (0,15-0,25 N/mm³), blandas (0,10-0,15 N/mm³) y muy blandas (menor de 0,10 N/mm³), de acuerdo con las recomendaciones de la UIC, en las que se recoge un documento sobre la aplicación de traviesas con suelas elásticas (CEN-document, 2009, citado en UIC, 2013).

A partir de la recopilación de datos e información por parte de la UIC (International Union of Railways), las suelas rígidas y medias pueden ser apropiadas para mejorar la calidad de la vía, reducir cambios de rigidez entre tramos consecutivos, disminuir el espesor de la capa de balasto, y evitar la corrugación del carril, mientras que las suelas blandas son más apropiadas para reducir las vibraciones provocadas por el paso de los trenes.

2.4.2.2 Estudios y experiencias sobre suelas bajo traviesa

Dentro de las distintas funciones de las suelas bajo traviesas, las principales exigencias para estos materiales son proteger la capa de balasto y reducir las vibraciones transmitidas a través de la vía ante el paso de los vehículos. Así, diversos estudios experimentales han estado enfocados en analizar la influencia de estos componentes elásticos en el deterioro de la calidad de la vía (a través del asentamiento de la capa de balasto), y la transmisión de ondas.

Hacia los años 70, en la construcción de la nueva línea japonesa entre Tokaido y Shinkasen se emplearon suelas bajo traviesas en algunos tramos experimentales para evaluar el efecto de estos elementos elásticos. Los materiales empleados tenían una rigidez vertical próxima a 68 kN/mm, y fueron colocados sin ocupar la parte central de la traviesa. A partir de los datos registrados en diversos ensayos, se probó que con esta disposición, la aceleración de las vibraciones en la capa de balasto se redujo una media de 22%, a la vez que la presión transmitida al balasto descendió un porcentaje similar (López Pita, 2006), dando lugar a menor deterioro de la capa granular, y por tanto, manteniendo en mejor estado la calidad geométrica de la vía.

A pesar de esta experiencia japonesa, la mayoría de estudios sobre suelas bajo traviesa han sido realizados en Europa, ya que es donde mayor impulso se le ha dado a estos elementos elásticos. Dentro de las diversas administraciones europeas, las más implicadas en el estudio de las suelas bajo traviesa son la DB (Alemania), ÖBB (Austria), SNCF (Francia), DSB (Dinamarca), ProRail (Países Bajos), ADIF (España) y SBB (Suiza).

Entre estos países, destacan los trabajos realizados en Alemania, como por ejemplo el estudio realizado entre los años 1997 y 2000 en un puente de la línea de alta velocidad que une Hannover con Gottingen, en la cual se consideraron 4 secciones con traviesas sin elemento elástico y 2 secciones con traviesas tipo B70 con suelas cuya rigidez se situó entre 30 y 70 kN/mm (estudio recogido en López Pita, 2006). La Figura 56 muestra la evolución en los distintos tramos de los defectos de nivelación de la pista. Los puntos discontinuos representan operaciones de conservación realizadas para disminuir los defectos de la vía.

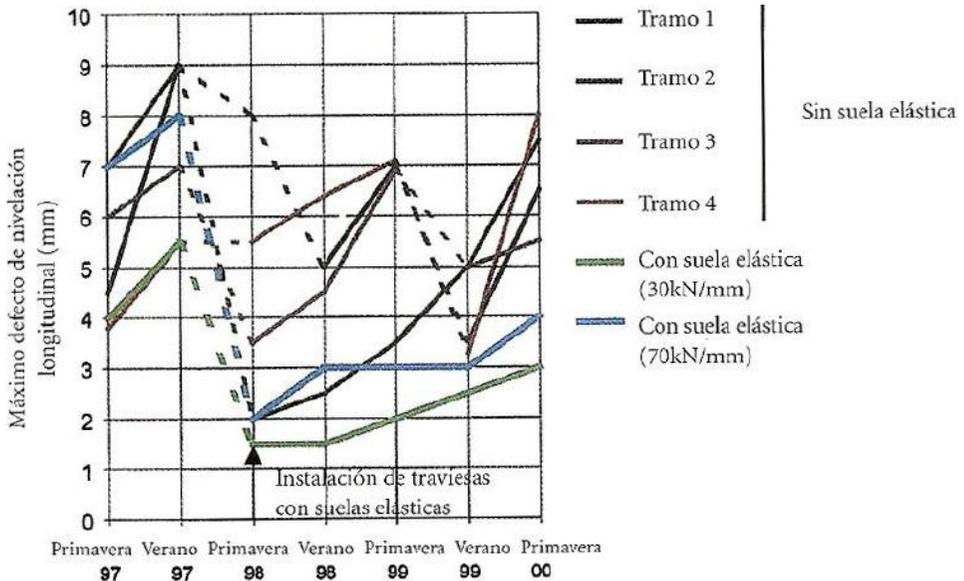


Figura 56: Efectos de las suelas elásticas en el deterioro de la nivelación de la vía (recogido en López Pita, 2006).

En base a este estudio, se puede comprobar que, en las zonas donde se colocaron traviesas con base elástica, la tasa de aumento de los defectos geométricos fue más baja que en el resto de tramos donde no se incorporan suelas elásticas. De forma concreta, para los casos con suelas se obtuvo una tasa de crecimiento de los defectos máximos de nivelación en torno a 0,7 y 1,0 mm/año, mientras que para el caso de los tramos sin suelas la cifra ascendió a valores entre 2,5 y 4,0 mm/año, es decir, entre 3 y 4 veces más. Esto indica que el uso de suelas podría reducir de forma considerable el deterioro de la geometría de la vía, y por tanto, los costes de las tareas de mantenimiento.

Otras experiencias desarrolladas en vías de Alemania para el estudio de las vibraciones transmitidas a los materiales subyacentes al utilizar suelas bajo

traviesas (cuyo módulo de rigidez era próximo a $0,2 \text{ N/mm}^3$), muestran que el espectro de valores que adopta la velocidad de las partículas de balasto se reduce (hasta cerca de un 50% para la frecuencia de 63 Hz) frente al rango que marcan las velocidades de una vía tradicional sin este tipo de elementos elástico (Stahl, 2004), llegando de esta forma a disminuir el daño provocado al balasto y la posibilidad de aparición del fenómeno de la licuefacción, a la vez que desciende la intensidad de las vibraciones transmitidas al terreno. Esto ha sido probado vías donde el uso de suelas bajo traviesas (en vías con placas de asiento rígidas) ha dado lugar a un comportamiento del orden (o incluso obteniendo menores valores de vibraciones) al obtenido en vías con placas de asiento blandas (Figura 57).

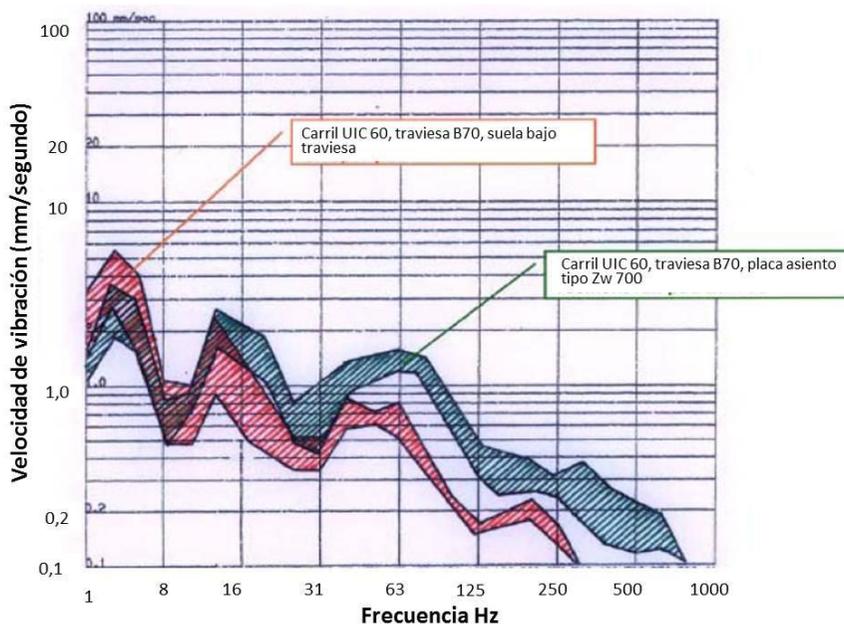


Figura 57: Velocidad de vibración en vías con y sin suelas elásticas (Stahl, 2004).

Otros ensayos alemanes también han mostrado que las suelas permiten mejorar de forma significativa el comportamiento dinámico de la vía, a la vez que reducen la magnitud de las vibraciones transmitidas a la vía (Leykauf y Stahl, 2004). Así, se comprobó que la frecuencia de la necesidad de realizar tareas de mantenimiento de la capa de balasto se redujo gracias a una mejor distribución de la carga procedente de las traviesas y al descenso de la intensidad de vibraciones en algunos rangos de frecuencia concretos, siendo especialmente ventajoso el uso de estos materiales en curvas de radio pequeño

y cuando se emplea este elemento como sustituto de mantas elásticas bajo balasto (UIC Project Under Sleeper Pads, 2009).

Estas conclusiones son extraídas de experiencias desarrolladas en los últimos años por la DB (Deutsche Bahn), la cual ha realizado un análisis en profundidad de la respuesta mecánica de las suelas (estudiando su comportamiento de forma aislada), y de la pista donde éstas han sido utilizadas (Müller-Boruttau y Kleinert, 2001). Dentro de este marco, cabe destacar el estudio realizado en un tramo de prueba donde se instalaron suelas, empleando diversos acelerómetros para medir los movimientos de los distintos componentes del sistema (el cual incluía dos tipos de traviesas, tipo B 70 y B 90). La Tabla 9 resume los datos medidos in situ sobre una vía tradicional sin suelas, y con dos tipos de suelas (rigidez igual a 70 kN/mm y 90 kN/mm).

Tabla 9: Efecto de las suelas bajo traviesas en distintos parámetros de la respuesta de la vía (Müller-Boruttau y Kleinert, 2001).

Parámetro	Traviesa B70 sin suela	Traviesa B70, suela rígida	Traviesa B90, suela rígida
Traviesa	B 70	B 70	B 90
Rigidez Suela	-	70kN/mm	90 kN/mm
Movimiento carril	0,6 mm	0,9-1,0 mm	0,6-0,7 mm
Movimiento traviesa	0,3-0,4 mm	0,6-0,7 mm	0,4-0,5 mm
Compresión de la suela	-	0,2-0,3 mm	0,1-0,2 mm
Asiento de balasto	0,3 mm	0,2 mm	0,2 mm
Hueco bajo traviesa	0,1-0,2 mm	0,1-0,2 mm	0,1-0,2 mm
Tensión relativa sobre balasto	100%	85%	65%

Los datos de la Tabla 9 muestran que la incorporación de los componentes elásticos llevó a mayores movimientos de carril y traviesas (especialmente en el tramo con suelas de menor rigidez, 70 kN/mm y traviesas con menor tamaño), estando esto relacionado con la incorporación de elementos flexibles capaces de permitir mayores desplazamientos. También se pudo ver que la disposición de suelas redujo la presión sobre la capa de balasto hasta un 35%, lo que lleva a menor deterioro de estos materiales. Además, a partir de los resultados mostrados en la Figura 58, comprobaron que las suelas permiten mejorar el comportamiento de la vía en un amplio rango de frecuencias, obteniendo un

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

ligero descenso de la presión sobre el balasto al reducir la rigidez de la suela bajo traviesa.

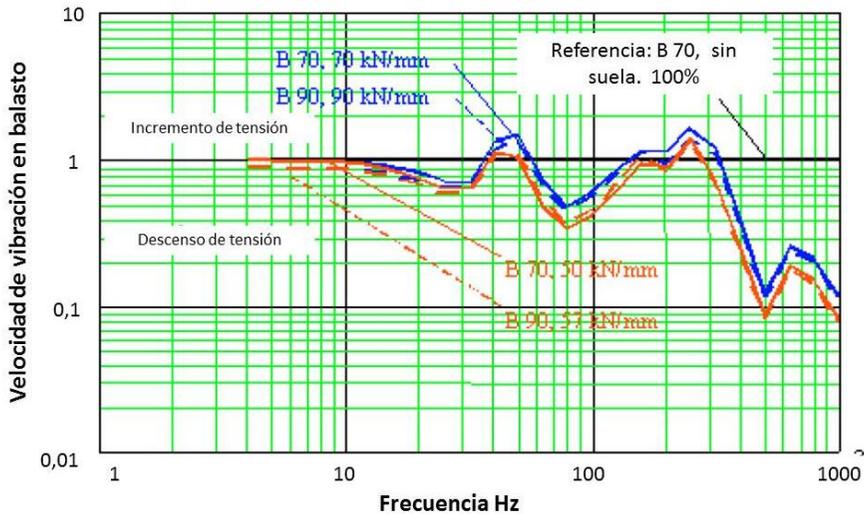


Figura 58: Efecto de las suelas (y su rigidez) en las vibraciones transmitidas al balasto (Müller-Boruttau y Kleinert, 2001).

Por otra parte, la DB para estudios de laboratorio propone el estudio de las suelas elásticas a largo plazo mediante la unión de la suela a un cubo de hormigón dispuesto sobre una capa de balasto dentro de un cajón (Figura 59). A partir de estas recomendaciones de estudio en laboratorio, se definió una normativa de ensayo (DIN 45673-6) para el estudio de estos componentes.



Figura 59: Aspecto de un cajón de balasto comúnmente utilizado en ensayos de laboratorio para evaluar suelas elásticas (UIC Project Under Sleeper Pads, 2009).

Además de los estudios recogidos en Alemania, cabe destacar otras experiencias como las realizadas en Austria, donde la ÖBB llevó a cabo en 1989 la instalación de traviesas con suelas elásticas (compuestas por bandas de poliuretano de 2-3 mm de espesor) en la línea que une Langenlebarh y Tulln. Para evaluar el efecto de las suelas, se realizaron diversas medidas del comportamiento de la vía y de la nivelación del carril, comprobando que el uso de suelas elásticas mejora la calidad geométrica de la vía. Actualmente, esta línea sigue en servicio, lo que demuestra la aptitud de las suelas bajo traviesas para mantener la geometría de la vía a largo plazo (UIC Project Under Sleeper Pads, 2009). Además, en otras experiencias desarrolladas en líneas de ferrocarril de Austria se ha comprobado que el uso de suelas permite disminuir las vibraciones transmitidas en el rango de frecuencia entre 40 y 50 Hz (Schilder, 2004).

A partir de medidas tomadas por la ÖBB entre 2001 y 2006 en tramos ferroviarios con suelas elásticas y tramos adyacentes sin estos elementos, la Figura 60 muestra que el empleo de suelas lleva a mayor homogeneidad de la magnitud de los defectos de nivelación, los cuales además son muy inferiores a los registrados para los tramos sin elementos elásticos bajo traviesas (Schilder, 2006).

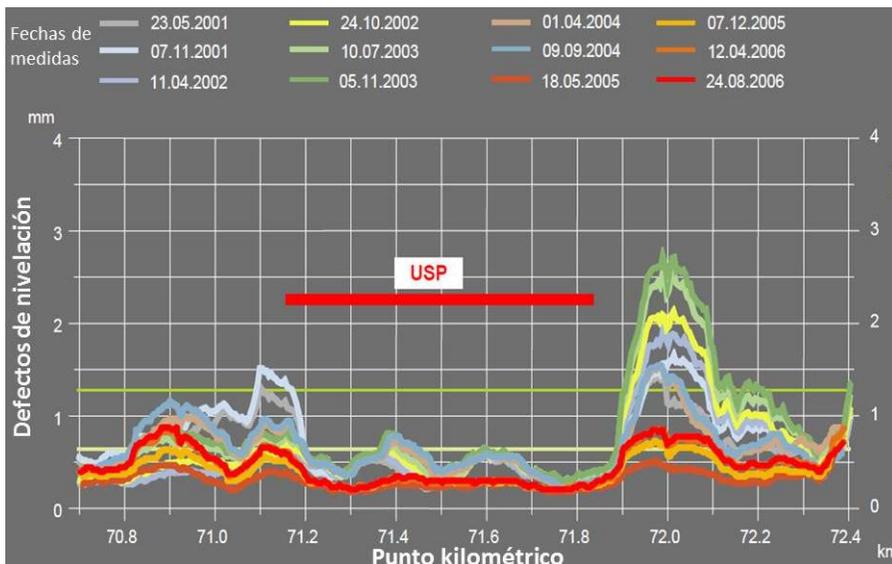


Figura 60: Efecto de las suelas en la nivelación a lo largo de la vía (Schilder, 2006).

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

No obstante, se puede observar (Figura 60) que el uso de estos elementos elásticos puede acentuar los problemas en el comienzo de los tramos adyacentes, por lo que se debe tener presente esta consideración a la hora de usar estos materiales.

También en Austria, desde la Universidad de Ganz se han desarrollado distintos estudios que relacionan los costes y la efectividad de las suelas mediante medidas de calidad de la geometría de la vía. Se encontró que el incremento de costes asociado a la disposición de suelas elásticas bajo las traviesas puede ser compensado con el aumento de la vida de servicio de la vía, así como la reducción de la degradación del balasto. Esto hace que los intervalos de bateo se incrementen hasta en 2,0 o 2,5 veces en relación a vías sin este tipo de elementos elásticos. Este hecho se ve acentuado al incrementar el volumen de tráfico, aumentar la rigidez de la vía, y reducir el radio de las curvas (Loy, 2008).

Respecto al uso de suelas en tramos en curva de radio pequeño para mejorar la calidad de la vía, la ÖBB a través de la Universidad de Innsbruck, llevó a cabo la instalación de suelas bajo traviesas (con módulo de rigidez estático superior a $0,2 \text{ N/mm}^3$) dispuestas en curvas con radio igual a 230 m y 265 m (Loy, 2008). En este tramo, se pudo comprobar que ante el paso de los primeros 5 trenes, se produjo un desplazamiento horizontal de 0,6 mm. Sin embargo, en medidas sucesivas los desplazamientos fueron prácticamente despreciables (2,5 mm) en referencia a las medidas tomadas en tramos sin suelas bajo traviesas.

Por otra parte, estudios desarrollados entre 2001 y 2008 en un tramo curvo (radio próximo a 265 m) la línea austriaca en Markerdorf han permitido evaluar el efecto de las suelas en la corrugación del carril a través de la medida de la amplitud de las deformaciones onduladas provocadas en el carril ante el paso de los trenes. La Figura 61 muestra resultados obtenidos para suelas blandas y rígidas, así como experiencias sin estos elementos elásticos. Se puede observar que el uso de suelas (rigidez próxima a $0,2\text{-}0,3 \text{ N/mm}^3$) reduce la ondulación del carril, siendo este hecho acentuado al utilizar materiales blandos (Schilder, 2006). Además, en este estudio se comprobó que el uso de suelas redujo hasta un 50% la amplitud de las ondas de corrugación después de un tráfico de 25 millones de toneladas.

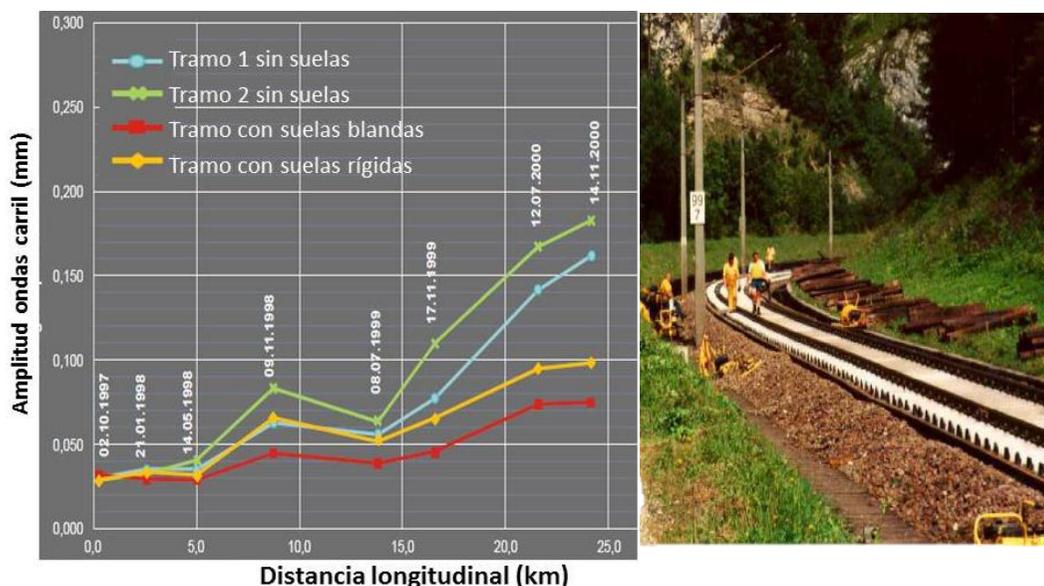


Figura 61: Efecto de la rigidez de las suelas en la corrugación de carril en tramos de prueba (Schilder, 2006).

Por otra parte, a partir de experiencias desarrolladas en Croacia en el año 2009, Lakuši et al. (2010) pusieron de manifiesto la efectividad de las suelas para reducir el ruido y vibraciones generadas por el paso de los vehículos. Para el estudio emplearon dos tipos de vía (sobre balasto y sobre losa de hormigón), utilizando traviesas con y sin suelas elásticas. Los resultados mostraron que para el tipo de vía con mayor rigidez estructural, la disposición de suelas elásticas bajo las traviesas llevó a un notable descenso de la velocidad de vibración de las ondas.

La Figura 62 muestra un ejemplo de los resultados obtenidos para el caso de vía sobre balasto (tipo de vía en la que está centrada la investigación de esta tesis), pudiendo observarse una importante reducción de las vibraciones al emplear suela elástica bajo las traviesas (Figura 62, derecha). Además, la Tabla 10 muestra que para un rango de frecuencias entre 1 y 1000 Hz, la reducción del nivel sonoro fue superior a 16 dB, obteniéndose este descenso principalmente para las bajas frecuencias (5 y 250 Hz) donde la reducción fue superior a 10 dB. Además, se comprueba que la velocidad de las vibraciones descendió de forma considerable al emplear suelas elásticas.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

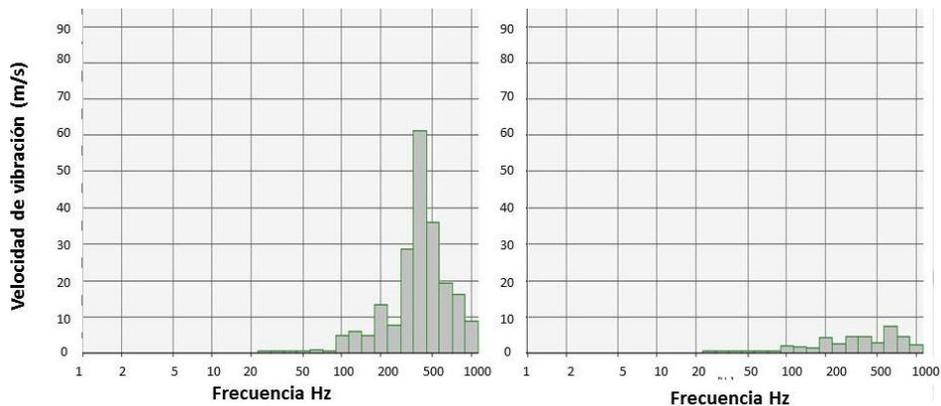


Figura 62: Efecto de las suelas en la reducción de vibraciones de la vía (Lakuši et al., 2010).

Tabla 10: Efecto de las suelas en la velocidad de vibración de las ondas, y en la reducción de ruido (Lakuši et al., 2010).

Rango de frecuencia	Sin suela (mm/s)	Con suela (mm/s)	Relación entre sin suela/con suela	Reducción vibración (dB)
1Hz - 1kHz	0,082	0,012	6,833	16,7
5Hz - 250Hz	0,017	0,005	3,400	10,6

En Dinamarca se han empleado suelas bajo traviesas en un tramo en túnel (de longitud igual a 6,6 km) de una vía sobre balasto, en la sección Øresund Link construida entre 1996 y 1997. En este tramo, la incorporación de las suelas permitió mantener en buen estado la calidad de la vía, al igual que ocurre en un tramo de vía construido en el año 2003 en Copenhague, el cual actualmente se conserva en buenas condiciones de servicio. En este último caso, se emplearon suelas bajo traviesas con el objeto de reducir el espesor de la capa de balasto. Con este fin, también existen algunas experiencias en Holanda en las cuales se han empleado suelas elásticas que además permiten reducir las vibraciones transmitidas al sistema y aumentar la elasticidad del mismo (UIC Project Under Sleeper Pads, 2009).

En España, las suelas bajo traviesas empezaron a emplearse en la construcción de nuevas líneas para alta velocidad, siendo estos elementos utilizados principalmente en zonas de transición entre tramos de vía sobre terreno natural y obras de fábrica. Actualmente, estos elementos se encuentran bajo estudio en diversas líneas de alta velocidad.

En Francia, el comportamiento de suelas ha sido estudiado mediante ensayos de laboratorio por la SNCF desde el año 1989, empleando para ello ensayos realizados en un equipo denominado “Vibrogir” (Figura 63), el cual permite evaluar la resistencia a fatiga del sistema. En estos estudios comprobaron que el uso de suelas elásticas permite reducir el deterioro del balasto y de las traviesas. No obstante, al comparar estos resultados con los obtenidos en los ensayos de laboratorio propuestos por la DB (sobre cajón de balasto), se comprueba que el empleo de distintos ensayos da lugar a diferentes resultados sobre la rigidización y pérdida de propiedades del material. Actualmente, debido a la facilidad para la generalización de los ensayos sobre cajón de balasto, éstos son los empleados de forma habitual en el análisis del comportamiento de suelas sobre medio granular.

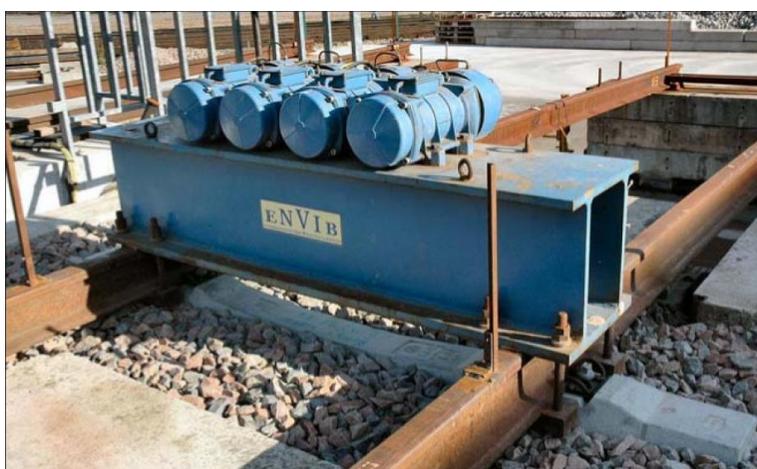


Figura 63: Dispositivo utilizado por la SNCF francesa para evaluar la respuesta de suelas (UIC Project Under Sleeper Pads, 2009).

También en Francia, a partir de experiencias realizadas en tramos de prueba, en los que se incorporaron suelas de poliuretano, se comprobó que se podía conseguir una resistencia lateral del mismo orden que la obtenida en traviesas estándares sin este componente, y los niveles sonoros se han mantenido (recogido en UIC Project Under Sleeper Pads, 2009).

En la República Checa se construyeron 2 tramos de vía en el año 2008, donde se emplearon suelas bajo traviesas para evaluar su influencia en la corrugación del carril en un tramo en curva de radio pequeño (288 m), así como su efecto en el comportamiento de la vía en una sección de desvío de líneas ferroviarias. Actualmente, a través de diversos instrumentos de medida se está registrando el comportamiento de la vía para analizar la influencia de las suelas.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

En Suiza se emplearon suelas bajo traviesas (módulo de rigidez de $0,13 \text{ N/mm}^3$) en la línea entre Mattstetten y Rothrist para reducir las vibraciones transmitidas al resto de la infraestructura, consiguiendo reducir en un 50% el extendido de mantas y obteniendo un adecuado comportamiento de la vía, lo que muestra la efectividad de las suelas. Además, en la estación principal de Zurich se dispusieron suelas bajo traviesa para reducir las vibraciones transmitidas por la estructura, probando igualmente la eficacia de estos elementos elásticos para mejorar la respuesta de la vía.

También en experiencias más recientes desarrolladas por la SBB (Swiss National Railways) en una pista de ensayo construida en el año 2005 en Suiza (recogido en UIC Project Under Sleeper Pads, 2009), se emplearon 5 tipos de suelas bajo traviesa (3 de ellas con módulo estático igual a $0,3 \text{ N/mm}^3$, una con módulo superior a dicha magnitud, y otra con módulo inferior). En este estudio, junto con otras experiencias desarrolladas por la DB (Alemania) y la ÖBB (Austria) de acuerdo a la Figura 64, se puede observar que todas las suelas bajo traviesas permitieron reducir el nivel sonoro emitido por la vía ante el paso de los vehículos.

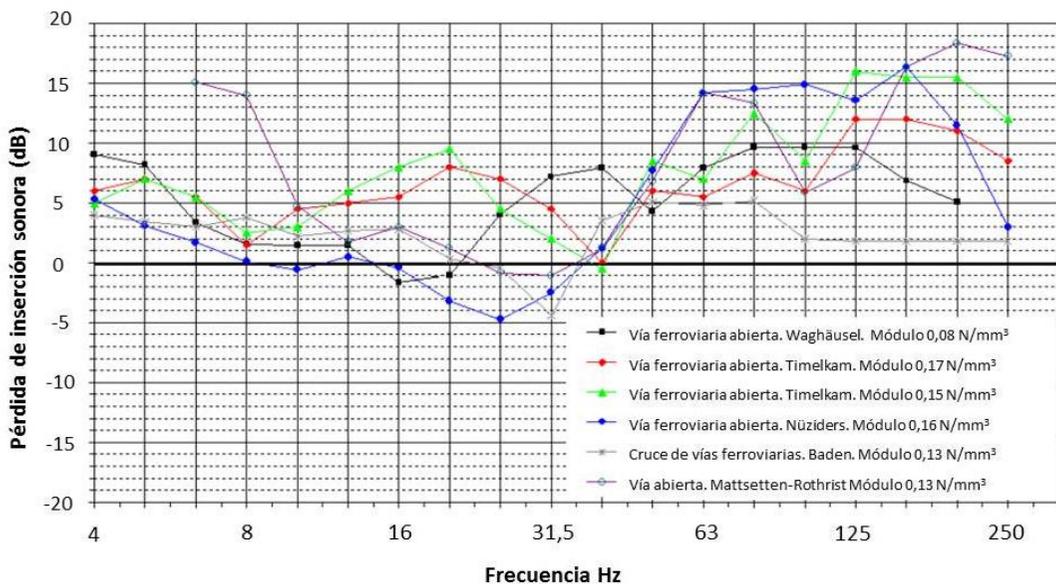


Figura 64: Efecto de la rigidez de las suelas en la reducción de ruido (Asmussen, 2012).

No obstante, para las frecuencias próximas al rango entre 16,0 y 31,5 Hz, se produce un fenómeno de resonancia que da lugar a valores negativos de la pérdida de inserción, lo que significa que se incrementa el nivel sonoro emitido para esas frecuencias.

En los estudios realizados por la SBB (Suiza) también se evaluó la influencia de estos materiales en la calidad de la vía, con el objetivo de aumentar el intervalo de tiempo entre las tareas de bateo del balasto. A partir de los resultados obtenidos se concluyó que la disposición de suelas (salvo para el caso donde se emplearon elementos de muy baja rigidez) llevó a un comportamiento vertical más estable de la vía, en relación a un tramo de control sin suela, lo que llevaba a la necesidad de menor número de tareas de mantenimiento al año. Respecto al comportamiento lateral, se recomendó profundizar en el estudio de este parámetro debido a la variabilidad de resultados que se pueden obtener por diversos factores que influyen en las medidas realizadas.

Además de las experiencias llevadas a cabo por administraciones ferroviarias de distintos países, el efecto de las suelas bajo traviesas también ha sido estudiado por diversos autores como el autor Peter Plica (2007), el cual mediante un estudio teórico en el que utilizó el método de la ORE, analizó el comportamiento de tres vías (denominadas Partenion, Timelkam, y Kirchstetten) con suelas, comprobando que el deterioro de la calidad de la vía y los costes de mantenimiento se pueden reducir hasta un 70% con estos materiales elásticos.

La Figura 65 muestra que la pista Timelkam se mantuvo en buenas condiciones para el tramo tradicional sin suelas elásticas (línea continua), siendo además el asiento de las capas granulares reducido al incorporar suelas bajo traviesas (línea discontinua). Sin embargo, para los otros dos casos estudiados, la vía experimentó un importante deterioro incluso con las suelas (aunque en la pista Kirchstetten se redujo el asiento de la vía), como consecuencia del incremento de las toneladas transportadas por la vía, estando este hecho relacionado con la construcción de la vía sobre un terreno con reducida capacidad portante.

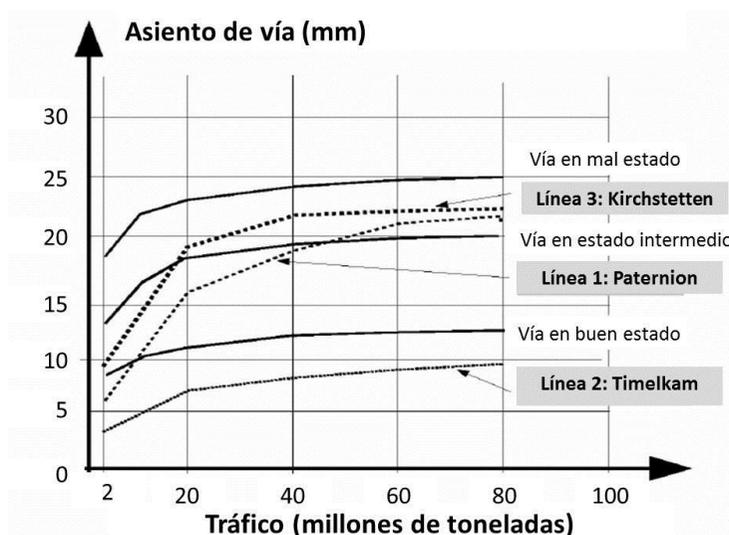


Figura 65: Influencia de las suelas en el asiento de tres tramos experimentales de vía (Plica, 2007).

Por otra parte, un trabajo realizado por Garburg y Stiebel (2007) evaluó la influencia de las suelas en la transmisión de ruido y vibraciones a partir de medidas en tramos de vía experimentales. Los resultados mostraron que el empleo de suelas para la reducción de ruido, es efectiva para frecuencias superiores a 40Hz, consiguiendo un descenso del nivel sonoro entre 8 y 15 dB. A partir de este estudio se pudo ver que existe el potencial de reducir hasta un 30% las vibraciones a baja frecuencia. Estos autores también comprobaron que se puede obtener un importante en la amortiguación de los movimientos de la vía en las frecuencias naturales de las suelas bajo traviesa.

En cuanto a la influencia de la rigidez de las suelas en el comportamiento mecánico de la vía, diversos autores han centrado sus estudios en analizar el efecto de este parámetro dado que ésta es la propiedad característica de estos elementos. Así, Krüger (2007), a partir de datos registrados en tramos de prueba y ensayos realizados en laboratorio, llevó a cabo la modelización de la vía para evaluar el efecto de la rigidez de las suelas bajo traviesa en el comportamiento dinámico del sistema sobre capa de balasto.

Los resultados presentaron buena correlación con las medidas obtenidas experimentalmente, lo que demostraba la aptitud del modelo. Para el estudio, definió el parámetro “power in ballast”, el cual se obtiene a partir de la

integración de la presión y la velocidad de vibración de la capa de balasto. En el desarrollo del estudio se utilizaron suelas con diferente módulo de rigidez, empleadas en vías sobre terreno con distinta capacidad portante e incorporando bajo el carril placas de asiento de diversa rigidez.

En todos los casos se pudo comprobar que el aumento de la flexibilidad de las suelas llevaba a menores valores del parámetro “power in ballast”, lo cual indica menores solicitaciones y deterioro a la capa de balasto. La Figura 66 muestra un ejemplo tomando como referencia terreno con capacidad media ($EV_2= 100 \text{ MN/m}^2$) y placas de asiento blandas ($k=60 \text{ kN/mm}$), en el que se puede ver que el efecto de la rigidez de las suelas es más acentuado en vías sobre terreno blando y con placas de asiento rígidas (600 kN/mm).

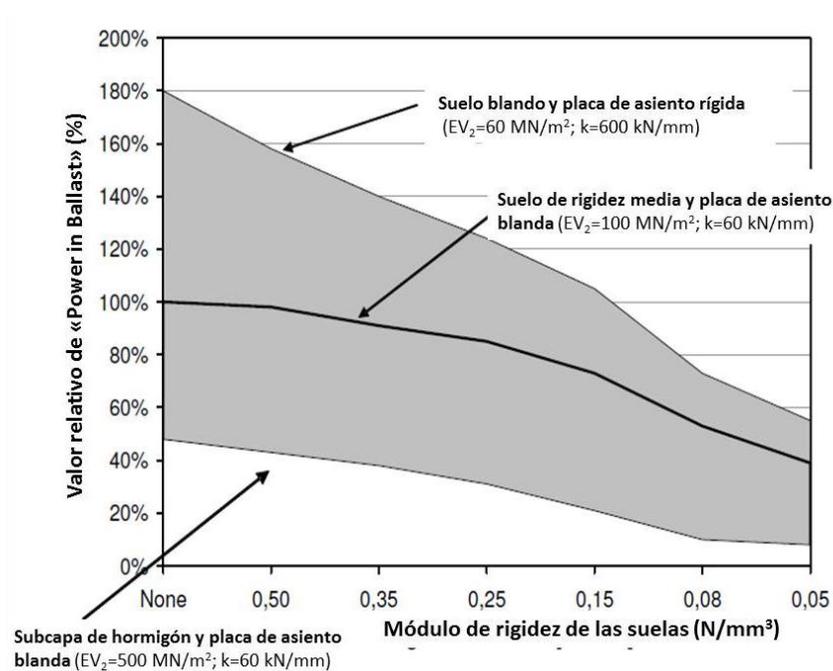


Figura 66: Efecto de la rigidez de las suelas en la energía transmitida a la capa de balasto (Krüger, 2007).

Por otra parte, Johansson et al. (2008) desarrollaron una serie de modelos numéricos para evaluar el efecto del módulo de rigidez de las suelas elásticas en la flexión del carril, los movimientos y vibraciones del carril y las traviesas, y la magnitud y distribución de las fuerzas dinámicas provocadas por el paso de los trenes. Para ello, emplearon tres suelas diferentes con módulo de rigidez igual a 35 kN/mm , 70 kN/mm , y 105 kN/mm , definidas en este estudio como blandas, medias y rígidas. Además, dado que la rigidez de las placas de asiento y

la capacidad portante del balasto también pueden tener una notable incidencia en el comportamiento de la vía, los autores tuvieron en cuenta las posibles variaciones de rigidez de estos materiales en el estudio de la influencia de las suelas. Así, en la Figura 67 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos para evaluar los cambios en los movimientos de carril.

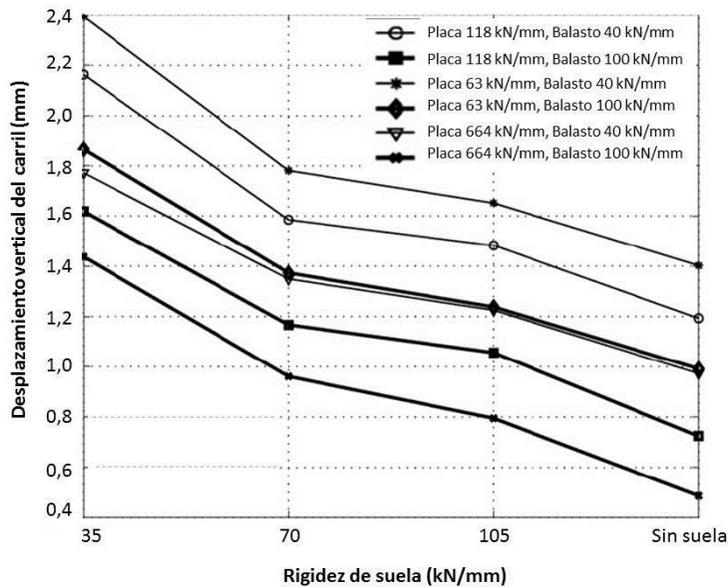


Figura 67: Influencia de la rigidez de las suelas en los movimientos de carril (Johansson et al., 2008).

A partir de este estudio (Johansson et al., 2008), los autores encontraron que al incrementar la rigidez de las suelas bajo traviesas, para todos los casos estudiados (distintas placas de asiento y capas de balasto), puede disminuir más del 50% la deflexión del carril y los movimientos de las traviesas y el carril (Figura 67). Sin embargo, esta práctica lleva a mayor tensión en el contacto entre las partículas de balasto y las traviesas. Por otra parte, no se apreció una tendencia clara de la influencia de la rigidez en los esfuerzos transmitidos por el contacto rueda-carril. En relación a las vibraciones, Johansson et al. (2008) pusieron de manifiesto que las suelas elásticas influyen principalmente en las oscilaciones con frecuencia inferiores a 250 Hz (Figura 68), obteniéndose mayores aceleraciones (hasta un 50%) de traviesa al reducir la rigidez del elemento.

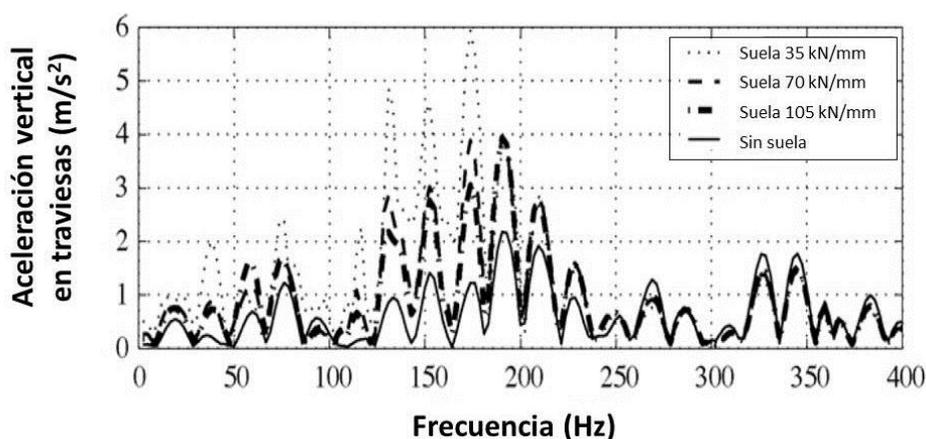


Figura 68: Medidas de la aceleración en traviesas con suelas elásticas de distinta rigidez (Johansson et al, 2008).

Este hecho también fue probado por Bongini et al. (2012), que a partir de ensayos de laboratorio comprobó que el uso de suelas incrementaba las vibraciones de carril y traviesas para frecuencias comprendidas entre 100 y 200 Hz. No obstante, los resultados mostraron que al disponer suelas bajo traviesas se consigue una pérdida de inserción sonora superior a 3 dB, obteniéndose los mejores resultados para frecuencias superiores a 50Hz. Además, para un mismo terreno, en general el uso de suelas con menor rigidez tiene mayor efecto positivo en la variación del factor de pérdida de inserción sonora.

Por otra parte, en relación a la posibilidad de utilizar suelas bajo traviesas para homogeneizar el comportamiento dinámico de la vía, Darlberg (2010) desarrolló un modelo para evaluar la optimización de los tramos de transición de rigidez mediante la disposición de suelas con distintas características mecánicas. Para ello, definió un tramo con 30 traviesas, estando las 10 primeras sobre una capa de balasto blanda ($E = 30$ MPa) y las otras 20 sobre una capa de mayor rigidez ($E = 100$ MPa).

Las 10 traviesas centrales incorporaron suelas bajo traviesas de 20 mm de espesor, teniendo la misma rigidez cada dos traviesas, por lo que se emplearon cinco valores diferentes de flexibilidad para las suelas. Se estudiaron dos casos: en uno se emplearon suelas con módulo de cizalla igual a 10, 100, 125, 150 y 175 MPa; y otro con 10, 150, 150, 150 y 150 MPa. En ambos casos se comprobó que la incorporación de suelas llevaba a una notable reducción (casi del mismo orden de magnitud en los dos casos estudiados) de las variaciones de la fuerza

del contacto rueda-carril (Figura 69), en relación al caso de vía sin suelas. Este hecho pone de manifiesto que incorporando suelas blandas en las dos primeras traviesas de la parte rígida de la vía, se reducen las variaciones del comportamiento de la vía, sin tener notable influencia el resto de valores utilizados en las otras suelas elásticas utilizadas.

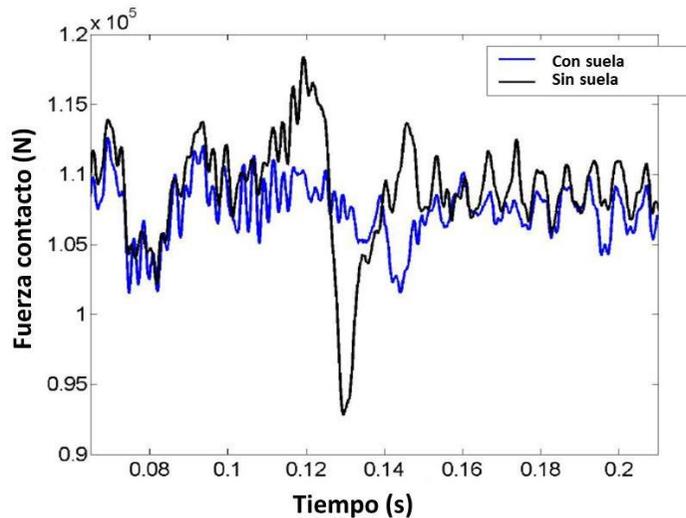


Figura 69: Efecto de las suelas en la tensión transmitida al balasto.

De igual modo, Loy (2009) comprobó, mediante la modelización por elementos finitos de desvíos de vía (puntos críticos de cambios de rigidez), que la graduación de la rigidez de las suelas permite homogeneizar las deflexiones del carril a lo largo del desvío, mientras que el uso de un único tipo de suela lleva a variaciones del comportamiento de la vía del orden a las medidas en el caso de vía sin suela.

El efecto de las suelas bajo traviesas, así como la influencia de su flexibilidad, en los cambios de rigidez del sistema también ha sido evaluado por Witt (2008), el cual llevó a cabo un estudio mediante la modelización por elementos finitos de la vía. En este trabajo, los elementos elásticos definidos para la investigación tenían una rigidez de 3000 kN/mm (rígidas), 400 kN/mm (medias) y 50 kN/mm (blandas). A partir de los resultados se mostró que el uso de suelas rígidas no tenía notable efecto en comparación con los valores registrados en el caso de vía sin suelas, dado que en ambos casos se obtuvieron variaciones de la fuerza dinámica de hasta 35 kN en la zona de cambio de rigidez de la vía. Sin embargo, al utilizar suelas blandas, la variación de esfuerzos en la transición fue

casi nula, mostrando así menores cambios bruscos en el comportamiento de la vía, estando en consonancia con lo indicado por Bolmsvik (2005).

A pesar de conseguir transiciones de rigidez más suaves al emplear suelas blandas, Witt (2008) también pudo comprobar (Figura 70) que el uso de estos elementos a lo largo de la vía incrementaba el número de oscilaciones de esfuerzo con mayores amplitudes (cercanas a 120 kN), en relación al caso de la vía con suelas rígidas o sin estos elementos. Esto significa que para cargas elevadas, el uso de suelas blandas lleva a mayor heterogeneidad en el comportamiento de la vía a lo largo de ésta. No obstante, las suelas blandas presentaron los menores valores de frecuencia de ocurrencia de oscilaciones de esfuerzos en torno a 100 kN (esfuerzos habituales en vías ferroviarias). Respecto a las suelas con rigidez media (400 kN), éstas presentan un comportamiento intermedio entre suelas rígidas y blandas, pudiendo plantearse como la mejor solución.

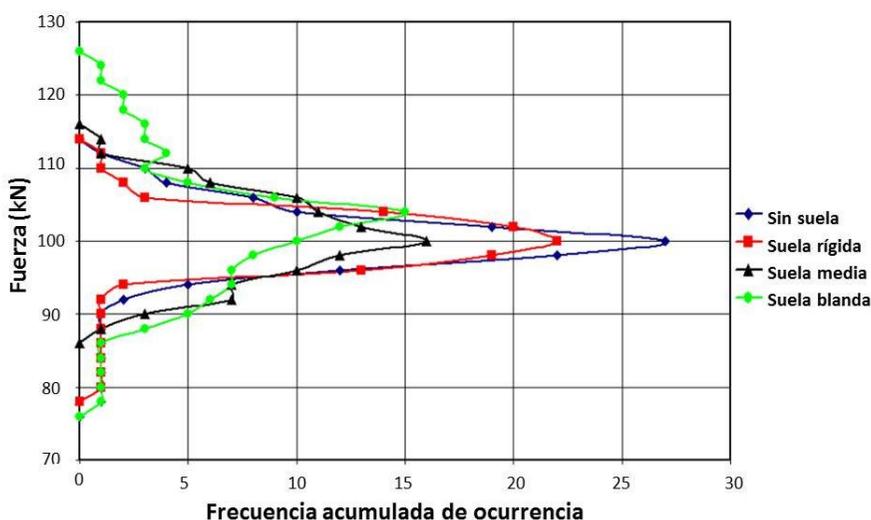


Figura 70: Efecto de la rigidez de las suelas en la frecuencia acumulada de distintos niveles de esfuerzo sobre balasto (Witt, 2008).

Witt (2008), a partir del modelo de vía desarrollado, también analizó la influencia de las suelas en los esfuerzos transmitidos al balasto. En la Figura 71 se muestran los resultados obtenidos a cerca de los esfuerzos transmitidos por las traviesas a la capa de balasto, considerando dos tipos de secciones de vía: una rígida (con módulo de Young 146,3 MPa) y otra blanda (módulo de Young igual a 53,8 MPa). A partir de estos resultados, se pudo comprobar que la reducción de la rigidez de las suelas permitía disminuir las tensiones

transmitidas al balasto, siendo este hecho acentuado en infraestructuras de mayor rigidez vertical.

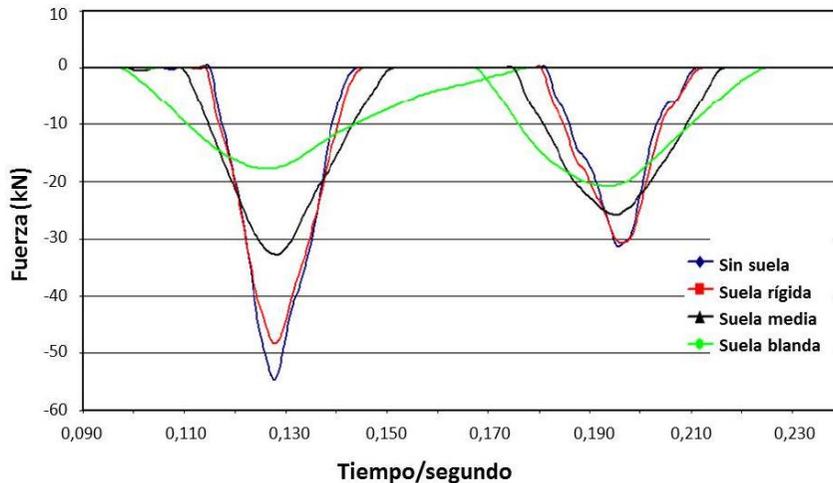


Figura 71: Efecto de la rigidez de las suelas en la presión máxima transmitida al balasto (Witt, 2008).

Este descenso de presión sobre la capa de balasto, de acuerdo con Riessberger (2006), está asociado al incremento del área de contacto entre las traviesas y el balasto. Este autor indica que el área de contacto entre las traviesas de hormigón y la capa de balasto suele oscilar entre el 3 y 4% de la superficie total de la traviesa, lo cual provoca la concentración de tensiones sobre un reducido número de partículas. Sin embargo, al incorporar suelas elásticas en la cara inferior de las traviesas, la superficie de contacto aumenta hasta valores próximos a 30%, dependiendo de la flexibilidad del material elástico.

Como síntesis de los estudios y experiencias desarrollados para suelas bajo traviesas, la Tabla 11 muestra el campo de aplicación más apropiado para cada tipo de suela, atendiendo a la rigidez vertical de la misma (o su módulo de rigidez). En la Tabla 11 se recogen los casos de suelas blandas y rígidas, dado que las de rigidez media son un caso intermedio. Para esta clasificación se usan los valores de propuestos por las recomendaciones de la UIC a cerca de la rigidez de las suelas). Además, al igual que ocurría para las placas de asiento, la utilización de suelas de mayor o menor rigidez se verá notablemente influenciado por las características de la vía en particular donde van a ser utilizadas.

Tabla 11: Resumen del efecto de la rigidez de las suelas en distintos parámetros de comportamiento de la vía (Elaboración propia).

Campo de aplicación	Suelas rígidas ($>0,25 \text{ N/mm}^3$)	Suelas blandas ($<0,25-0,15 \text{ N/mm}^3$)
Reducción movimientos y aceleraciones del carril	✓	
Descenso deflexiones del carril	✓	
Disminución de la corrugación (<i>tramos en curva</i>)	✓	
Disminución de la corrugación (<i>tramos rectos</i>)	✓	
Reducción movimientos y aceleraciones de la traviesa	✓	
Reducción presión sobre balasto. Descenso asentamiento de la vía		✓
Disminución vibraciones en balasto y capas de asiento		✓
Reducción espesor capa balasto	✓	
Mayor homogeneidad de la rigidez vertical del sistema	✓	✓

2.4.3 Mantas elásticas

Otra medida adoptada para la amortiguación de vibraciones y absorción de energía procedente del paso de trenes es la introducción de mantas elásticas entre la capa de balasto y la subestructura, siendo conocidas internacionalmente como “Under Ballast Mats” (UBM). Esta medida, debido a las propiedades elásticas que este material aporta al sistema, es una solución habitualmente empleada para mitigar la transmisión de ondas al terreno, y por tanto, a los edificios cercanos al trazado de la vía. Además, gracias a su capacidad elástica, las mantas son utilizadas en tramos de vía como túneles, puentes, estaciones elevadas, cruces de vías, etc., los cuales requieren reducir la rigidez de la pista, siendo esto posible gracias a la capacidad para deformarse de los materiales que componen las mantas elásticas.

Así, de acuerdo con experiencias recogidas por la compañía Getzner (Getzner Werkstoffe, 2006), las mantas elásticas, debido a sus características y su ubicación dentro de la estructura ferroviaria, tienen como principales funciones distribuir las cargas en mayor superficie de las capas de asiento de la vía (y por tanto, al terreno sobre el que asienta la infraestructura), reducir las vibraciones transmitidas a las capas subyacentes (protegiendo a las viviendas cercanas de

las vibraciones causadas por el paso de vehículos), mejorar la elasticidad y estabilidad de la vía, y homogeneizar el comportamiento del sistema (en especial en zonas de transición de rigidez), y reducir la compresión de la capa de balasto y su deterioro, dando lugar todo esto a menores costes económicos y sociales asociados a tareas de mantenimiento, consiguiendo así mayor durabilidad de la infraestructura.



Figura 72: Puesta en obra de mantas elásticas (Getzner Werkstoffe, 2006).

Como ejemplos del uso de mantas elásticas bajo medio granular en España, cabe destacar el caso de algunos tramos de la línea de alta velocidad Madrid-Zaragoza-Barcelona-frontera francesa, en la estación Segovia-Guiromar, y en las localidades de Vilafranca del Penedés y Martorel (Álvarez, 2011).

2.4.3.1 Principales características de diseño de las mantas elásticas

El diseño y composición de las mantas elásticas puede ser variado atendiendo a las necesidades de la vía, y las propiedades de los materiales empleados en la fabricación de estos elementos. No obstante, en general, se deben de cumplir una serie de características mecánicas exigidas a estos materiales para garantizar el adecuado comportamiento de la vía, así como su durabilidad. Entre los distintos requerimientos para las mantas, destaca la necesidad de absorber el impacto de cargas y las vibraciones producidas en el sistema del ferrocarril, además de mantener su rendimiento incluso después de un gran número de repeticiones de carga y diversas condiciones climáticas.

En resumen, las principales características exigidas a estos materiales son las siguientes (de acuerdo con las recomendaciones de la UIC, 2011):

- Reducida rigidez vertical (generalmente inferior a 22,5 kN/mm), incluso a bajas temperaturas.
- Elevado aislamiento eléctrico.
- Auto-drenaje.
- Alta capacidad para amortiguar cargas y vibraciones procedentes de las traviesas y la capa de balasto.
- Elevada capacidad para deformarse, permitiendo así reducir la compresión del balasto, y por tanto su deterioro y necesidad de mantenimiento.

Para cumplir estas funciones, las mantas elásticas suelen estar formadas por elastómeros resistentes al envejecimiento y con altas prestaciones mecánicas, por lo que el principal hándicap de utilización de estos materiales está asociado a su coste de producción, al igual que para los otros elementos elásticos estudiados. Así, es importante el desarrollo de nuevos tipos de mantas que permitan reducir sobrecostes de construcción, y poder de esta forma generalizar su uso para reducir el impacto de los problemas (deterioro, ruido, vibraciones, etc.) de explotación de las vías.

En este sentido, distintas compañías (CDM, Isolgoma, Sistema MLG, etc.) y proyectos de investigación (como el proyecto con el acrónimo RECYTRACK) están centrados en desarrollar mantas elásticas a partir de neumáticos triturados, exponiendo que este material cuenta con propiedades adecuadas para cumplir las exigencias establecidas para el uso de mantas. No obstante, la necesidad de trituración de los neumáticos, además de los costes asociados, este proceso puede dar lugar a pérdida de las propiedades elásticas del material.

Por otra parte, atendiendo a las propiedades de los materiales forman las mantas, éstos se pueden dividir en tapices compuestos por láminas elásticas, mantas formadas a partir de material granulado, mantas compuestas por espuma, o por combinación de materiales elásticos, con matriz elastomérica. Estas mantas, pueden estar constituidas por una única capa elástica o por un sistema de dos capas solidarias, con distintas funciones (recogido en recomendaciones de la UIC, 2011):

- Capa de distribución de carga: se sitúa en la parte superior de la manta y está formada por un geotextil de alta resistencia al estiramiento y a la rotura.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Permite la distribución de cargas procedentes del balasto, obteniéndose en las capas inferiores un reparto más uniforme de las solicitaciones.

- Capa elástica: compuesta por materiales de poliuretano microcelular, que permiten la deformación y amortiguación de cargas.

La Figura 73 muestra el aspecto visual de una manta elástica empleada bajo balasto, estando este elemento compuesto por los dos tipos de capas descritos.



Figura 73: Manta elástica bajo capa de balasto. CDM (www.cdm.com)

Respecto a las características físicas de las mantas, el espesor de éstas suele estar comprendido entre 10 y 35 mm, mientras que el ancho y longitud de las láminas dependen de las características de la vía y las técnicas a utilizar en la disposición de estos materiales (recogido en recomendaciones de la UIC, 2011), dado que son comúnmente empleados para cubrir grandes superficies de terreno (Figura 74).



Figura 74: Aspecto visual de mantas elásticas instaladas sobre un puente, antes del extendido de balasto (Getzner Werkstoffe, 2006).

Las diversas mantas elásticas pueden ser clasificadas de forma global atendiendo al valor de su módulo de rigidez dinámico (C_{din}), siendo éste su parámetro característico. Para el caso de las placas de asiento y suelas bajo traviesa se empleaban propiedades estáticas (rigidez y módulo de rigidez, respectivamente), dado que estos elementos (ubicados cerca de la superficie de la vía) son más apropiados para variar la elasticidad de la vía, mientras que en el caso de las mantas, éstas son más eficientes reduciendo vibraciones y el rápido deterioro del balasto en contacto con las traviesas y con subestructuras rígidas, como túneles o puentes.

De acuerdo con una serie de recomendaciones realizadas por la UIC (UIC, 2011) para vías con 50 cm de capa granular (balasto y subbalasto), cargas por eje de 225 kN y velocidades superiores a 200 km/h, las mantas pueden ser clasificadas como rígidas ($C_{din} > 0,22 \text{ N/mm}^3$), de rigidez media ($0,09\text{-}0,22 \text{ N/mm}^3$), blandas ($0,05\text{-}0,09 \text{ N/mm}^3$) y muy blandas ($0,03\text{-}0,05 \text{ N/mm}^3$).

En relación a estos valores que definen la rigidez (por unidad de superficie) de las mantas, éstas son utilizadas con diferentes objetivos que requieren elementos elásticos con distinta respuesta y capacidad para deformarse verticalmente ante el paso de los trenes. Además, los diversos tipos de mantas deben de ser seleccionados en función del tipo de vía (alta velocidad, convencional, tráfico pesado, metro ligero, etc.), con el fin de conseguir un valor óptimo de rigidez vertical estática y dinámica.

2.4.3.2 Estudios y experiencias sobre mantas bajo balasto

Las mantas elásticas bajo balasto tienen su origen en la primera línea de alta velocidad ferroviaria, entre Tokio y Osaka en el año 1964. En esta línea se constató que en puentes de hormigón, la capa de balasto se trituraba rápidamente en las zonas cercanas al tablero como consecuencia de los elevados esfuerzos de compresión a los que el material se veía sometido. De esta forma, fue necesario disponer soluciones hasta entonces desconocidas, consistentes en el extendido de mantas elásticas capaces de aumentar la flexibilidad vertical del conjunto de la vía, reduciendo la tensión sobre el balasto y la propagación de ondas fuera de la vía (Ruano, 2007).

Desde entonces, las mantas elásticas han sido empleadas en diversas líneas con el fin de reducir el deterioro de la capa de balasto a partir del descenso de rigidez del sistema, y en particular de la capa subyacente al medio granular.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Así, en las últimas décadas, en Europa ha empezado a extenderse el uso de mantas elásticas bajo balasto debido a los beneficios que estos materiales aportan, aunque aún su uso sigue sin ser muy extendido, por lo que el número de estudios y experiencias es menor en comparación a los otros dos elementos (placas y suelas) recogidos. No obstante, para facilitar su uso, la instrucción I-AM 05/02 de la SBB (Swiss National Railways) propone y aporta recomendaciones para su empleo en las secciones de vía con espesor de balasto inferior a 30 cm dado que estos materiales permiten incrementar la elasticidad del sistema, reduciendo el deterioro del balasto y de las capas subyacentes. Por otro lado, la DB (German Federal Railways) también recoge el uso de mantas en secciones con reducido espesor de la capa de balasto (inferior a 30 cm) y tráfico superior a 10.000 toneladas por día.

En Reino Unido, diversas experiencias incorporando mantas elásticas a la infraestructura han sido desarrolladas. Entre ellas destaca la instalación de mantas en una sección en túnel de la línea Gospel Oak (Londres) en la que el espesor de balasto fue reducido a 13 cm, por lo que el uso de mantas elásticas permitió incrementar la elasticidad del conjunto con el fin de evitar cambios de rigidez en relación a las secciones adyacentes, a la vez que se redujo la degradación de las partículas de balasto (Potocan, 2010).

Por otra parte, en Alemania cabe destacar la instalación de mantas en 1987 en un puente (Bartelesgraben) de la línea de alta velocidad que une Hannover con Würzburg, teniendo una longitud de 1160 metros. Las mantas elásticas dispuestas bajo el balasto fueron definidas como Sylomer D 220, módulo de rigidez de 0,083 N/mm³, por la empresa Getzner, siendo éstas utilizadas para reducir el ruido emitido al paso de los trenes cerca de zonas pobladas. Después de 21 años, durante tareas de renovación del balasto, se desarrolló un estudio de cambio del comportamiento mecánico de las mantas, las cuales habían sido sometidas a 384 millones de toneladas.

En este estudio se pudo ver que la capa subyacente a la capa de balasto se encontraba en adecuadas condiciones, encontrando además que el uso de las mantas llevó a menor número de tareas de bateo durante la vida de servicio y menor deterioro de la infraestructura en general. Por otra parte, ensayos de laboratorio demostraron que el cambio de rigidez estática y dinámica de las mantas en relación a los valores iniciales, fue inferior a 11,2% después de 21 años de servicio, lo que mostraba una adecuada durabilidad del material (Dold y Potocan, 2013).



Figura 75: Mantas elásticas dispuestas en un tramo sobre puente (Dold y Potocan, 2013).

A partir de las experiencias europeas, la UIC recoge en un informe una serie de recomendaciones a cerca del uso de mantas elásticas (UIC, 2011), indicando que el empleo de estos materiales permite reducir el deterioro del balasto en vías de elevada rigidez vertical dado que se consigue incrementar la elasticidad de la vía, y por tanto, las cargas de los vehículos se reparte en un mayor número de traviesas, descendiendo así la presión transmitida al balasto. Además, se expone que las mantas evitan el contacto directo del balasto con la subestructura rígida, reduciéndose la rotura de partículas granulares, a la vez que existe una mayor distribución de tensiones para las capas inferiores.

De igual modo, la UIC (2011) también expone que en líneas en las que haya problemas de espacio para disponer una capa de balasto con el espesor requerido (por ejemplo en túneles donde la altura es insuficiente para extender la catenaria, o por problemas de gálibo), puede ser apropiado el uso de mantas elásticas que permitan reducir el espesor del balasto sin que la calidad de la vía se vea deteriorada. No obstante, se recomienda un espesor mínimo de 20-25 cm (dependiendo de las características de las vías) de la capa de balasto para evitar elevadas tensiones sobre el material elástico. Así, las mantas permiten un descenso del espesor de la capa de balasto próximo a 10 cm.

Respecto a la propagación de vibraciones, un estudio (Getzner Werkstoffe, 2006) realizado a partir de medidas registradas en un tramo de túnel analizó la influencia de las mantas elásticas en la transmisión de ondas al terreno. Para ello, se realizaron diversas medidas de vibraciones antes y después de incorporar estos elementos elásticos, así como tras 18 años de servicio. Estas medidas fueron tomadas en un tramo denominado Mp1 (Figura 76a), en el que se incorporaron las mantas, y en otro tramo conocido como Mp7 (Figura 76b), el cual se mantuvo sin material elástico para ser usado como referencia.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

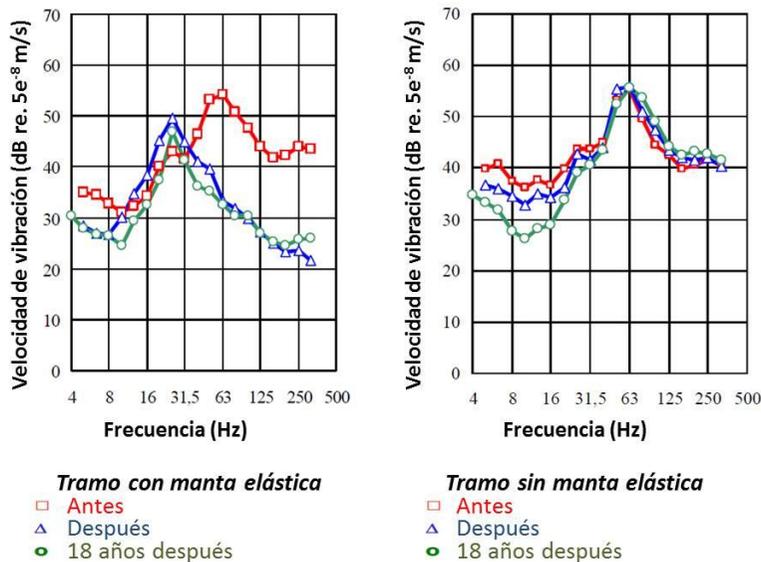


Figura 76: Efecto de las mantas en la transmisión de vibraciones (Getzner, 2006).

A partir de los resultados se pudo comprobar que en ambos tramos la velocidad de las ondas transmitidas al terreno descendió con el paso del tiempo para las frecuencias inferiores a 31,5 Hz. Además, para el caso del tramo de túnel con mantas elásticas este descenso fue generalizado, ya que desde la incorporación de estos elementos disminuyeron las vibraciones hasta en 15 dB (casi un 30%) para frecuencias superiores a 31,5 Hz. Así, en este estudio se llegó a la conclusión de que las mantas elásticas reducen el nivel de ruido y las vibraciones transmitidas al terreno, y puede ayudar a disminuir la degradación de la capa de balasto, cuya rigidez depende de la manta instalada y del diseño de la superestructura (Getzner Werkstoffe, 2006).

De igual modo, la UIC en sus recomendaciones para el uso de estas mantas como solución anti-vibraciones, recoge una serie de estudios basados en experiencias realizadas en líneas europeas. En primer lugar, expone que las mantas no son efectivas para reducir el ruido emitido por el contacto rueda-carril, sino que son más apropiadas para mitigar las ondas transmitidas al terreno. En segundo lugar, según datos (Tabla 12) recogidos por la administración de ferrocarriles en Suiza (SBB) a cerca del descenso de vibraciones transmitidas a la estructura, las mantas son más efectiva al reducir su módulo de rigidez dinámico, y cuando son utilizadas sobre roca o en túneles, en vez de sobre terraplenes. Los valores negativos recogidos en la Tabla 12 indican amplificación de la intensidad de las ondas transmitidas al terreno.

Tabla 12: Efecto de la rigidez de las mantas en la transmisión de ondas al terreno (UIC Code 719-1, 2011).

UBM <i>C_{dyn}/Frecuency</i>	Stiff structures			Embankment		
	<i>31.5 Hz</i>	<i>63 Hz</i>	<i>125 Hz</i>	<i>31.5 Hz</i>	<i>63 Hz</i>	<i>125 Hz</i>
<i>≈0.03 N/mm³</i>	7	19	19	6	12	12
<i>≈0.06 N/mm³</i>	4	16	16	-1	10	14
<i>≈0.12 N/mm³</i>	-1	14	16	-6	3	9

Por otra parte, según la DB (Deutsche Bahn), a partir de experiencias realizadas en Alemania, las mantas elásticas son adecuadas para proteger la capa de balasto (especialmente en vías con velocidad de circulación superior a 160 km/h, y en tramos sobre puentes o en túneles), para reducir las vibraciones transmitidas al terreno (con mantas cuyo módulo de rigidez se encuentra entre 0,02 y 0,06 N/mm³), y en puntos singulares de la vía como zonas de cambio de rigidez (mantas blandas-medias, con módulo de rigidez entre 0,10 y 0,15 N/mm³) (Kleinert et al., 2006).

A partir de las experiencias desarrolladas acerca de la aplicación de mantas elásticas en infraestructuras ferroviarias, la Tabla 13 resume las principales ventajas de emplear estos elementos elásticos, indicando el rango de rigidez (mantas blandas o rígidas) más apropiado en función del campo de aplicación considerado.

Tabla 13: Resumen del efecto de la rigidez de las mantas en distintos parámetros de comportamiento de la vía (Elaboración propia).

Campo de aplicación	Mantas rígidas	Mantas rigidez media-blanda
Reducción de la presión de balasto	✓	✓
Aumento de la flexibilidad de la vía		✓
Disminución del espesor de la capa de balasto	✓	✓
Descenso de la rotura de partículas de balasto, en tramos rígidos	✓	✓
Reducción de las vibraciones transmitidas al terreno		✓
Mayor homogeneidad de la rigidez vertical del sistema		✓

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Por otra parte, respecto a estudios teóricos, Mueller-Boruttau y Breitsamter (2005) trataron de poner de manifiesto el efecto de las mantas elásticas en la pérdida de inserción (reducción del nivel sonoro) de la vía ante el paso de los vehículos. Para ello, evaluaron esta propiedad mediante ensayos de laboratorio y mediante modelización del sistema.

Los autores pusieron de manifiesto que las medidas de laboratorio deben de ser corregidas con datos obtenidos en modelos numéricos dado que es importante considerar las acciones de las masas no suspendidas y la capacidad portante del terreno, lo cual puede ser considerado mediante modelización. Además, por otra parte, se debe de considerar que los ensayos de laboratorio pueden ser empleados para calibrar el modelo matemático, el cual puede requerir igualmente datos obtenidos de vías a escala real.

Ante todo esto, en la Figura 77 se puede observar las variaciones de resultados que se pueden en el estudio de las mantas al considerar diferentes parámetros, por lo que es necesario seguir profundizando en el estudio de mantas elásticas. Los autores en la Figura 77 mostraron las variaciones de la pérdida de inserción tomando como referencia resultados de laboratorio, al introducir la consideración de las propiedades del suelo y de las masas no suspendidas, viendo que estas últimas son las que mayor influencia tienen.

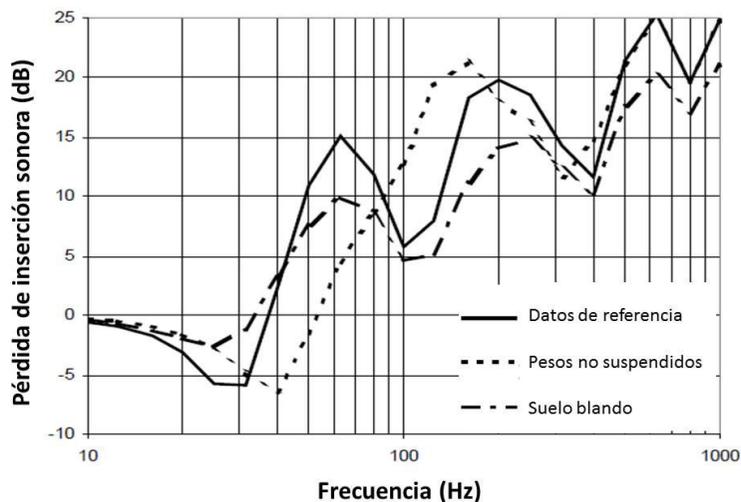


Figura 77: Efecto de las mantas en la transmisión de ondas. Validación de datos obtenidos mediante modelización (Mueller-Boruttau y Breitsamter, 2005).

Otros autores como Hanson y Singleton (2006) también han tratado de evaluar la pérdida de inserción que tiene lugar en la vía con la introducción de mantas elásticas bajo la capa de balasto. Para ello, los autores desarrollaron un modelo numérico en el que se recogía una sección de pista en la que se incorporaba la manta elástica entre la capa de balasto y un medio rígido, representado por una viga.

Los resultados de este modelo fueron comparados con los obtenidos mediante medidas in situ en una línea de metro ligero en Baltimore y una línea de ferrocarril en Boston (Estados Unidos), siendo este último caso recogido en la Figura 78. En ambos casos se pudo ver que con el modelo se sobre estima la pérdida de inserción para frecuencias cercanas a 200 Hz y superiores. Sin embargo, este hecho pierde importancia dado que como se puede ver, las mantas elásticas tienen mayor efecto en frecuencias inferiores, especialmente cercanas a 80 Hz. Además, dichas frecuencias superiores a 200 Hz raramente se propagan por el suelo, llegando a causar molestias.

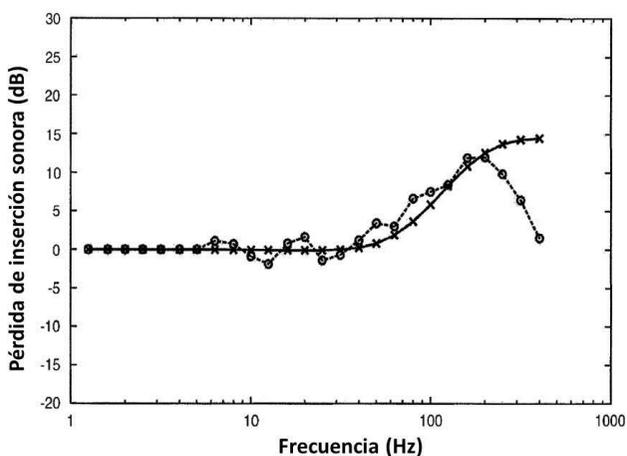


Figura 78: Validación de los resultados obtenidos mediante modelización de la reducción sonora al emplear mantas elásticas (Hanson y Singleton, 2006).

Por otra parte, otros estudios están centrados en el desarrollo nuevos materiales para la fabricación de mantas elásticas, para su uso bajo balasto o subbalasto (Kraiburg relastec, 2010; Lapčík et al., 2001). En este marco, cabe destacar el estudio realizado sobre mantas compuestas por gránulos de caucho procedentes del reciclaje de neumáticos fuera de uso (Lapčík et al., 2001). En este trabajo desarrollado en laboratorio, se evaluó el comportamiento dinámico de muestras de 500x500 mm y 35 mm de espesor, bajo cargas cíclicas a diferentes frecuencias y con diferentes valores de precarga. La Figura 79

muestra los resultados obtenidos para valores de precarga de 0,03 MPa y 0,06 MPa, comprobando que en general el incremento de la frecuencia de las cargas y la magnitud de la precarga dio lugar al aumento del módulo dinámico del material.

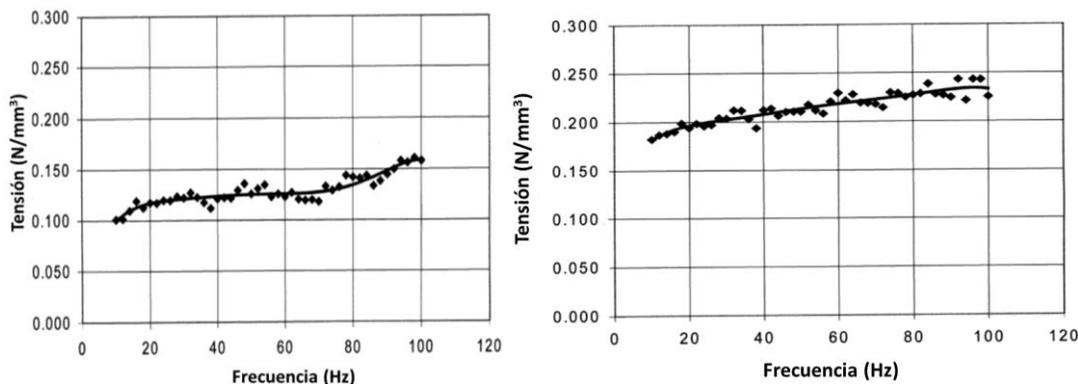


Figura 79: Efecto de las mantas de rigidez en la respuesta del balasto. Consideración de precarga 0,03 MPa (izquierda) y 0,06 MPa (derecha) (Lapčík et al., 2001).

De igual modo, el proyecto de investigación conocido como “Recytrack”, está centrado en la reutilización de polvo de neumáticos usados en la fabricación de mantas elásticas, siendo este material mezclado una resina de poliuretano. Para ello, se han llevado a cabo ensayos de laboratorio para evaluar la respuesta mecánica ante cargas que simulan el paso de los trenes, comprobando que este tipo de mantas presentan un comportamiento adecuado para su uso en vías ferroviarias (Carrascal et al. 2013).

Además, en relación a los ensayos de laboratorio, se pudo ver que el uso de placas de balasto (Figura 80, izquierda) para evaluar la respuesta del material lleva a mayor aleatoriedad de resultados que para el caso de emplear placas de carga planas (Figura 80, derecha), aunque en este último caso se registra mayor rigidez del material. También se pudo comprobar que durante los ensayos de fatiga del material, a partir de 5×10^6 ciclos de carga, la rigidez de las mantas se estabiliza, pudiendo así reducir el tiempo de ensayo utilizado habitualmente ($12,5 \times 10^6$ ciclos de carga).



Figura 80: Aspecto visual de distintos métodos de ensayos en laboratorio para mantas. Empleando capa de balasto (izquierda) y utilizando placas planas de carga (derecha) (Carrascal et al., 2013).

2.5 Neumáticos fuera de uso para elaborar elementos elásticos

En el estudio de los elementos elásticos aplicados en infraestructuras ferroviarias se ha podido identificar que su elevado precio asociado al uso de elastómero de altas prestaciones es uno de los principales inconvenientes asociados al uso de estos componentes, limitando así su uso generalizado. Ante esta situación, existe la tendencia actual a desarrollar nuevos materiales alternativos, siendo una práctica común el uso de residuos. En este contexto, se plantea la posibilidad de usar neumáticos fuera de uso como materia prima en la elaboración de elementos elásticos.

Además, esta medida está en consonancia con las diversas políticas establecidas en los últimos años en diferentes ámbitos sociales que tienen por objeto garantizar un desarrollo sostenible y comprometido con la utilización racional de recursos naturales. Por este motivo, en este apartado de la presente tesis doctoral se recoge una breve descripción de la problemática de los neumáticos fuera de uso, así como las propiedades de éstos y su aplicación en el ámbito ferroviario. Además, en último lugar se presenta la descripción de una innovadora tecnología para reciclar y reutilizar el material constituyente de los neumáticos.

2.5.1 Valorización de neumáticos usados

La continua y masiva fabricación de neumáticos, y las dificultades para hacerlos desaparecer una vez usados, constituye uno de los problemas medioambientales más graves de las últimas décadas. Cada año se generan en el mundo cerca de 1.000 millones de neumáticos usados, lo que supone una cifra próxima a 17 millones de toneladas de residuo. En el caso particular de la

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Unión Europea, el Servicio de Información para el Desarrollo e Investigación de la Comisión Europea (CORDIS, 2013) fija esta cifra en torno a 3,5 millones de toneladas, lo que supone una importante cantidad de material secundario, que debe de ser adecuadamente gestionado y eliminado.

Además de ser un residuo abundante, hay que sumarle la problemática de que se trata de materiales resistentes a la degradación y la eliminación de los mismos de forma limpia. La quema directa de este tipo de residuos provoca, por ejemplo, la emisión a la atmósfera de gases y partículas nocivas. La combustión en hornos de alta calidad que garanticen un mínimo de emisiones resulta muy cara, por lo que año tras año, toneladas de neumáticos han acabado sus días abandonados en vertederos.

Respecto a la acumulación de los neumáticos fuera de uso (a partir de ahora se hará mención a ellos como NFU), esta medida provoca un importante impacto visual y ocupación el terreno. Además, la acumulación de neumáticos en vertederos podría dar lugar a problemas sociales y ambientales como incendios incontrolados, un hábitat ideal para mosquitos transmisores de enfermedades, e incluso la acumulación de agua y lixiviados debido a la oquedad que forma la cara interna de estos residuos. Dentro de estos problemas, son conocidas las catástrofes ecológicas desencadenadas como consecuencia del incendio de NFU en Hagersville (Canadá) y en Seattle (Washington) (Gallego y de los Santos, 2003).



Figura 81: Almacenamiento de neumáticos en el vertedero de Seseña y Arico (Díaz Pardo, 2007).

Ante esta problemática, diversas normativas y directrices establecidas en países de todo el mundo han abordado este problema de acumulación de neumáticos fuera de uso. En este ámbito, cabe destacar la Directiva Europea 1999/31/CE establecida en 1999, la cual hacía referencia a la regulación del vertido de residuos. Su objetivo era establecer medidas para impedir o reducir los efectos negativos del vertido de residuos.

Esta Directiva se adaptó al derecho interno español a través del Real Decreto 1482/2001, el cual establecía el régimen jurídico aplicable a las actividades de eliminación de residuos mediante su depósito en vertederos. Asimismo, establecía la prohibición de acumulación en de los neumáticos usados enteros a partir del 16 de julio de 2003, y neumáticos usados troceados a partir del 16 de julio de 2006.

En el año 2000, en la Unión Europea se adoptó otra medida, la Directiva 2000/53/CE, la cual establecía medidas para reducir la generación de residuos procedentes de vehículos, proponiendo además los procesos de reciclado y reutilización como las formas más apropiadas para la valorización de los neumáticos usados. De igual modo, en España, mediante el Plan nacional de Neumáticos Fuera de Uso 2001-2006, se pretendía aplicar el conocido principio de las tres erres: reducir, reutilizar y reciclar.

Posteriormente, dentro del Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2007-2015, se redactó el II Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso (2007-2015 II PNFU) como revisión del Plan Nacional anterior. En este segundo Plan se incorporan como objetivos cualitativos el asegurar la correcta gestión de los NFU, la aplicación del principio de responsabilidad del productor a los responsables de la puesta en mercado de los neumáticos, y determinar objetivos cuantitativos de valorización y reciclaje de NFU.

De esta forma, en base a este marco normativo, se puede comprobar que aparte de las medidas para reducir la generación de los residuos de los neumáticos usados, el proceso de reciclado del material se propone como la principal medida para eliminar de forma limpia y sostenible estos residuos, los cuales siguen siendo abundantes en todo el mundo. Así, desde la industria del ferrocarril se está tratando de impulsar la reutilización de neumáticos como material elástico dentro de la infraestructura ferroviaria.

2.5.2 Propiedades de los neumáticos usados

Los neumáticos usados están formados a partir de estructuras toroidales complejas, estando constituidas por más de 200 componentes, de los cuales destacan el acero, las fibras y el caucho natural (Amirkhanian y Arnold, 1993). Una descripción más exhaustiva de la composición de los neumáticos indica que las principales materias primas que se utilizan para fabricar un neumático son: caucho (natural y sintético), negro de carbono, sílice, metal, textil, óxido de zinc y azufre, además de otros aditivos (Cedex, 2007). La Tabla 14 muestra una distribución aproximada del contenido de los principales materiales empleados en la fabricación de neumáticos tanto de turismo como de camión.

Tabla 14: Principales componen de los neumáticos (CEDEX, 2007).

Material	Neumático Turismo	Neumático Camión
Caucho	48 %	45 %
Negro de carbón y sílice	22 %	22 %
Metal	15 %	25 %
Textil	5 %	-
Óxido de cinc	1 %	2 %
Azufre	1 %	1 %
Aditivos	8 %	5 %

Respecto al método de fabricación, los neumáticos son elaborados a partir de un proceso de vulcanización del caucho natural en el que los polímeros lineales paralelos cercanos constituyen puentes de entrecruzamiento entre sí. El resultado final es que las moléculas elásticas de caucho quedan unidas entre sí a una mayor o menor extensión. Además, en la mezcla polimérica se le agregan otros componentes y diversos aditivos, obteniendo un material más estable, duradero y resistente al ataque químico, todo ello sin perder la elasticidad natural. En el proceso de fabricación también se transforma la superficie pegajosa del material en una superficie suave que no se adhiere al metal o a los sustratos plásticos.

El resultado del proceso de fabricación de los neumáticos, es un material con características elastoméricas y con gran capacidad para absorber deformaciones. En términos generales, estos materiales se corresponden con elastómeros, los cuales son polímeros amorfos que se encuentran sobre su temperatura de transición vítrea o Tg. Esta temperatura marca un notable cambio en las propiedades de los polímeros ya que por debajo de dicha

temperatura el comportamiento del material se asemeja al de un vidrio (elevada rigidez, fragilidad y transparencia) (Beltrán y Marcilla, 2012), mientras que a temperaturas por encima de la T_g el material se vuelve elástico, comportamiento propio del caucho y elastómeros como los neumáticos.

2.5.3 Empleo de neumáticos usados en el ámbito de la infraestructura ferroviaria

Los neumáticos fuera de uso, gracias a su capacidad de deformación y amortiguamiento de cargas, así como a su resistencia a agentes ambientales externos, pueden ser reciclados como material secundario en la construcción o rehabilitación de vías ferroviarias, proporcionando mayor elasticidad a éstas, a la vez que pueden reducir otros problemas asociados a vibraciones y transmisión de cargas. De este modo, existen diversas prácticas en las que se han utilizado materiales formados a partir de neumáticos usados, para su utilización como componentes de la estructura de ferrocarril. La técnica empleada habitualmente para la obtención de elementos a partir de neumáticos consiste en la trituración del material para su uso como gránulos de caucho.

Dentro de estas aplicaciones, se encuentra su uso en la elaboración de traviesas más elásticas o en la fabricación de mezclas bituminosas para ser empleadas como capa de subbalasto (Di Mino and Di Liberto, 2012; Di Mino et al., 2012), en el caso de que la vía incorpore esta última solución, la cual lleva décadas usándose en países como Italia, Estados Unidos o Japón. Además, una de las prácticas más generalizadas en el sector ferroviario para los neumáticos usados, es la fabricación de elementos elásticos a partir de un proceso de mezclado entre gránulos de caucho obtenidos a partir de estos residuos y algún tipo de material aglomerante (CDM; Isolgoma; Carrascal et al, 2013). Esta aplicación tiene por objeto, además de reutilizar un abundante residuo, reducir el coste de producción de los elementos elásticos, dado que es su principal inconveniente.

Comenzando por el caso del uso de polvo de neumático en subbalasto bituminoso, diversos autores (Bounnano y Mele, 2000; Zeng, 2005), mediante estudios de laboratorio, han puesto de manifiesto que el uso de estos materiales permite mejorar el comportamiento dinámico de la vía, a la vez que se reducen las vibraciones transmitidas a las capas subyacentes. Por otra parte, un estudio (Alfaro Albalat et al., 2011) desarrollado por la Universidad de Valencia (España), indica que el espesor de la capa bituminosa con caucho podría ser reducido hasta valores próximos a 9 cm, en vez de los 12-14 cm utilizados de forma habitual para el subbalasto bituminoso.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Además de los trabajos de laboratorio y modelización del comportamiento de la vía con subbalasto bituminoso que incorpora polvo de neumáticos, en una línea de alta velocidad en Italia (entre Turin y Milan), midieron las vibraciones transmitidas al terreno al paso de los trenes por un tramo con 12 cm de mezcla bituminosa con polvo de caucho, comprando los resultados con los obtenidos en un tramo adyacente con la misma mezcla pero sin caucho (D'Andrea et al, 2012). Las medidas fueron registradas con acelerómetros, comprobando que con la capa bituminosa que incorporaba caucho disminuían las vibraciones en las frecuencias entre 50 y 100 Hz, siendo esto consecuencia de la capacidad para atenuar oscilaciones por parte de las partículas de neumáticos triturados.

Por otra parte, en relación al uso de neumáticos usados en la fabricación de traviesas, estos residuos son empleados junto con materiales plásticos para conseguir componentes más ligeros y duraderos, consiguiendo reducir los costes de mantenimiento de las vías (Anne and Russ Evans, 2006). Además, este tipo de traviesas permiten disminuir las cargas y vibraciones transmitidas a la capa de balasto, a la vez que pueden incrementar la resistencia lateral del sistema. Sin embargo, dado que sus dimensiones y peso son muy similares a las de las traviesas de madera, su uso podría quedar limitado para vías convencionales, puesto que en Alta Velocidad se suele recurrir a traviesas de mayor peso para aumentar la estabilidad de la vía.



Figura 82: Traviesas fabricadas a partir de caucho reciclado y otros plásticos (Anne and Russ Evans, 2006).

A pesar de estas aplicaciones, el uso más extendido dentro de la industria del ferrocarril para los neumáticos desechados, es la elaboración de elementos elásticos capaces de amortiguar cargas y vibraciones. De esta forma, en el estudio de los materiales empleados en la elaboración de placas de asiento, suelas bajo traviesa y mantas bajo balasto, se ha comprobado que diversas compañías (CDM, Isolgoma, etc.) fabricantes de elementos elásticos están desarrollando nuevos materiales compuestos por gránulos de caucho procedentes de neumáticos triturados, ligados mediante una resina polimérica empleada como material aglomerante. De esta forma, persiguen reducir los costes de producción (principal hándicap de empleo para los elementos elásticos) y la acumulación de este tipo de residuos, a la vez que se obtienen productos con adecuadas propiedades elásticas para ser utilizados como sistemas anti-vibración.

Dentro de los diversos tipos de elementos elásticos empleados en la estructura ferroviaria, la Figura 83 muestra un ejemplo de utilización de mantas elastoméricas fabricadas a partir de neumáticos fuera de uso. El empleo de estos materiales, gracias a su elevada capacidad para atenuar vibraciones, tiene especial importancia en aquellas zonas sensibles de sufrir fenómenos de vibración debido a la proximidad de edificios, particularmente en ámbitos urbanos (Sistema MLG). De igual modo, este tipo de mantas pueden incorporar aditivos u otros materiales como fibras, que permiten obtener una amplia gama de prestaciones físicas y mecánicas por parte de estos elementos elásticos (Isolgoma).



Figura 83: Manta antivibratoria fabricada a partir de polvo de neumáticos (Sistema MLG).

Por otra parte, la Figura 84 muestra un ejemplo de placas de asiento fabricadas igualmente a partir de la mezcla entre partículas obtenidas de la trituración de neumáticos, y algún tipo de resina aglomerante.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias



Figura 84: Placas de asiento obtenidas a partir de polvo de neumáticos (CDM).

Además de estas aplicaciones utilizadas para vías de ferrocarril sobre balasto, en la tipología de vía en placa también se emplean materiales fabricados a partir de neumáticos usados como componentes elásticos para amortiguar cargas y reducir la rigidez del sistema. Como ejemplo, la Figura 85 muestra un sistema de carril embebido en losa de hormigón, utilizando material elástico (formado a partir de neumáticos triturados) entre elemento disipador de energía.



Figura 85: Carriles embebidos en una mezcla de polvo de neumáticos y resina (Sistema MLG).

No obstante, en las distintas aplicaciones desarrolladas actualmente se emplean los neumáticos usados a partir de la trituración del material, lo que requiere llevar a cabo una serie de procesos de mecánicos para trocear los neumáticos y separar los distintos materiales que componen estos residuos, incrementando así el coste de fabricación de estos elementos, los cuales además necesitan de un material aglomerante para unir los gránulos de caucho. Además, la trituración del material provoca la pérdida de parte de las propiedades físicas y mecánicas de los neumáticos, los cuales son elementos con elevada carga

tecnológica con el fin de producir materiales de altas prestaciones y durabilidad.

2.5.4 Proceso de deconstrucción en capas de neumáticos usados

Con el fin de evitar la trituración de los neumáticos usados, y todos los procesos asociados para conseguir gránulos de cauchos, una innovadora tecnología (Gomavial Solutions, S.L.) permite obtener las distintas bandas que componen los neumáticos, consiguiendo así paneles elásticos de altas prestaciones mecánicas y elevada durabilidad del material.

El proceso de deconstrucción consiste en una serie de cuchillas que consiguen extraer por separado o de forma conjunta las distintas capas que componen los neumáticos, por lo que el material experimenta reducida transformación dado que se consigue reutilizar de forma similar a la que fueron diseñadas las capas elásticas. De esta forma, las bandas de neumáticos conservan todas sus propiedades inherentes, a la vez que se reducen los costes energéticos y medioambientales, disminuyendo además el tiempo de fabricación en relación a los elementos elaborados a partir de polvo de neumáticos. La Figura 86 muestra un ejemplo del proceso de obtención de las capas de neumáticos.



Figura 86: Proceso industrial de deconstrucción de neumáticos (Gomavial Solutions, S.L.).

A partir de este proceso de deconstrucción se obtienen las diferentes capas que componen los neumáticos, las cuales pueden ser clasificadas en función de la posición que ocupan (Figura 87): capa exterior (o banda de rodadura), resistente al desgaste y garantizar la adherencia y estabilidad direccional; capa

intermedia, con tejido metálico para soportar la presión interior y proporcionar estabilidad al neumático; y capa interior, cuya principal función es ofrecer estanqueidad al neumático.

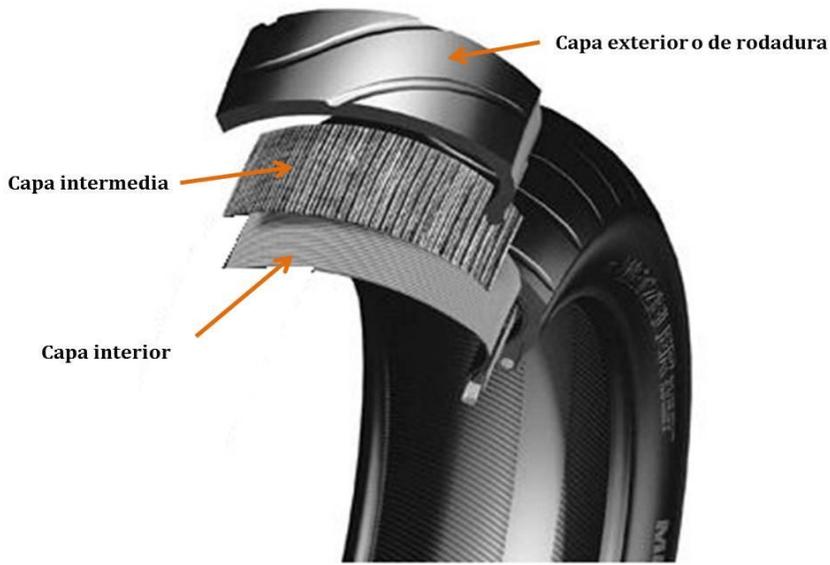


Figura 87: Principales capas elásticas que componen los neumáticos (Elaboración propia a partir de metzeler.com).

A partir de estas bandas que componen los neumáticos, se pueden elaborar elementos elásticos planos (requisito fundamental para su uso en vías ferroviarias) con unas propiedades físicas y mecánicas que los hacen aptos para su uso en ingeniería civil, presentando prestaciones superiores a las obtenidas para elementos fabricados a partir de polvo de neumático u otras materias primas. Esto supone una importante ventaja competitiva del producto al no ser necesario un aglomerante para unir las partículas de caucho, lo cual podría dar lugar fragmentaciones posteriores de las piezas fabricadas o desprendimientos de gránulos que inhabilitan el material y acortan su vida útil.

2.6 Conclusiones del estado del arte. Motivación de la tesis

El transporte por ferrocarril es un medio de comunicación que cuenta con una serie de ventajas competitivas sobre otros modos alternativos dado que este sistema tiene una gran eficiencia energética y capacidad para el transporte de personas y mercancías, a la vez que provoca menores costes socio-ambientales que sus competidores más cercanos como son el transporte aéreo y por

carretera. No obstante, a pesar de estas ventajas, en el estudio del estado del arte se ha podido ver que el ferrocarril no queda exento de problemas y dificultades técnicas que comprometen la durabilidad de la vía y el adecuado comportamiento mecánico de la pista ferroviaria.

Los problemas más destacados están relacionados con el deterioro de la vía, con la propagación de ondas y generación de ruido, y los efectos asociados a valores inadecuados de rigidez vertical de la vía, así como su fluctuación a lo largo de la vía. Dentro de los distintos tipos de deterioro, los más relevantes son los relacionados con la pérdida de la calidad geométrica dado que pueden dar lugar a problemas de estabilidad, siendo este hecho intensificado con la aparición de fenómenos de resonancia o licuefacción del balasto que pueden ser causados por la transmisión de ondas. Además, las vibraciones pueden generar pérdida de confort en la circulación de los vehículos, así como ruido molesto para los usuarios y la población cercana a vías ferroviarias.

Estos problemas, junto con otros aspectos relacionados con la resistencia de la vía, pueden acentuarse con la adopción de un valor inapropiado de la rigidez vertical del sistema, así como la heterogeneidad de la misma a lo largo de la vía. Así, existe la tendencia actual a buscar nuevas soluciones que mitiguen los efectos negativos de los problemas asociados a la infraestructura ferroviaria, prestando especial atención al desarrollo de elementos elásticos con distintas características de diseño (espesor, tipo de material, geometría, etc.), lo que permite modificar el comportamiento del sistema con reducidas variaciones de la estructura ferroviaria.

Los principales elementos elásticos utilizados en vías ferroviarias son las placas de asiento, suelas bajo traviesas y mantas bajo balasto. De forma habitual, estos componentes están formados a partir de polímeros, los cuales, debido a su elevado precio, suponen un hándicap para el uso generalizado de los elementos elásticos dado que provocan el incremento de costes constructivos de la vía.

Con el fin de eliminar este problema y poder extender el uso de elementos elásticos en vías de ferrocarril, actualmente existe la tendencia a elaborar nuevos componentes a partir de materiales elásticos fuera de uso, lo que además está en consonancia con las políticas y directivas centradas en el desarrollo eficiente y sostenible.

En este contexto aparece la utilización de neumáticos fuera de uso para el desarrollo de elementos elásticos, dado que se trata de un residuo abundante y

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

con elevadas prestaciones mecánicas. Sin embargo, la aplicación habitual de estos residuos consiste en la trituración del material, obteniendo así gránulos de caucho que son mezclados con algún tipo de resina o material aglomerante. Así, esta técnica requiere un proceso industrial largo y costoso para la obtención de los gránulos de caucho con tamaño apropiado y sin la presencia de otros materiales (textiles, metales, fibras, etc.) que componen los neumáticos.

Para evitar estos problemas, en esta tesis doctoral se emplearon las bandas de neumáticos usados obtenidas mediante un proceso de deconstrucción que evita la trituración del material. En este sentido, la elaboración de elementos elásticos como placas de asiento, suelas bajo traviesas y mantas bajo balasto a partir de capas de neumáticos permite ahorrar costes de producción, a la vez que consume mayor cantidad de residuo y genera menores emisiones derivadas del tratamiento del material.

OBJETIVOS

OBJECTIVES

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

A partir de las conclusiones extraídas en el estudio del estado del arte se ha podido comprender que la utilización de elementos elásticos permite mejorar el comportamiento dinámico y la durabilidad de la vía, reduciendo de esta forma los costes de mantenimiento a la vez que se incrementa la calidad del servicio de transporte ferroviario. Sin embargo, el uso de estos elementos tiene asociado el inconveniente del elevado precio de los elastómeros empleados en la elaboración de estos componentes, por lo que surge la necesidad actual de producir elementos elásticos a partir de materiales alternativos de menor coste.

Este hecho ha servido de motivación para la realización de la presente tesis doctoral que tiene como objetivo principal desarrollar elementos elásticos para su uso en vías ferroviarias a partir de capas de neumáticos fuera de uso. Con este fin se persigue obtener elementos económicamente más competitivos, con prestaciones mecánicas aptas para su uso en vías de ferrocarril, y medioambientalmente más sostenibles, que permitan generalizar su empleo en todo tipo de vías para alargar su vida de servicio y mejorar su respuesta ante el paso de vehículos durante su explotación.

3.2 Objetivos específicos

Los principales elementos elásticos utilizados en distintos niveles dentro de la estructura ferroviaria están constituidos por placas de asiento de carril, suelas bajo traviesas y mantas bajo la capa de balasto. En la presente tesis doctoral se trata de obtener estos tres tipos de componentes elásticos a partir de las diferentes capas que componen los neumáticos fuera de uso. Para ello, se marcan los siguientes objetivos específicos:

- Seleccionar el tipo de banda de neumático más apropiada para su utilización como materia prima en el desarrollo de los elementos elásticos, definiendo sus principales características físicas y mecánicas acordes con las exigencias de uso en vías de ferrocarril.
- Determinar las propiedades y parámetros de diseño óptimos para la aplicación de los elementos de neumáticos en distintos tipos de infraestructuras ferroviarias que requieran componentes elásticos con diferente comportamiento mecánico.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

- Evaluar la aptitud resistente y durabilidad de los elementos de neumáticos para determinar su viabilidad de empleo en vías de ferrocarril, las cuales requieren una adecuada vida útil de este tipo de componentes para evitar sobre costes de mantenimiento.
- Analizar la posible influencia de los elementos de neumáticos en la respuesta mecánica de la vía, tratando así de predecir su efecto en el comportamiento del sistema ante el paso de vehículos.
- Determinar la susceptibilidad de utilización de los elementos de neumáticos en vías ferroviarias españolas de acuerdo a la normativa y especificaciones técnicas vigentes.
- Evaluar el comportamiento de los elementos desarrollados en referencia a otros componentes elásticos utilizados de forma habitual en vías de ferrocarril.
- Estudiar la respuesta a largo plazo de los elementos de neumáticos en un tramo de prueba, así como el comportamiento de la vía donde éstos son utilizados.

3 Objectives

3.1 Main objective

The conclusions extracted from the study of the literature indicate that the use of elastic elements in railway tracks allows improvement of its dynamic behaviour and its durability, which reduces the costs of maintenance at the same time that the quality of the railway transportation service is increased. However, the use of these elements presents the disadvantage of the high costs associated to the price of the elastomers utilized for the element production. This fact has led to the current need to develop new elastic components from alternative and cheaper materials.

In this context, the present thesis aims to develop railway elastic elements from the elastic layers that compose the end-of-life tires. The purpose of this objective is obtaining components economically and environmentally more competitive and with an adequate mechanical performance to be used in railway. This fact could allow generalization of the application of these elements to improve the behaviour of the railway track and its service life.

3.2 Secondary objectives

The main elastic elements used in different levels of the railway structure are rail pads, under-sleeper pads and under-ballast mats. The present thesis pretends to develop these types of elastic components from the layers that compose the used tires. For this purpose, the following specific objectives are stated:

- Selecting the type of tire layer more appropriate to be used as raw material during the development of the railway elastic components, defining its main physical and mechanical properties in consonance with the requirements to employ these components in railway tracks.
- Determining the optimal design properties and parameters to apply the tire elements in diverse railway tracks that require elastic components with different mechanical performance.
- Evaluating the resistance capacity and durability of the tire elements with the aim of studying the viability of its use in railway tracks, which require components with an adequate service life to avoid maintenance over costs.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

- Analysing the possible influence of the elastic elements manufactured from used tires in the track response, trying to predict the effect of using this type of components in the railway track behaviour when train passing.
- Determining the ability of the utilization of the tire elements in Spanish railway tracks according to the actual Standards.
- Evaluating the behaviour of the tire elements in comparison with the performance of elastic components commonly used in railway tracks.
- Studying the long-term behaviour of tire elements in a trial section as well as the performance of the track where they are used.

Metodología

Methodology

4. Metodología

Para la consecución de los objetivos marcados, la metodología seguida en esta tesis doctoral comenzó por el estudio del estado del arte, para posteriormente llevar a cabo el desarrollo de los tres principales elementos elásticos (placas de asiento, suelas bajo traviesa y mantas bajo balasto) a partir de diversas etapas de trabajo que engloban la caracterización de las capas de neumáticos usadas como materia prima, el diseño de los componentes elásticos elaborados a partir de dichos materiales, y el análisis de su aptitud para ser utilizados en vías ferroviarias.

Este cuarto capítulo se centra en la metodología seguida para el desarrollo de elementos elásticos, describiendo por un lado los materiales utilizados como materia prima, y por otro lado el plan de trabajo que comprende las diferentes actividades llevadas a cabo para conseguir los objetivos marcados en esta investigación.

4.1 Materiales

Como materia prima para la obtención de componentes elásticos ferroviarios, se emplean bandas procedentes del proceso de deconstrucción de neumáticos usados, el cual permite obtener las tres capas elásticas (banda interior, intermedia y exterior o de rodadura) que componen estos residuos de la misma forma en la que fueron elaborados, por lo que el material experimenta reducida transformación en sus propiedades físicas y mecánicas. La Figura 88 muestra el aspecto visual de las tres capas elásticas obtenidas de la deconstrucción de neumáticos fuera de uso.



Figura 88: Deconstrucción en capas de neumáticos usados. Banda interior (izquierda), intermedia (centro) y externa (derecha).

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Las capas de neumáticos utilizadas en esta tesis doctoral presentan una composición y unas características geométricas (como la huella del neumático o la anchura y espesor de la banda elástica) que dependen del tipo y modelo de neumático, así como de su desgaste. En relación al tipo de neumático, para el presente estudio se utilizan tipo invierno y tipo común, cuya principal diferencia es la profundidad y geometría de la huella del neumático (Figura 89), pudiendo variar también el espesor y la composición de las distintas capas elásticas que forman los neumáticos.



Figura 89: Paneles de neumáticos tipo invierno (izquierda) y tipo común (derecha).

Por su parte, son diversos los modelos de neumáticos que han sido empleados para el desarrollo de elementos elásticos, diferenciándose éstos fundamentalmente por la composición del material, y por la geometría del dibujo de la huella del neumático. La Figura 90 muestra un ejemplo de las capas de rodadura obtenidas a partir de diversos modelos de neumáticos, correspondientes a distintos fabricantes de estos materiales.



Figura 90: Paneles elásticos procedentes de diferentes modelos de neumáticos.

El nivel de desgaste de los neumáticos supone también una variable entre los diferentes materiales empleados en la presente investigación, englobando desde neumáticos con alto nivel de desgaste (en los que la huella de neumático está totalmente gastada) hasta neumáticos sin usar, los cuales son un residuo debido a su rechazo en fábrica por no cumplir los requisitos para su comercialización. La Figura 91 muestra dos capas que se corresponden con estos dos casos extremos citados, neumáticos con alto y nulo desgaste.



Figura 91: Muestras de neumáticos con distinto nivel de desgaste.

Todas estas variables hacen posible estudiar una amplia gama de materiales, con el fin de conseguir diferentes soluciones elásticas para su uso en vías de ferrocarril con distintas exigencias mecánicas.

A pesar de estas diferencias entre los distintos neumáticos fuera de uso, todas las bandas exteriores (o capas de rodadura) tienen en común que están formadas principalmente por caucho, conteniendo tejidos textiles entrecruzados y diversos aditivos que mejoran las prestaciones y durabilidad del material, consiguiendo así un material resistente, termoestable y duradero. En referencia a sus valores habituales de espesor, éstos oscilan principalmente entre un mínimo de 4,0 mm y un máximo de 11,5 mm, dependiendo fundamentalmente del nivel de desgaste y del tipo de neumático. El valor superior de espesor se corresponde con las bandas de neumáticos descartados para su comercialización durante su proceso de fabricación, por lo que su nivel de desgaste es nulo.

Por otro lado, la banda intermedia del neumático se compone principalmente de tejido de acero y caucho, siendo ésta la parte resistente de los neumáticos. En referencia a sus características geométricas, las capas intermedias usadas en esta tesis tienen en general un espesor comprendido entre 2,5-6,0 mm,

dependiendo fundamentalmente del tipo y modelo de neumático utilizado, dado que el desgaste tiene nulo efecto en estas capas.

Respecto a la capa interna de los neumáticos, ésta se corresponde con un geotextil y una geomembrana de caucho. Este tipo de banda elástica es la más delgada dentro de los materiales que forman los neumáticos, situándose su espesor generalmente en torno a 1,5-2,0 mm, pudiendo variar dependiendo del tipo y modelo de neumático seleccionado.

En relación a las dimensiones horizontales, estos tres tipos de capas de presentan valores de longitud y anchura más homogéneos que en el caso del espesor, situándose generalmente en torno a 1,80 m y 0,18 m, respectivamente.

4.2 Plan de trabajo

A partir de las bandas elásticas que componen los neumáticos usados se establece la metodología seguida en esta tesis doctoral, la cual se estructura en 7 etapas de trabajo de acuerdo con el esquema representado en la Figura 92.

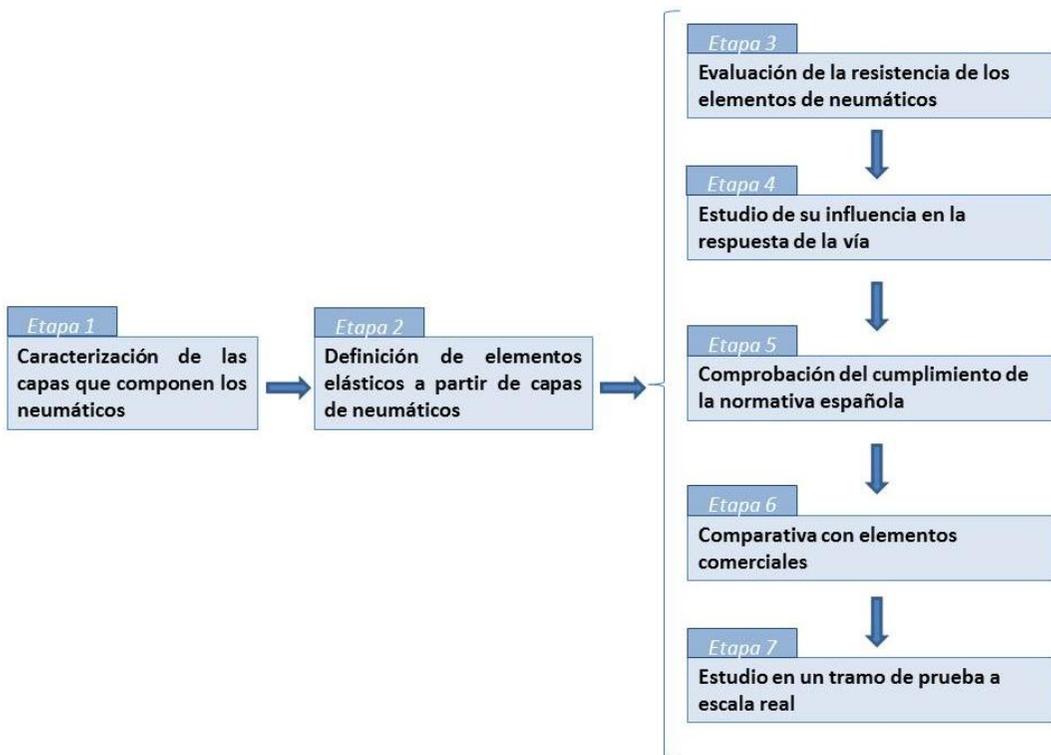


Figura 92: Esquema del plan de trabajo.

4.2.1 Caracterización de las capas que componen los neumáticos (Etapa 1)

En primer lugar, considerando como punto de partida las tres capas elásticas (banda de rodadura, intermedia e interior) que se obtienen de la deconstrucción de los neumáticos, se lleva a cabo la caracterización de sus propiedades físicas y mecánicas con el fin de definir la materia prima óptima a utilizar para la elaboración de los elementos elásticos para su aplicación en vías de ferrocarril. De esta forma, a partir de este estudio se determina la banda de neumático más apropiada para la producción de componentes ferroviarios, teniendo en cuenta las exigencias (geometría, resistencia, resistividad eléctrica, elasticidad, etc.) que deben de cumplir posteriormente estos materiales para su aplicación en vías de ferrocarril.

Para evaluar las características físicas y mecánicas de las tres capas que componen los neumáticos, se determina su valor medio de dureza (ISO 868), densidad (ISO 1183) y resistencia a tracción longitudinal y transversal (ISO 37). Además, una vez seleccionado el tipo de capa de neumático más adecuada para la elaboración de componentes ferroviarios, se evalúa su resistencia eléctrica y termoplasticidad a tracción y compresión, de acuerdo con la normativa de ADIF (E.T. 03. 324.005.0) que recoge las especificaciones para elementos compuestos por caucho (material mayoritario de los neumáticos). Estos dos últimos parámetros son analizados dado que a la materia prima constituyente de los elementos se le exige que mantenga sus propiedades elásticas ante el incremento de la temperatura, a la vez que debe de garantizar el aislamiento eléctrico de posibles corrientes derivadas del carril ante el paso de los vehículos.

El proceso de realización de estos ensayos se encuentra descrito en el Anexo I de la presente tesis doctoral, donde además se recoge el resto de métodos llevados a cabo durante la investigación.

4.2.2 Definición de elementos elásticos a partir de capas de neumáticos (Etapa 2)

Una vez seleccionado el tipo de capa de neumático más apropiado, se procede a desarrollar placas de asiento de carril, suelas bajo traviesa y mantas bajo balasto para su uso en vías ferroviarias. Para ello, esta fase de trabajo se divide a su vez en tres sub etapas: (i) geometría que debe de tener cada elemento de neumático; (ii) determinación de sus características óptimas para su aplicación en vías; (iii) y recomendaciones de uso para su aplicación en vías ferroviarias con diferentes exigencias para estos componentes.

Diseño de los elementos de neumáticos

Como punto de partida para el desarrollo de elementos elásticos, se definen las propiedades geométricas y características de diseño que deben tener estos componentes atendiendo a sus exigencias para su uso en vías ferroviarias. Para ello, se siguen las recomendaciones propuestas por la UIC (2001, 2011 y 2013) y por las especificaciones técnicas de ADIF, para el desarrollo de placas de asiento, suelas bajo traviesas y mantas elásticas, apropiadas para su uso en vías ferroviarias tanto convencionales como de alta velocidad. Además, se tienen en cuenta las características de diseño utilizadas en elementos elásticos comerciales, los cuales han sido empleados en diversas líneas ferroviarias (principalmente europeas).

Así, a partir de estas referencias (recomendaciones de la UIC, ADIF, y elementos comerciales), se definen los rangos de valores entre los que deben encontrarse las propiedades geométricas fundamentales de los distintos componentes elásticos, a la vez que se determinan las variables de diseño que pueden influir en la respuesta mecánica de estos materiales, los cuales serán analizados en etapas posteriores.

Una vez conocidos los parámetros básicos de diseño, se definen las técnicas a aplicar para la obtención de elementos elásticos a partir de neumáticos. Para el establecimiento del proceso de fabricación, se tienen en cuenta las características (geometría horizontal, espesor, técnicas de colocación en vía, etc.) que deben cumplir los elementos elásticos, así como las limitaciones geométricas de las propias bandas de neumáticos. Además, con el fin de conseguir componentes económicamente más competitivos, se optimiza la elaboración de elementos para conseguir el mayor número posible de piezas a partir de una misma banda de neumático.

Por otra parte, en un paso previo al análisis de la influencia de distintos parámetros de diseño, se procede a la fabricación de muestras con características apropiadas para su evaluación mediante ensayos de laboratorio.

Determinación de las características óptimas para los elementos de neumáticos

Posterior a la elaboración de las muestras de ensayo, se pasa a evaluar la respuesta mecánica de los elementos con distintas características, con el objetivo de determinar el diseño óptimo de los materiales para su uso en distintos tipos de vías de ferrocarril. Debido a las diferencias en composición química y propiedades geométricas que presentan las capas de neumáticos

dependiendo del estado de desgaste de éstos y de su origen (fabricante, tipo, modelo, etc.), es necesario analizar la influencia de estas variables en la respuesta de los elementos, consiguiendo así diferentes soluciones elásticas.

Dentro de las distintas variables para la elaboración de los componentes elásticos, las dimensiones horizontales de estos materiales quedan definidas por las características de los componentes donde van a ser utilizados (como la geometría de la sujeción o de las traviesas, o como las dimensiones de la capa de balasto), por lo que el espesor es la variable geométrica seleccionada como parámetro de diseño para los elementos elásticos. Dado que las capas de neumáticos fuera de uso presentan distintos niveles de desgaste, es posible conseguir un amplio rango de valores de espesor, por lo que este parámetro es establecido como principal factor de diseño para definir elementos elásticos con propiedades apropiadas para su uso en distintos tipos de vías.

Por otra parte, el uso de distintos neumáticos (procedentes de diversos modelos, y diferenciando entre los neumáticos tipo invierno y tipo común) en la elaboración de elementos elásticos puede llevar a la variabilidad de su comportamiento dentro de un mismo valor de espesor. Así, se analiza la influencia de este parámetro (tipo/modelo de neumáticos) mediante el estudio de muestras (a) procedentes de un único neumático; (b) correspondientes a distintos neumáticos, pero dentro de un mismo tipo y modelo (es decir, diferentes ejemplares pertenecientes a una misma clase de neumático); (c) y procedentes de distintos tipos y modelos de neumáticos elaborados por diversos fabricantes. De esta forma, se puede evaluar la repetibilidad de los resultados con el fin de conocer la homogeneidad de los elementos fabricados a partir de neumáticos fuera de uso.

Por su parte, con la intención de reducir la posible heterogeneidad de los elementos como consecuencia del uso de bandas de neumáticos en diferente estado y con diversa procedencia, se desarrollarán tratamientos del material que permitan mejorar su homogeneidad. Además, estos procesos son realizados con el fin de obtener elementos elásticos con diferente respuesta mecánica dentro de un mismo valor de espesor, consiguiendo así mayor gama de soluciones elásticas susceptibles de ser utilizadas en distintos tipos de vías. Estos tratamientos se irán definiendo en función de los resultados de comportamiento del material, tratando así de ampliar su rango de respuesta mecánica.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Además de estos tres factores de estudio (espesor, tipo de neumático y tratamiento del material), para el caso de las suelas elásticas, debido a la necesidad de unir este componente a la parte inferior de las traviesas, se analizan distintas soluciones de adherencia entre ambos materiales. Dependiendo de las características de la capa de neumático seleccionada como materia prima, se definirán las posibles técnicas de unión entre el elemento elástico y la base de las traviesas.

Para evaluar la influencia de los parámetros de diseño, a partir de la cual se definen las características óptimas para el desarrollo de elementos de neumáticos, se realizan diversos ensayos de laboratorio para el estudio de la respuesta mecánica de cada tipo de elemento elástico. Para el caso concreto de las **placas de asiento**, se evalúa la influencia de los parámetros mediante los ensayos de rigidez estática bajo distintos niveles de esfuerzo (entre 20-95 kN y entre 100-200 kN) de acuerdo con la norma UNE-EN 13146-9, así como un ensayo de rigidez dinámica a una frecuencia de 4 Hz (entre 20-95 kN) según el anexo B de la UNE-EN 13481-2. La Figura 93 muestra el equipo utilizado para el desarrollo de los ensayos, los cuales son descritos en el Anexo I.

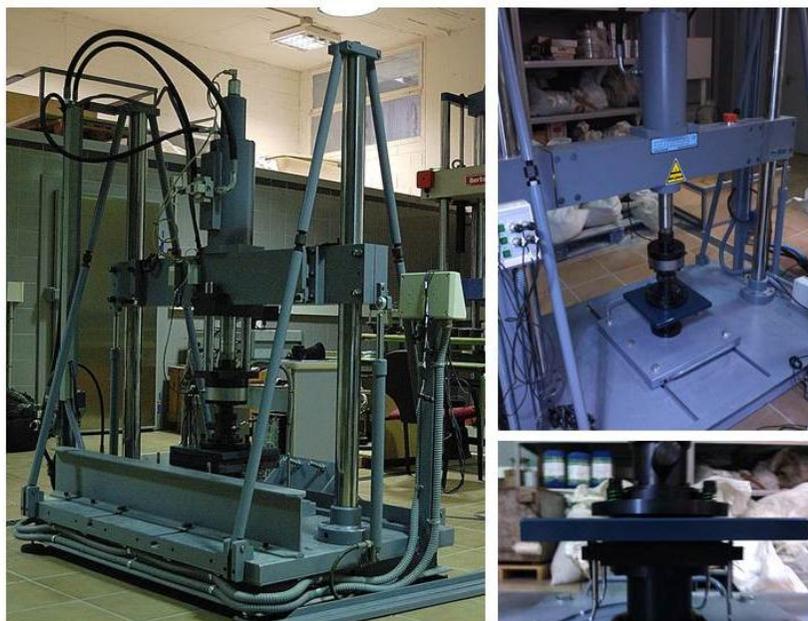


Figura 93: Aspecto visual del equipo utilizado para la evaluación en laboratorio de la respuesta de elementos elásticos.

En referencia a las **suelas bajo traviesa**, se analiza la influencia de los parámetros de diseño a partir de su respuesta estática (para distintos niveles de carga, entre 0,01-0,10 N/mm² y entre 0,01-0,20 N/mm²) y su comportamiento dinámico (a distintas frecuencias de carga, 5 Hz y 10 Hz), de acuerdo con la normativa DIN 45673-6. En consonancia a dicha normativa, para la realización de los ensayos se utiliza una placa de balasto metálica normalizada, que simula la superficie de la capa de balasto de la vía en contacto con las traviesas. La Figura 94 muestra un ejemplo de la configuración de ensayo utilizada en el análisis de la respuesta mecánica de suelas bajo traviesa.



Figura 94: Configuración de ensayos para suelas elásticas.

Por su parte, se lleva a cabo un ensayo de arrancamiento que permite medir la resistencia de la unión de distintas soluciones de suelas de neumático adheridas a bloques de hormigón que simulan las traviesas, pudiendo así determinar el método más apropiado de unión suela-traviesa. La Figura 95 muestra el aspecto de la configuración del ensayo de tracción sobre el conjunto suela-hormigón. El proceso de realización de dicho método de ensayo se encuentra descrito en el Anexo I.



Figura 95: Configuración del ensayo de arrancamiento para evaluar la unión suela-hormigón.

En relación a las **mantas bajo balasto**, para determinar la influencia de los parámetros de diseño, se realiza un ensayo estático y tres ensayos dinámicos (a 1 Hz, 5 Hz y 10 Hz) entre una tensión mínima de $0,02 \text{ N/mm}^2$ y una tensión máxima de $0,10 \text{ N/mm}^2$. Estos ensayos, cuyo proceso de ejecución se describe en el Anexo I de la presente tesis doctoral, se realizan de acuerdo con la normativa DBS 918 071-01 y DIN 45673-5. La principal diferencia entre estas dos normas reside en el tipo de placas utilizadas para solicitar a las mantas. Por un lado, la DBS 918 071-01 utiliza placas de acero planas (Figura 96, izquierda), mientras que la norma DIN 45673-5 sustituye una de las placas planas por una placa de balasto normalizada (Figura 96, derecha).

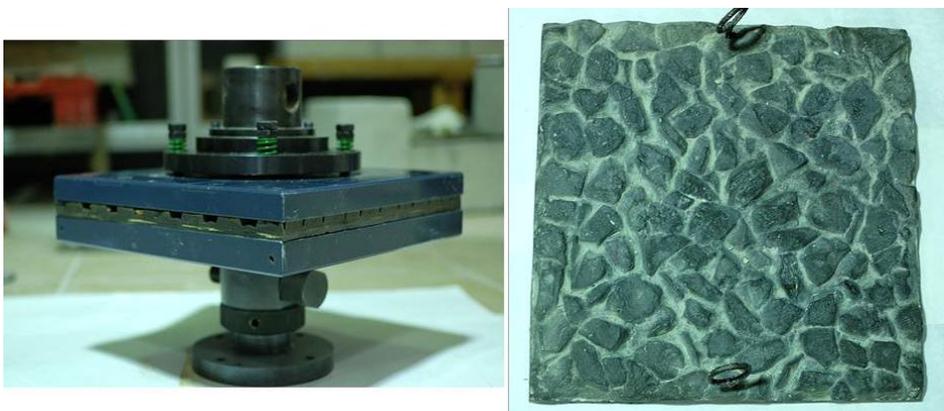


Figura 96: Placas de ensayo empleadas para solicitar muestras de mantas elásticas.

Recomendaciones de diseño para el uso de los elementos de neumáticos

Dentro de esta fase de definición de los elementos elásticos a partir de capas de neumáticos, una vez establecido el diseño de los componentes de neumáticos y determinado la influencia de distintos factores de diseño (espesor; tipo y modelo de neumático; tratamiento del material; y tipo de unión para el caso de las suelas), en esta sub etapa de estudio se proponen unas recomendaciones generales para la aplicación de elementos de neumáticos con propiedades adecuadas para su uso en diferentes tipos de vías, con distintas exigencias para estos componentes.

De acuerdo a estas tres sub etapas de trabajo para la definición de elementos elásticos a partir capas de neumáticos deconstruidos, la Tabla 15 resume las actividades llevadas a cabo durante esta fase de desarrollo de los componentes elásticos.

Tabla 15: Resumen del plan de trabajo seguido para el desarrollo de elementos elásticos a partir de las capas que componen los neumáticos usados.

Actividad	Elemento elástico	Ensayos de laboratorio
Diseño geométrico de los elementos elásticos	Placas de asiento Suelas bajo traviesa Mantas bajo balasto	-
Determinación de las características óptimas para los elementos de neumáticos, a partir del análisis de los parámetros: <i>Espesor</i> <i>Tipo de neumático</i> <i>Tratamiento del material</i> <i>Método de adherencia (suelas)</i>	Placas de asiento	-Rigidez estática entre 20-95 kN y entre 100-200 kN -Rigidez dinámica a 4 Hz
	Suelas bajo traviesa	-Módulo estático entre 0,01-0,10 N/mm ² y 0,01-0,20 N/mm ² -Módulos dinámicos a 5 y 10 Hz -Resistencia al arrancamiento (adherencia)
	Mantas bajo balasto	-Módulo estático entre 0,02-0,10 N/mm ² -Módulos dinámicos a 1, 5 y 10 Hz
Recomendaciones de diseño para el uso de elementos de neumáticos	Placas de asiento Suelas bajo traviesa Mantas bajo balasto	-

4.2.3 Evaluación de la resistencia de los elementos de neumáticos (Etapa 3)

Posterior a la definición de las características óptimas de los elementos de neumáticos, es necesario conocer su aptitud mecánica ante cargas que simulan el paso de vehículos, con el fin de conocer la durabilidad de estos materiales. Así, en primer lugar se evalúa la resistencia a la fatiga mecánica de los distintos

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

elementos elásticos (placas de asiento, suelas bajo traviesa y mantas bajo balasto), ante cargas dinámicas repetidas que simulan el paso de vehículos por la vía.

Por otra parte, dado que uno de los principales modos de fallo de los elementos elásticos ferroviarios es su deterioro ante agentes climáticos (Ito y Nagai, 2008), se estudia la resistencia al deterioro de los elementos elásticos ante procesos artificiales que reproducen los principales agentes atmosféricos que pueden modificar su vida de servicio. Para ello, se analiza su resistencia al envejecimiento térmico, a la acción del agua, a la heladicidad, y a ciclos de frío-calor (DBS 918 071-01, DIN 45673-5 y DIN 45673-6).

Para el caso particular de las **placas de asiento**, se estudia en primer lugar su resistencia a la fatiga mecánica ante cargas inclinadas (Figura 97) según la normativa UNE-EN 13146-4, la cual establece el ángulo de aplicación y la intensidad de la carga a partir de las propiedades dinámicas del material a analizar. Por otra parte, se evalúa el cambio de las propiedades mecánicas para placas de neumáticos sometidas a un proceso de envejecimiento térmico en estufa, a ciclos de congelación-descongelación, y a variaciones de frío-calor (recogidos en el Anexo I de esta tesis doctoral), de acuerdo con lo establecido por la DBS 918 071-01 y DIN 45673-5 para evaluar el deterioro climático de los materiales empleados en la elaboración de elementos elásticos.



Figura 97: Configuración del ensayo de fatiga de placas bajo carga inclinada.

Además, al finalizar ambos métodos de deterioro (fatiga y climático) para las placas de asiento, se evalúa la variación de su rigidez estática y dinámica (a 4 Hz) entre las cargas de 20-95 kN según la UNE-EN 13146-9 y el anexo B de la UNE-EN 13481-2, respectivamente, con el fin de determinar la degradación del material.

Por parte de las **suelas bajo traviesa**, se analiza su resistencia a la fatiga mecánica mediante un proceso de cargas dinámicas repetidas aplicadas sobre un bloque de hormigón con suela de neumático, estando este conjunto dispuesto sobre una capa de balasto en un cajón (Figura 98), tal y como indica la normativa DIN 45673-6. En una fase anterior y posterior al proceso de fatiga, se mide el cambio en el comportamiento estático y dinámico del material (DIN 45673-6), pudiendo así evaluar su durabilidad.



Figura 98: Disposición de los elementos empleados en el ensayo de fatiga para suelas elásticas.

Respecto a la resistencia al deterioro climático por parte de las suelas, de acuerdo con las especificaciones de la DIN 45673-6, se evalúa mediante el cambio de resistencia a la tracción y capacidad de elongación del material tras

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

un proceso de envejecimiento térmico, y ciclos de congelación-descongelación y frío-calor.

Por otra parte, para determinar la durabilidad de las **mantas de neumáticos** para su uso en vías de ferrocarril, se analiza en primer lugar su resistencia a la fatiga para una muestra (de 900 mm x 900 mm) dispuesta en el fondo de un cajón de balasto, con una altura de capa granular igual a 35 cm. El proceso de fatiga se realiza en consonancia con la normativa DIN 45673-5, que además requiere de la medida del módulo de rigidez estática y dinámica antes y después de la fatiga del material. La configuración de este ensayo, cuyo proceso se describe en el Anexo I, se muestra en la Figura 99.

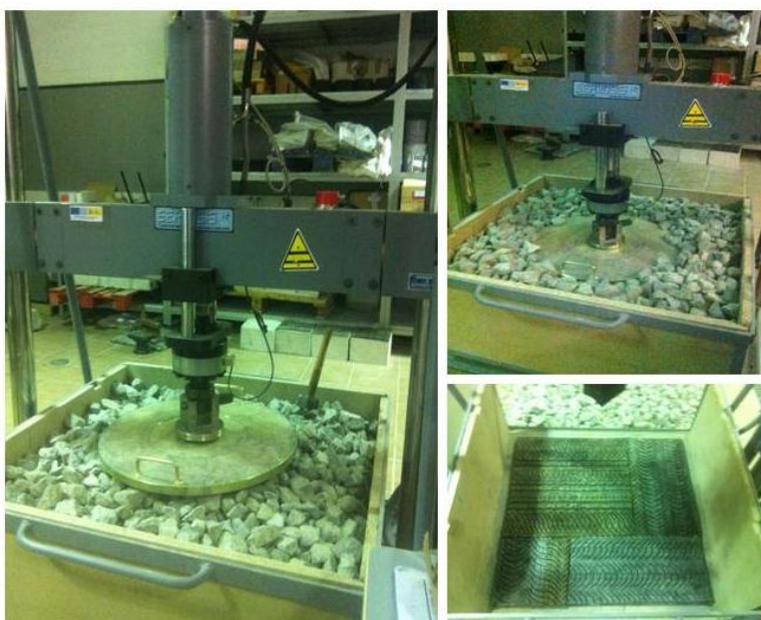


Figura 99: Aspecto visual del montaje del ensayo de fatiga para mantas elásticas.

Para la medida de la resistencia al deterioro climático, se analiza el cambio en el módulo estático y dinámico del material ante la acción del agua, y procesos de envejecimiento térmico y ciclos de hielo-deshielo (DIN 45673-5), dado que éstos son los principales agentes climáticos que afectaran a las mantas elásticas. En este caso es fundamental evaluar la resistencia de las mantas ante las condiciones atmosféricas dado que su durabilidad es un factor importante como consecuencia de la dificultad para remplazar las mantas elásticas en la vía. El desarrollo de estos procesos de deterioro se recoge en el Anexo I.

La Tabla 16 resume el trabajo realizado en esta etapa de estudio, la cual tiene por objeto analizar la resistencia de los elementos de neumáticos de acuerdo con las exigencias para estos materiales en las vías ferroviarias sobre capa de balasto.

Tabla 16: Plan de trabajo para evaluar la resistencia de los elementos de neumáticos.

Elemento elástico	Parámetro de estudio	Ensayos	
Placas de asiento	Resistencia a la fatiga	-Fatiga a carga inclinada	<u>Variación de:</u> -Comportamiento estático -Comportamiento dinámico
	Resistencia al deterioro climático	-Calor -Frió-calor -Hielo-deshielo	
Suelas bajo traviesas	Resistencia a la fatiga	-Fatiga en cajón de balasto	-Comportamiento estático -Comportamiento dinámico
	Resistencia al deterioro climático	-Calor -Frió-calor -Hielo-deshielo	-Resistencia a la tracción -Capacidad de elongación
Mantas bajo balasto	Resistencia a la fatiga	-Fatiga en cajón de balasto	-Comportamiento estático -Comportamiento dinámico
	Resistencia al deterioro climático	-Calor -Agua -Hielo-deshielo	

4.2.4 Estudio de la influencia de los elementos de neumático en la respuesta de la vía (Etapa 4)

En una etapa de estudio posterior a la evaluación de la durabilidad de los elementos de neumáticos, se analiza la influencia que puede tener su uso en la respuesta mecánica de la infraestructura ferroviaria, con el fin de conocer si el uso de estos elementos puede llevar a cambios considerables en la respuesta del sistema ferroviario ante el paso de los trenes, y predecir así el comportamiento de la vía al emplear estos materiales.

Dado que una de las funciones principales de los elementos elásticos es reducir las cargas transmitidas a las capas inferiores, a la vez que modificar la flexibilidad del sistema ferroviario, la utilización de estos componentes puede cambiar el comportamiento del conjunto. Así, en primer lugar se evalúa el efecto de los componentes desarrollados (placa de asiento, suela bajo traviesa y manta bajo balasto) en la respuesta mecánica de un cajón de balasto con sección cuadrada de 1000 x 1000 mm, el cual incorpora media traviesa de hormigón, un sistema de sujeción tipo HM y un cupón de carril (Figura 100),

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

todo ello sobre una capa de 35 cm de balasto para tratar de simular la superestructura ferroviaria.



Figura 100: Configuración del cajón de balasto para simular el comportamiento de una sección de la superestructura de vía.

Los parámetros analizados en el cajón de balasto son el asiento del balasto, y la evolución de la rigidez vertical (definida como la carga aplicada entre la deflexión del sistema) y la energía disipada durante un proceso de carga dinámica de compresión consistente en 200.000 ciclos a una frecuencia de 4 Hz, entre una carga mínima de 5 kN y 65 kN. El número de ciclos totales es fijado a partir de las recomendaciones de otros autores (Indraratna et al., 2006) que indican que dicha cifra es suficiente para obtener una respuesta estable del sistema, pudiendo así analizar el efecto de las distintas soluciones estudiadas.

Para este análisis se compara la respuesta del conjunto al incorporar distintas soluciones elásticas, según muestra la Figura 101:

- (i) Se compara el comportamiento del cajón de balasto al usar una placa de neumático (NFU) bajo carril, con la respuesta medida al usar una placa compuesta por material rígido (polietileno de alta densidad, HDPE) cuya rigidez es superior a 2.500 kN/mm. Ambas placas utilizadas en este estudio tienen la misma geometría. Se emplea como referencia una placa de material rígido dado que, a pesar de su desuso en vías modernas (la

tendencia actual es usar placas blandas), permite determinar de forma clara el efecto de las placas de neumáticos, objetivo de esta fase de estudio.

- (ii) Se evalúa la diferencia de la respuesta del conjunto al incorporar una suela de neumático bajo la traviesa de hormigón, en referencia al sistema sin aplicación de suela bajo traviesa. Para ambas configuraciones, se usa una placa de neumático para el asiento de carril.
- (iii) La influencia de las mantas de neumáticos se mide comparando la respuesta del sistema de balasto cuando este elemento es usado en el fondo del cajón, con el comportamiento del conjunto sin manta elástica. En ambos casos la traviesa se emplea sin suela elástica, y como placa de asiento se utiliza un elemento fabricado a partir de capas de neumáticos usados.

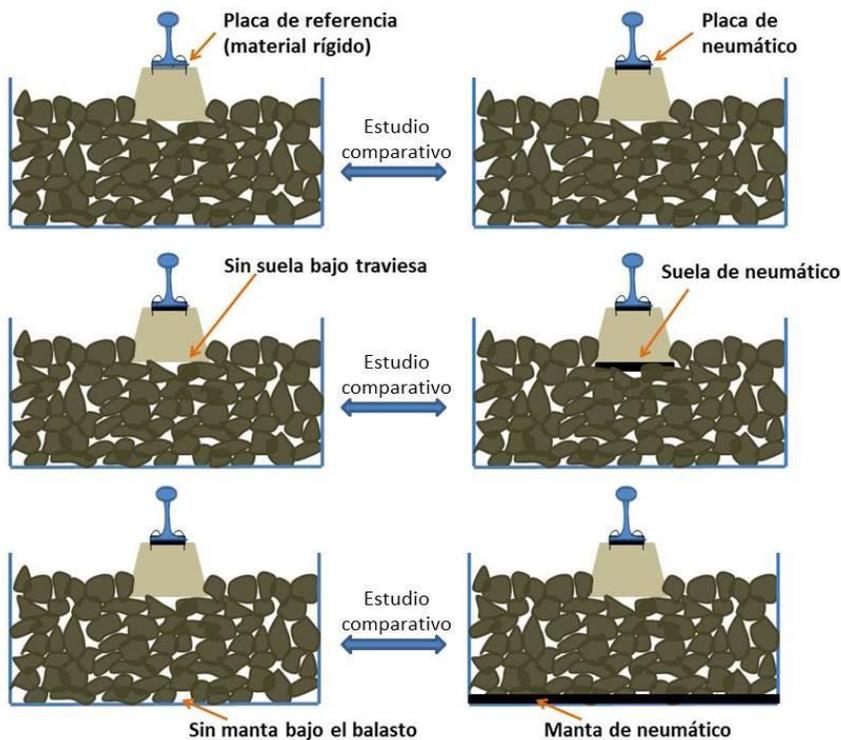


Figura 101: Esquema de las soluciones elásticas estudiadas en cajón de balasto.

Además del análisis sobre cajón de balasto, para el caso específico de las **placas de asiento** se evalúa su efecto en el cambio de la capacidad de la vía para atenuar impactos, dado que este elemento es el encargado de reducir las sobrecargas dinámicas que tienen como origen la existencia de irregularidades en el carril y/o ruedas de los vehículos. Así, para este estudio se dispone una

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

placa de neumático entre una sección de carril y una traviesa de hormigón apoyada sobre una bancada de caucho (Figura 102). Las cargas de impactos se reproducen mediante la caída de una maza de acuerdo con la norma UNE 13146-3, y los resultados son comparados con los obtenidos para una placa de referencia de alta rigidez (superior a 2500 kN/mm), pudiendo de esta forma analizar el efecto de usar placas de neumáticos. Este ensayo es explicado con mayor detalle en el Anexo I.



Figura 102: Diferentes perspectivas de la configuración del ensayo para evaluar la atenuación de impactos por parte de placas de asiento.

Por otra parte, en el caso de las **suelas de neumáticos** también es necesario evaluar su influencia (i) en la resistencia a esfuerzos transversales del conjunto traviesa-suela sobre la capa de balasto, mediante la aplicación de una carga inclinada 15° (según la Figura 103); (ii) y el efecto de suelas en el contacto traviesa-balasto, a partir de la medida del área de contacto entre ambos materiales (empleando partículas de balasto con pintura, Figura 103). En estos ensayos (descritos en el Anexo I de esta tesis doctoral) se utilizan muestras (bloques de hormigón que simulan las traviesas) con y sin suela elástica, analizando de esta forma la influencia de este material en la respuesta del conjunto sobre cajón de balasto.



Figura 103: Aspecto de los ensayos para evaluar la influencia de las suelas en la resistencia lateral (izquierda) y en el contacto traviesa-balasto (derecha).

El trabajo realizado en esta etapa de estudio para analizar el efecto de los elementos de neumáticos en la respuesta de la vía, queda recogido en la Tabla 17.

Tabla 17: Plan de trabajo desarrollado para evaluar la influencia de los componentes de neumáticos en la respuesta de la vía.

Elemento elástico	Parámetro de estudio	Muestras	Ensayos
Placas de asiento	Influencia en la respuesta del conjunto	Placa de neumático Placa de material rígido	-Dinámico sobre cajón de balasto
	Capacidad para atenuar impactos		-Atenuación de impactos
Suelas bajo traviesas	Influencia en la respuesta del conjunto	Media traviesa con y sin suela de neumático	-Dinámico sobre cajón de balasto
	Desplazamiento lateral	Bloque de hormigón (300 x 300 mm) con y sin suela de neumático	-Esfuerzo lateral, en régimen estático y dinámico
	Contacto traviesa-balasto		-Medida del área de contacto entre las suelas y el balasto
Mantas bajo balasto	Influencia en la respuesta del conjunto	Cajón de balasto con y sin manta de neumático	-Dinámico sobre cajón de balasto

4.2.5 Comprobación del cumplimiento de la normativa española (Etapa 5)

Una vez desarrollados los elementos de neumáticos y tras haber evaluado su aptitud resistente y su posible influencia en el comportamiento de la vía, el siguiente paso es analizar la posibilidad de homologación de acuerdo a la

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

normativa estandarizada en nuestro país, tanto para vías tipo convencionales como de alta velocidad. Este análisis se complementa con las fases de estudio anteriores (caracterización de la materia prima; definición de los componentes elásticos; evaluación de su capacidad resistente; y determinación de su influencia en el comportamiento del conjunto de la vía), dado que a partir de los resultados obtenidos en dichas etapas se comprueba la aptitud del material en referencia a las especificaciones de ADIF para el uso de estos materiales.

Se emplea la normativa de ADIF como referente dado que es el principal administrador ferroviario en España, además de que éste cuenta con extendida experiencia en proyectos de investigación y construcción de vías de ferrocarril tanto a nivel nacional como internacional, siendo así una referencia a nivel mundial para la construcción y mantenimiento de líneas ferroviarias convencionales y de alta velocidad.

Para el caso de las **placas de neumáticos**, se evalúa su aptitud de uso de acuerdo con las especificaciones E.T. 03.324.005.2 y E.T. 03.360.570.0, las cuales establecen las exigencias mínimas para el uso de placas elásticas en vías convencionales y en Alta Velocidad, respectivamente. Para el estudio de placas de neumáticos para vías convencionales, se analiza la deformación bajo carga de compresión entre 0,1 kN y 200 kN para placas con características geométricas acordes a las establecidas por la normativa E.T. 03.324.005.2.

Por otra parte, para el caso de placas para Alta Velocidad, se comparan los resultados obtenidos en etapas de estudio anteriores con las exigencias especificadas en la E.T. 03.360.570.0. Los parámetros analizados se corresponden con los valores de rigidez vertical estática (bajo diferentes niveles de carga, añadiendo el ensayo entre 5-80 kN según la UNE-EN 13146-9), rigidez dinámica, resistencia a la fatiga con traviesa inclinada, y capacidad para la atenuación de impactos.

En relación a las **suelas bajo traviesa**, se analizan los resultados (módulos de rigidez estática y dinámica, resistencia a la fatiga y al deterioro climático, y resistencia al arrancamiento) obtenidos en etapas de estudio anteriores, de acuerdo a las exigencias establecidas en la especificación técnica (E.T. 03.360.574.2) de ADIF para vías de Alta Velocidad. Se emplea la normativa para Alta Velocidad ya que es la disponible actualmente por dicho administrador ferroviario. Este hecho se debe principalmente a que las suelas son utilizadas fundamentalmente en Alta Velocidad, dado que el hándicap del precio de estos

componentes hace que su uso se limite a vías que requieren elevados niveles de calidad geométrica y reducidas tasas de deterioro. No obstante, con el desarrollo de suelas de neumáticos se pretende mitigar este inconveniente para el empleo de estos materiales en diversos tipos de vías.

Por parte de las **mantas bajo balasto**, como consecuencia de la actual ausencia de especificaciones técnicas por parte de ADIF para el caso concreto de estos elementos elásticos, se utiliza un pliego de prescripciones (basado en la DIN 45673-5) establecido por dicho administrador para la contratación del suministro de mantas anti-vibratorias destinadas a la construcción de líneas de alta velocidad. En referencia a las exigencias recogidas en dicho pliego de prescripciones, se comprueba la aptitud de las mantas de neumáticos a través de los resultados obtenidos en etapas de estudio anteriores.

4.2.6 Comparativa con elementos comerciales (Etapa 6)

En una sexta etapa de estudio, se lleva a cabo un análisis comparativo entre el comportamiento mecánico presentado por elementos de neumáticos y el registrado por elementos comerciales utilizados de forma habitual en vías de ferrocarril. Este estudio se realiza dada la necesidad de conocer la respuesta de los elementos desarrollados en referencia a los productos existentes en el ámbito del ferrocarril, ya que el objetivo es emplear los componentes de neumáticos como una alternativa económica y medioambientalmente más sostenible, que permita la generalización del uso de elementos elásticos para mejorar las prestaciones de la vía.

Este análisis se lleva a cabo para los tipos de elementos elásticos definidos como susceptibles de homologación para su uso en vías en referencia a las especificaciones de la normativa de ADIF. Para ello, se realizan los ensayos de caracterización de la rigidez estática (a distintos niveles de esfuerzo) y dinámica establecidos por las especificaciones de ADIF para el uso de elementos elásticos en vías ferroviarias. Además, se evalúa el comportamiento a largo plazo de los elementos de neumáticos y los elementos comerciales, así como su resistencia al deterioro climático.

4.2.7 Estudio en un tramo de prueba a escala real (Etapa 7)

Además del desarrollo de los elementos de neumáticos, y tras haber estudiado en laboratorio su aptitud mecánica y su efecto en la vía en relación a otras soluciones elásticas, se procede a analizar la respuesta de placas de neumáticos en un tramo de prueba real en una línea ferroviaria tipo convencional, ubicada en el País Vasco (España) y perteneciente al administrador ferroviario

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

EuskoTren. De esta forma, se puede estudiar el comportamiento a largo plazo de los elementos de neumáticos, así como el de la vía donde son empleados.

Para ello, en esta etapa de estudio se diseña un tramo de prueba, cuya longitud es de 600 m (en alineación recta), en el que se utilizan placas de neumáticos para el asiento de carril. Durante la definición de las características de los elementos a emplear, se tienen en cuenta las características de la vía y las recomendaciones de la UIC para evitar cambios de rigidez debidos al uso de componentes elásticos con diferentes propiedades.

Así, para el diseño de dicho tramo de prueba, en primer lugar se realiza la evaluación en laboratorio del comportamiento de placas de neumáticos elaboradas con similar geometría horizontal y espesor que las placas comerciales comúnmente empleadas por EuskoTren, las cuales se emplean en los tramos adyacentes. Este último tipo de placas están fabricadas a partir de material HDPE, con un espesor de 6,0 mm y unas dimensiones de 180 mm x 140 mm (aptas para carril tipo UIC 54).

Estas placas también son evaluadas mediante ensayos de laboratorio, con el objeto de definir las posibles diferencias de comportamiento entre ambos tipos de placas (comerciales y fabricadas a partir de bandas de neumáticos), y estudiar la posibilidad de realizar un tramo de transición entre las secciones con distintos tipos de placas. Para este tramo de transición se emplearían placas de neumáticos con algún tipo de tratamiento del material, definido en etapas de estudio precedentes como apropiado para la elaboración de placas con diferente comportamiento.

Los ensayos de laboratorio llevados a cabo para los distintos tipos de placas, consisten en la evaluación de la rigidez estática bajo diferentes niveles de esfuerzo (entre 20-95 kN y entre 100-200 kN) de acuerdo con la norma UNE-EN 13146-9, además de la determinación de su rigidez dinámica a una frecuencia de 4 Hz (entre 20-95 kN) según el anexo B de la UNE-EN 13481-2. Estos ensayos son desarrollados de acuerdo a la normativa europea, debido a la ausencia de especificaciones particulares por parte de EuskoTren para el uso de placas de asiento.

Análisis de Resultados

Analysis of Results

5. Análisis de resultados

Este quinto capítulo recoge los resultados obtenidos a lo largo de la presente tesis doctoral, siendo el análisis de dichos resultados realizado en consonancia con las diversas etapas de estudio descritas en el capítulo de metodología.

5.1 Caracterización de las capas que componen los neumáticos

A partir de las tres capas que componen los neumáticos fuera de uso, extraídas mediante el proceso de deconstrucción, se muestran los resultados de caracterización de estos materiales con el fin de determinar la materia prima a utilizar en la elaboración de elementos elásticos para su uso en vías de ferrocarril. La Tabla 18 recoge los resultados de las propiedades mecánicas de las distintas capas de los neumáticos usados, indicando los valores medios de dureza, densidad y resistencia a tracción y elongación, tanto en sentido transversal como longitudinal a la banda elástica.

Tabla 18: Resultados de la caracterización de las bandas que componen los neumáticos.

Propiedad	Capa exterior	Capa intermedia	Capa interior
Dureza Shore A, valor medio-ISO 868	60-75	70-85	40-60
Densidad media-ISO 1183 (g/cm³)	1,199	2,021	1,194
Resistencia a tracción longitudinal-ISO 37 (MPa)	24,7	80,3	5,8
Elongación mínima longitudinal-ISO 37 (%)	22,3	10,8	187,0
Resistencia a tracción transversal-ISO 37 (MPa)	9,5	16,2	53,5
Elongación mínima transversal-ISO 37 (%)	145,0	115,0	14,2

Al analizar los datos se puede comprobar que la capa intermedia registró los mayores valores de densidad, dureza y resistencia a tracción (salvo en sentido transversal), lo que indica mayores prestaciones mecánicas por parte de esta capa. Este hecho es debido a la presencia de un tejido metálico entre el caucho de la banda intermedia de los neumáticos.

Sin embargo, a pesar de las mayores prestaciones registradas para la capa intermedia, ésta es descartada para el diseño de componentes ferroviarios

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

elásticos debido a su contenido de fibras metálicas, evitando así posibles problemas de derivaciones y transmisiones eléctricas. De esta forma, para el desarrollo de los componentes elásticos se selecciona como materia prima la capa exterior de los neumáticos usados (banda de rodadura), dado que ésta presenta mejores prestaciones físicas y mecánicas que la capa interior. Además, esta capa tiene mayor contenido de caucho (material elastomérico), lo que la dota de mayores prestaciones elásticas, a la vez que presenta valores de espesor (entre 4,0 y 11,5 mm) más apropiados para la elaboración de elementos elásticos ferroviarios.



Figura 104: Capa de neumático seleccionada como materia prima para el desarrollo de elementos elásticos.

Una vez seleccionada la banda de rodadura como la capa a utilizar en el desarrollo de elementos elásticos para infraestructuras ferroviarias, se evaluó su comportamiento termoplástico, obteniendo valores de deformación remanente próximos a 20% para esfuerzos de tracción, y 30% para compresión, siendo estos valores adecuados para fabricar elementos elásticos (de acuerdo a la E.T. 03.324.005.2). Por otra parte, la resistencia eléctrica transversal presentada por placas elásticas fabricadas a partir de bandas de rodadura de neumáticos usados fue igual a $1,24 \times 10^{10}\Omega$ para la muestra sin sumergir, y $5,48 \times 10^6\Omega$ para la muestra sumergida en agua durante 48 h.

5.2 Definición de elementos elásticos a partir de capas de neumáticos

Una vez seleccionada la banda exterior de los neumáticos (capa de rodadura) como materia prima, se presentan las características geométricas que deben de tener los elementos elásticos para su uso en vías de ferrocarril, dado que éste será el punto de partida para el desarrollo de los elementos de neumáticos. Además, en esta etapa de trabajo se expone el proceso de elaboración de los componentes de neumáticos y sus variables de diseño, así como el análisis de la influencia de las mismas a partir del cual se proponen una serie de recomendaciones de uso.

5.2.1 Diseño de los elementos de neumáticos

La geometría horizontal de los elementos elásticos y sus dimensiones vienen definidas por las características de los componentes ferroviarios en los que se van a utilizar estos materiales elastoméricos. Así, en el caso de las **placas de asiento**, sus dimensiones y geometría específica deben estar en consonancia con las exigencias por parte del sistema de sujeción y el tipo de carril utilizado en la vía. Dado que los tipos de carril más utilizados en vías convencionales y de Alta Velocidad son los UIC 54 y UIC 60, las placas de asiento deben de tener unas dimensiones horizontales de 140 ± 1 mm y 180 ± 1 mm para el primer tipo de carril, o 148 ± 1 mm y 180 ± 1 mm para el caso de carriles tipo UIC 60 (valores recogidos en la E.T. 03.360.570.0 de ADIF).

En el caso de las bandas exteriores de neumáticos, sus dimensiones geométricas son próximas a 1.800 mm de largo y 180 mm de ancho. Estas medidas son aptas para la elaboración de diversas placas a partir de una misma capa, dado que sus dimensiones son superiores a las de dichos elementos elásticos. De esta forma, para la obtención de las placas de asiento, se recomienda un proceso de cortado del material para conseguir placas con geometría homogénea y acorde con las exigencias para su uso bajo carril tipo UIC 54 y UIC 60.

Para optimizar este proceso de elaboración, las placas son cortadas de forma correlativa de acuerdo a la Figura 105, con el fin de obtener el mayor número posible de elementos a partir de cada banda elástica, consiguiendo en general entre 8-10 placas de cada neumático en función de las características y dimensiones del mismo. A partir de esta cifra media de 9 placas de asiento por cada banda de neumático, se puede calcular que para un kilómetro de vía donde 3.334 placas son necesarias (con espaciado entre traviesas de 60 cm), se

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

emplearían aproximadamente 370 neumáticos, con lo que con esta aplicación se podría reducir de forma considerable la acumulación de este residuo con esta aplicación.

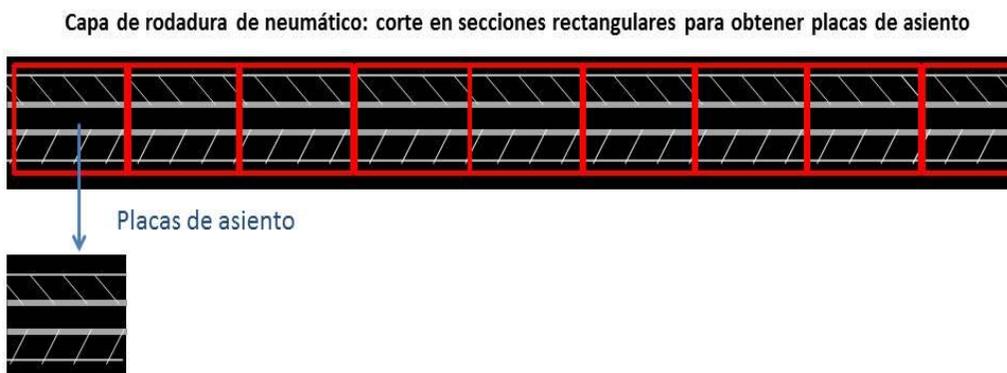


Figura 105: Esquema del proceso de obtención de placas elásticas a partir de la banda de rodadura de neumáticos usados.

Por parte del espesor de las placas, este parámetro se ve influenciado por el tipo de sujeción en el que van a ser utilizados, de forma que este último componente pueda ejercer una adecuada fuerza de apriete que mantenga la geometría de la vía. En general, el espesor de las placas empleadas en vías ferroviarias se encuentra en un rango próximo a 4,0 mm y 15,0 mm, siendo los valores más comunes: 4,5 mm; 5,0 mm; 5,5 mm; 6,5 mm; 7,0 mm; 8,0 mm; y 10,0 mm, de acuerdo a la bibliografía consultada (ADIF; UIC, 2001; Kaewunruen y Remennikov, 2005; Carrascal et al., 2007; Esveld, 2009).

Acorde con estas recomendaciones, el espesor de las placas de neumáticos analizadas en esta tesis se encuentra entre el rango 4,0 mm y 11,5 mm, dado que éstos son los espesores presentados por las capas de rodadura de los neumáticos usados, dependiendo de su nivel de desgaste. Además, en la preparación de estas placas para su estudio en laboratorio, se emplean unas dimensiones horizontales iguales a 140 ± 1 mm y 180 ± 1 mm, apropiadas para carril tipo UIC 54. La Figura 106 muestra el aspecto visual de algunas de las placas utilizadas en esta tesis doctoral.



Figura 106: Aspecto visual de placas de neumáticos con diferentes características.

Además, como se puede comprobar en la Figura 107, es posible elaborar placas de neumáticos con geometrías específicas y precisas para ser utilizadas para el asiento de carril en diferentes medios ferroviarios como pueden ser tranvía, metro ligero o el propio ferrocarril.



Figura 107: Placas de neumáticos con geometrías particulares.

En el caso de las **suelas bajo traviesa**, éstas deben de tener unas dimensiones horizontales acordes con las presentadas por las traviesas a las que van a ser adheridas en su parte inferior. Así, el ancho de suela puede oscilar de forma considerable, situándose en términos generales, entre 18-28 cm para su uso

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

bajo traviesas con un ancho comprendido entre los 20 cm y los 30 cm, respectivamente, siendo estos valores habituales para traviesas de hormigón (Witt, 2008; UIC, 2013).

La diferencia de ancho entre la suela y la traviesa queda establecida en 1 cm a cada lado (Figura 108), de acuerdo con las recomendaciones de ADIF (E.T. 03.360.574.2) y UIC (2013). El objetivo es garantizar que la suela elástica queda embebida en la traviesa de hormigón, evitando sobre anchos que provoquen la pérdida de contacto entre ambos materiales.

En cuanto a su longitud, suele ser habitual el empleo de suelas con 100 cm, las cuales se disponen en la parte inferior de las traviesas bajo la zona de apoyo del carril, dado que éstas es la zona efectiva de transmisión de la carga a la capa de balasto.

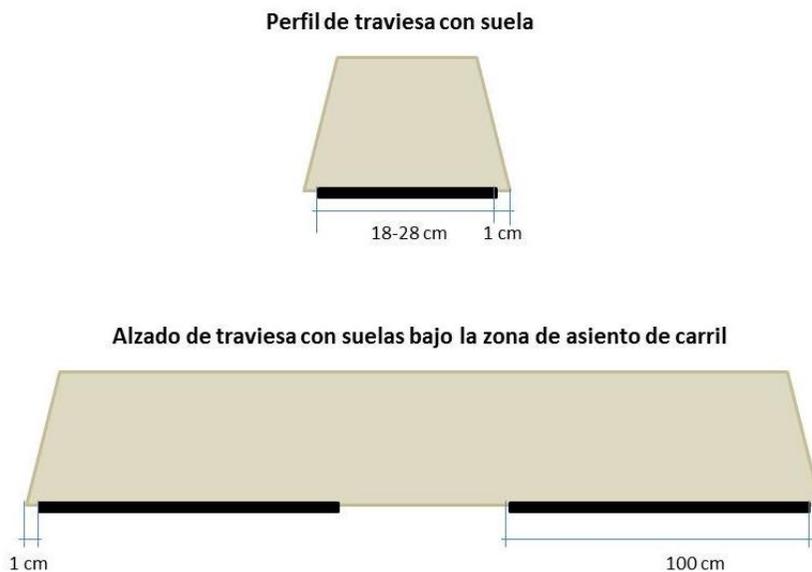


Figura 108: Esquema del diseño habitual para suelas elásticas bajo traviesa.

En relación a las dimensiones horizontales de las suelas de neumáticos, dado que la capa de rodadura de los residuos tiene un ancho máximo de 18 cm, mientras que el ancho de las suelas puede llegar hasta 28 cm (para traviesas con ancho de 30 cm), se debe de desarrollar un proceso de unión de capas de neumáticos para obtener materiales con mayor anchura, a partir de los cuales se elaboran las suelas bajo traviesa.

Si se considera un ancho habitual para suelas de 27 cm (Müller-Boruttau y Kleinert, 2001) y una longitud de 1 m, lo óptimo es unir 6 capas de neumáticos para poder obtener cuatro elementos elásticos en sentido longitudinal y dos en sentido transversal, reduciendo de esta forma la cantidad de material sobrante cuando se realiza un proceso de corte de las suelas con geometría apropiada para su adhesión a las traviesas. Esta técnica de diseño óptimo permite reducir los costes de producción asociados a la cantidad de material consumido, aprovechando que las juntas no suponen un problema para estos elementos.

Con el objeto de facilitar la comprensión del proceso de obtención de suelas a partir de bandas de neumáticos, la Figura 109 representa un esquema de la unión de capas para la obtención de suelas mediante un proceso de corte del material.

Unión de 6 capas de neumáticos, para posterior obtener hasta 6 suelas mediante un proceso de corte

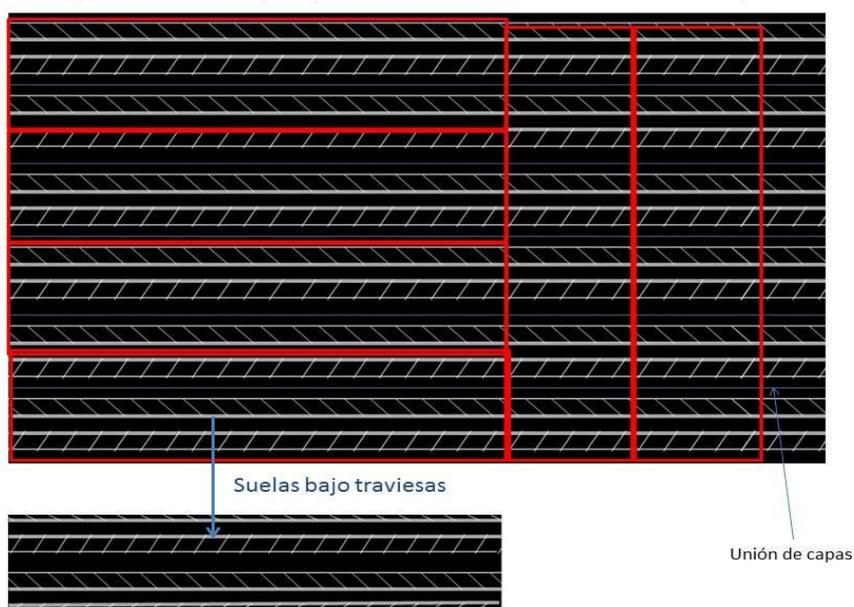


Figura 109: Esquema del proceso de obtención de suelas bajo traviesa a partir de bandas de neumáticos usados.

De esta forma, se puede ver que para la preparación de seis suelas de neumático se consumen casi seis bandas de neumáticos en su totalidad. A partir de estas consideraciones, se puede calcular el consumo de material necesario en un kilómetro de vía, tal y como se hizo para el caso de las placas de asiento. En este caso de las suelas, se comprueba que para disponer dos elementos de neumáticos en la cara inferior de la traviesa (una suela en cada extremo de la

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

traviesa) se necesitan casi dos capas de neumáticos usados, por lo que en un kilómetro de vía, donde el número de traviesas es próximo a 1.667, se consumirían cerca de 3.350 capas de neumáticos usados.

El espesor de suelas usadas en vías, este parámetro variará dependiendo de las exigencias mecánicas para estos materiales por parte de las características de la vía. Así, su espesor habitual se encuentra en un rango entre 5,0 mm y 20,0 mm (Getzner; CDM; Darlhberg, 2010), aunque se pueden encontrar experiencias en vías en las que se han empleado espesores de sólo 2-3 mm (UIC Project Under Sleeper Pads, 2009). Además, en referencia a las especificaciones de ADIF (E.T. 03.360.574.2) y las recomendaciones de la UIC (2013), el espesor máximo podría quedar limitado a 15,0 mm.

A partir de estas consideraciones, para el desarrollo de suelas a partir de neumáticos fuera de uso, el rango de espesor definido se situó entre 5,0 mm y 11,0 mm, dado que son los valores habituales para las capas de rodadura de los neumáticos usados. Además, estos espesores se encuentran dentro de los valores permitidos por las especificaciones de ADIF, las cuales también indican que el elemento elástico debe sobresalir entre 3-8 mm en relación a la base de la traviesa. Así, con el establecimiento de dichos espesores para las suelas de neumáticos, sería posible embeber éstas un mínimo de 2-3 mm en la cara inferior de la traviesa, mejorando así la unión de ambos materiales.

Para los ensayos de laboratorio, las muestras de suelas de neumáticos son embebidas en bloques de hormigón con dimensiones de horizontales de 300 mm x 300 mm, y 200 mm de alto, dado que estas probetas son las especificadas por la E.T. 03.360.574.2 de ADIF y la DIN 45673-6 para ensayos de laboratorio. Las muestras elásticas fueron obtenidas a partir de la unión de capas de neumáticos, para posteriormente cortar el material con la forma cuadrada indicada (300 mm x 300 mm).

La Figura 110 recoge el aspecto visual de algunas muestras del conjunto cubo de hormigón-suela de neumático, así como un bloque sin elemento elástico. No obstante, para el estudio de su influencia en un cajón de balasto, una suela de neumático (de 1 m de longitud y 18 cm de ancho) fue adherida a media traviesa de hormigón (Figura 111), con el fin de obtener una simulación de la vía ferroviaria más realista.

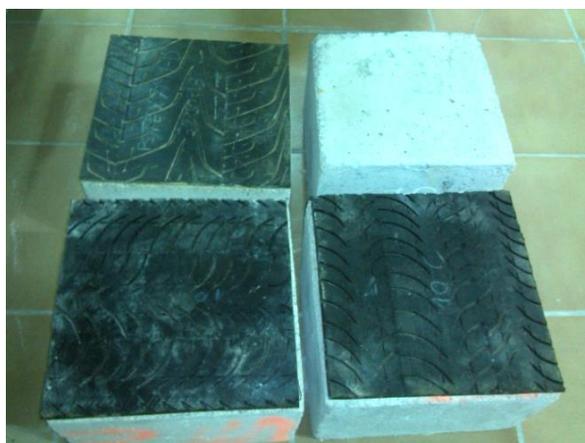


Figura 110: Aspecto visual de probetas de ensayo para evaluar el comportamiento de suelas elásticas.



Figura 111: Media traviesa con suela de neumático adherida en la cara inferior.

Además, para el proceso de embeber las suelas en los cubos de hormigón, se puede aprovechar el tejido textil que incorporan en su interior las bandas de rodadura de los neumáticos, extrayéndolo mediante un proceso de rascado hacia la parte exterior de la cara interna de las capas elásticas procedentes de los neumáticos (Figura 112). Así, este tejido textil puede ser utilizado como medio de unión entre el elemento elástico y el hormigón de las probetas, en el que queda embebido dicho textil.

De esta forma, se pretende aumentar la resistencia al arrancamiento entre la unión suela-traviesa, sin necesidad de utilizar ninguna resina o pegamento que incremente su coste. La suela se puede incorporar directamente al proceso de fabricación de la traviesa directamente. No obstante, debido a la existencia de distintos tipos de textil en las capas de rodadura de los neumáticos, para definir la solución óptima de la unión, se analizan 3 tipos de muestras de ensayo con distintos tipos y dimensiones del textil empleado para la unión suela-hormigón.



Figura 112: Tejido textil extraído en la cara interna de la banda de rodadura.

Finalmente, para el desarrollo de las **mantas bajo balasto**, dado que sus dimensiones horizontales dependen de las técnicas de extendido del material elástico bajo la capa de balasto de la vía, estos valores pueden ser muy variables. Además, sus dimensiones dependerán del ancho de la vía donde se van a ser utilizadas. No obstante, para todos los casos es necesario llevar a cabo un proceso de unión de diversas bandas de rodadura, con lo que se consiguen componentes elásticos de amplias medidas. De esta forma, se consume una media de 9-10 capas de neumáticos (de 1,8 m de largo y 0,18 m de ancho) para conseguir un metro longitudinal de vía con ancho bajo balasto próximo superior a 2,5 m. Así, para un kilómetro de vía con manta de neumático, se consumirían cerca de 10.000 capas de neumáticos.

En referencia a su espesor, dado que las capas de neumáticos tienen un valor máximo próximo a 11,0-11,5 mm, también es necesario llevar a cabo un proceso de unión para superponer capas de neumáticos unas encima de otras, y conseguir materiales con mayores valores de espesor, puesto que estos componentes suelen tener un rango de valores cercano a 10-35 mm, pudiendo llegar hasta un máximo de 50 mm.

Así, en este estudio se emplea una horquilla de espesores para mantas que comprende desde 11,0 mm (una sola capa de neumático) hasta 44,0 mm (4 capas de neumáticos superpuestas). El límite superior es establecido en relación a las recomendaciones de la UIC (2011) y por un pliego de ADIF para el uso de estos materiales. A partir de las mantas de neumáticos con distintos

espesores entre el rango 11,0-44,0 mm, se preparan muestras de ensayo con dimensiones horizontales de 300 x 300 mm dado que es lo indicado en las normativas DBS 918 071-01 y la DIN 45673-5 para ensayos de laboratorio.

Estas muestras de ensayo son elaboradas a partir del corte de mantas obtenidas tras unir distintas capas de neumáticos que permiten conseguir una amplia superficie elástica para su uso bajo el balasto. La Figura 113 recoge un ejemplo de algunas muestras de mantas de neumáticos usadas para el desarrollo de mantas elásticas.



Figura 113: Muestras de mantas elásticas (2 muestras de 300x300 mm, y una de 900x900 mm) para su ensayo en laboratorio.

Además de las muestras de 300 mm x 300 mm, se emplea una manta de 900 mm x 900 mm para ser utilizada en el fondo de un cajón de balasto, analizando de esta forma la influencia de este elemento elástico en la respuesta del conjunto de vía. La Figura 114 muestra la manta de neumático en el fondo del cajón de balasto utilizado para la realización de los ensayos.



Figura 114: Cajón de balasto con manta de neumático en el fondo.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

A partir del análisis de las dimensiones para el desarrollo de los distintos elementos de neumáticos, en la Tabla 19 se muestra un resumen de los valores comúnmente adoptados en vías para estos componentes elásticos, así como las características geométricas de las muestras preparadas para su evaluación en laboratorio.

Tabla 19: Resumen de las propiedades geométricas exigidas a los elementos elásticos, y de las propiedades de las muestras para ensayos de laboratorio.

Tipo de muestra	Propiedad	Placas de asiento	Suelas bajo traviesa	Manta bajo balasto
Elementos para su uso en vías. <i>Dimensiones habituales</i>	<i>Longitud (mm)</i>	180 ± 1	1.000	-
	<i>Ancho (mm)</i>	140 ± 1 (carril UIC 54) 148 ± 1 (carril UIC 60)	180-280	>2.500
	<i>Espesor (mm)</i>	4,0-15,0	6,0-20,0	<50
Elementos para su ensayo en laboratorio	<i>Longitud (mm)</i>	180 ± 1	300	300
	<i>Ancho (mm)</i>	140 ± 1 (carril UIC 54)	300	300
	<i>Espesor (mm)</i>	4,0-11,5	5,0-11,0	11,0-44,0

En base a la Tabla 19, se comprueba que el espesor de los elementos elásticos utilizados de forma habitual en vías, se sitúa en un amplio rango de valores para los distintos casos (placas de asiento, suelas bajo traviesa y mantas bajo balasto). De igual modo, al emplear capas de rodadura de neumáticos como materia prima para la elaboración de elementos elásticos, también es posible obtener diversos valores de espesor, consiguiendo de esta forma una amplia gama de soluciones elásticas que presentan propiedades distintas. Así, este parámetro puede ser definido como un apropiado factor de diseño para el desarrollo de los componentes de neumáticos.

5.2.2 Determinación de las características óptimas de diseño para los elementos de neumáticos

A partir del estudio anterior de definición de las características de diseño y parámetros de estudio, se ha podido identificar el espesor de las bandas elásticas como un factor fundamental para el desarrollo de los elementos de neumáticos. Así, en esta sección, se presentan los resultados de la influencia de distintos parámetros de diseño para placas de asiento, suelas bajo traviesa y

mantas bajo balasto, teniendo como punto de partida en todos los casos el análisis del efecto del espesor.

5.2.2.1 Placas de asiento

Así, una vez definidas las propiedades básicas de las placas de neumáticos, y tras la preparación de muestras para su estudio en laboratorio, se muestran los resultados de la influencia del espesor (seleccionado como principal factor de diseño) en la respuesta de estos materiales. A partir de este análisis inicial, se recoge posteriormente el efecto de otros parámetros seleccionados como factores de diseño en función de los resultados obtenidos en la evaluación del efecto del espesor.

Determinación de espesor

La Figura 115 muestra los resultados de rigidez estática entre 20-95 kN para placas con espesor entre 4,0 y 11,5 mm, así como el valor de energía disipada por estos elementos. Los resultados indican que al disminuir el espesor de la placa aumenta su rigidez vertical, ajustándose los valores a una ley potencial (con $R^2=0,8308$) que muestra que el espesor del elemento elástico puede tener una notable influencia en su comportamiento ante cargas de compresión como las provocadas por el paso de trenes.

De esta forma, se obtiene una amplia gama de valores de rigidez, lo que lleva a poder seleccionar el espesor de placa de neumático dependiendo del diseño y exigencias de la infraestructura ferroviaria. Atendiendo a estos resultados, para vías de alta velocidad, donde se requieren elementos blandos, podría ser adecuado el uso de placas de neumáticos con espesor superior a 7,0-7,5 mm (rigidez inferior a 125 kN/mm según la E.T. 03.360.570.0 de ADIF), mientras que placas con menor espesor podrían ser usadas en vías convencionales o en aquellas que requieran placas con mayor rigidez (Szurgott et al., 2012).

En referencia a los valores de la inversa de la energía disipada, se aprecia que éstos también se ajustan a una ley potencial ($R^2=0,7193$), pudiendo observarse una buena relación entre este parámetro y los valores de rigidez, lo que indica que al reducir el espesor de placa disminuye la rigidez del elemento y aumenta su capacidad para disipar energía. A partir de estos resultados, se pone de manifiesto que la rigidez de las placas puede ser un parámetro efectivo para predecir la respuesta de éstas ante las cargas de los vehículos, dada su relación con la energía disipada (inversa), la cual permite un conocimiento detallado del comportamiento mecánico de materiales.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

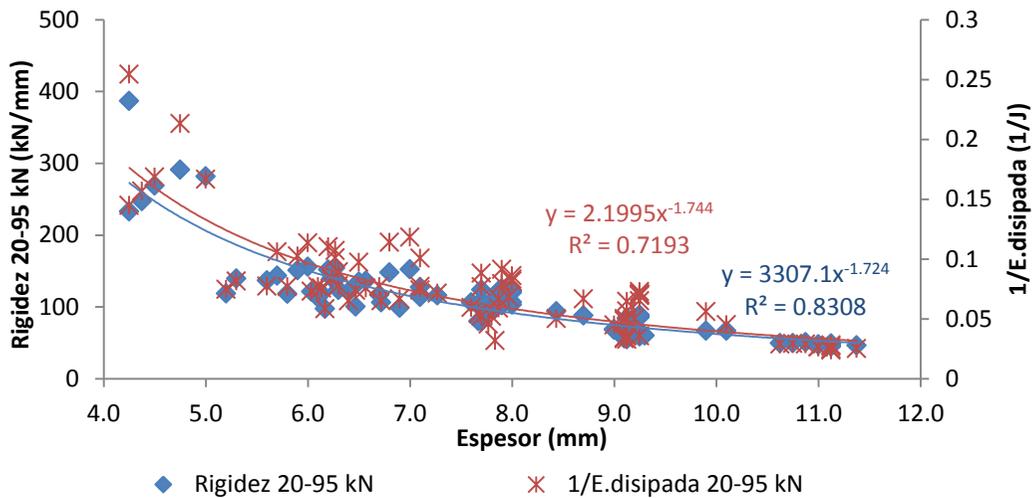


Figura 115: Resultados de rigidez vertical y energía disipada (inversa) registrados en el ensayo estático 20-95 kN para placas de neumáticos con diversos espesores.

Para profundizar en el estudio del comportamiento de placas con distinto espesor, la Figura 116 recoge las curvas de desplazamiento medidas en el último ciclo de carga del ensayo de rigidez 20-95 kN, para placas con espesores igual a 4,5 mm, 6,0 mm, 7,5 mm, 9,0 mm y 11,0 mm (establecidos como representativos de la totalidad de espesores estudiados).

Se puede comprobar que al aumentar el espesor de placa incrementa el valor de desplazamiento vertical máximo, lo que podría llevar a mayor amortiguación de cargas procedentes del paso de vehículos. Sin embargo, también se debe tener presente que valores elevados de desplazamiento vertical, como los registrados para la placa con 11,0 mm de espesor, pueden dar lugar a importantes deflexiones de la vía, incrementándose así la resistencia al avance de los vehículos (y por tanto, el consumo de energía) (Sauvage y Fortin, 1982; Teixeira, 2003), a la vez que se puede acelerar la fatiga de materiales de la superestructura, lo que llevaría a mayores costes de explotación y conservación de la vía. De esta forma, para el uso de placas de neumáticos en vías ferroviarias, su espesor máximo podría quedar limitado a valores iguales o inferiores a 9,0 mm.

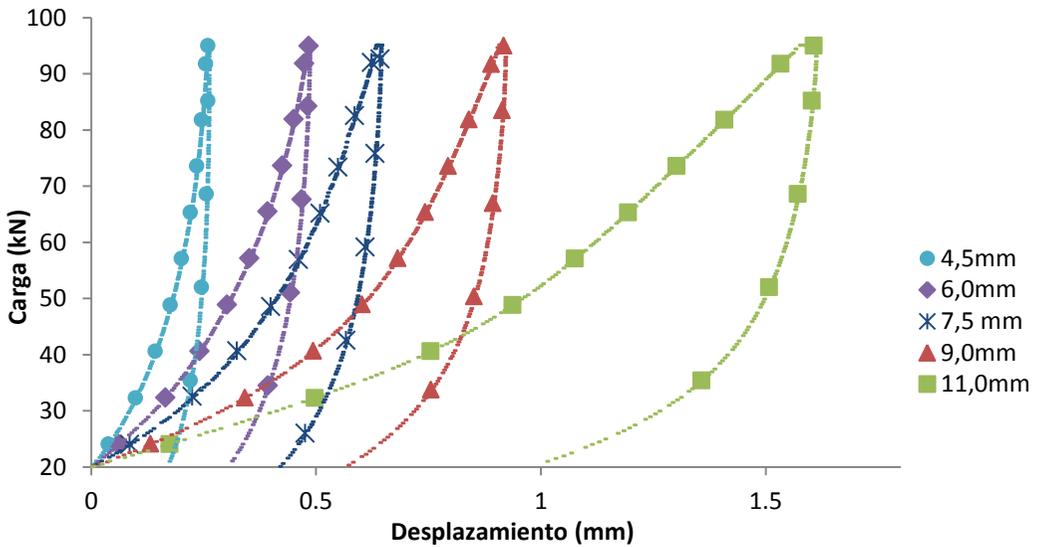


Figura 116: Curvas carga/desplazamiento vertical registradas en el ensayo estático 20-95 kN para placas con distintos espesores.

Para comprender el comportamiento elástico de las placas de neumáticos en el ensayo estático entre 20-95 kN, la Figura 117 muestra la evolución del desplazamiento vertical respecto al tiempo de aplicación del último ciclo de carga. Se puede observar que las distintas placas estudiadas presentaron un comportamiento no lineal, propio en los materiales con caucho (Van Krevelen, 1990), siendo este hecho acentuado al incrementar el espesor.

Así, se pueden distinguir 3 etapas en el comportamiento de las placas: una fase inicial de rigidización del material ante niveles bajos de carga, registrando mayores deformaciones verticales; una segunda etapa en la que las placas presentan un comportamiento más lineal, pero con menores deformaciones; y una tercera etapa de recuperación elástica asociada a la cesión de la carga aplicada (siendo esta tercera etapa de menor duración debido a la mayor velocidad de descarga en comparación con la etapa de carga).

Al finalizar la recuperación elástica, en relación a la deformación permanente, se puede ver que este parámetro no sigue una tendencia clara en relación al espesor de la placa. Este hecho puede deberse al empleo de distintos neumáticos (con diferentes propiedades elásticas) para la fabricación de las placas de asiento. No obstante, se puede observar una tendencia a aumentar la recuperación elástica de estos elementos al incrementar su espesor, estando esto relacionado con los mayores valores de deformación máxima registrados para estos casos.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

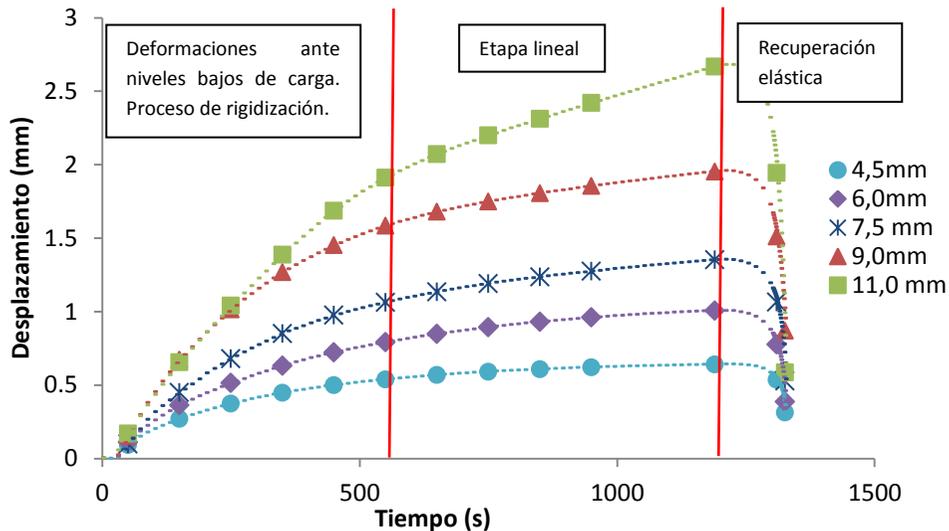


Figura 117: Curva desplazamiento/tiempo para placas de neumáticos con diversos valores de espesor.

Por otra parte, además del ensayo estático entre 20-95 kN, se evalúa la respuesta estática de las placas con distinto espesor para niveles de carga entre 100-200 kN, los cuales representan las acciones que tienen lugar como consecuencia de la presencia de irregularidades en el contacto rueda-carril. Así, la Figura 118 muestra los resultados de rigidez entre 100-200 kN y la inversa de la energía disipada por las placas durante el último ciclo de carga para este ensayo.

De nuevo se comprueba una buena relación entre la tendencia (ley potencial) de la rigidez y la inversa de la energía disipada en función del espesor de placa, obteniendo así placas con mayor flexibilidad y capacidad para disipar energía al aumentar su espesor. No obstante, en comparación con las tendencias registradas para el ensayo 20-95 kN, en el ensayo entre 100-200 kN se obtienen menores valores del coeficiente de determinación (R^2), lo que muestra que al incrementar el nivel de carga aumenta la variabilidad del comportamiento de placas con el mismo espesor, siendo este hecho más acentuado (coeficientes de variación superiores a 34%) para placas de neumáticos con mayor desgaste (menor espesor).

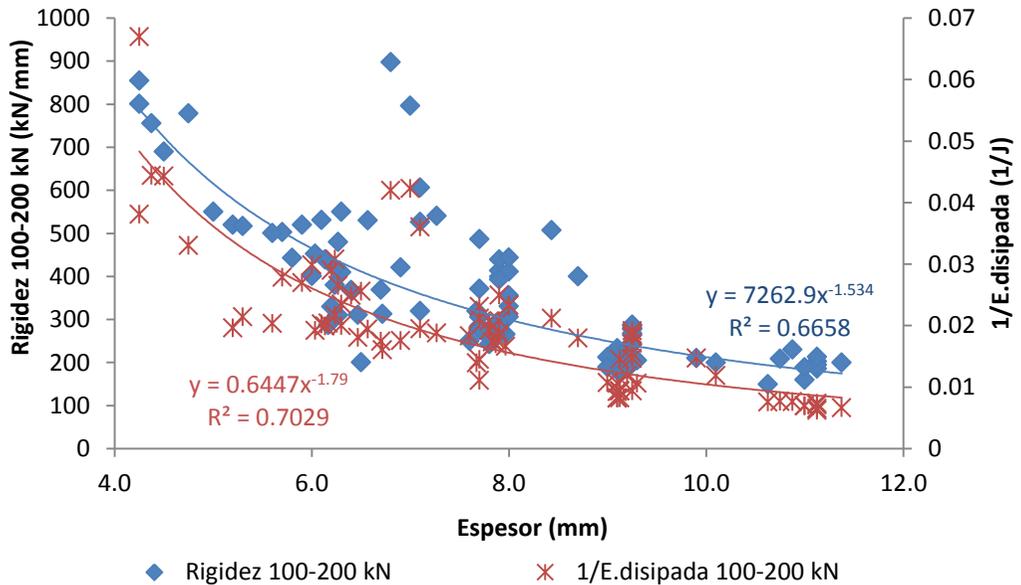


Figura 118: Resultados del ensayo estático 100-200 kN registrados para placas de asiento con diferentes espesores.

En referencia a la respuesta dinámica de las placas, la Figura 119 muestra que su rigidez dinámica a 4 Hz se ajusta a una ley potencial ($R^2=0,8163$) en relación al espesor de estos componentes, mostrando mayor influencia de este parámetro en la respuesta de placas con grosor inferior a 6,0 mm. Además, en el comportamiento dinámico también se comprueba que el valor de rigidez es un parámetro adecuado para caracterizar la respuesta mecánica de estos materiales, dado que se obtiene una buena relación entre esta magnitud y la energía disipada (inversa).

En el caso concreto de placas con espesor comprendido entre 7,5 mm y 9,0 mm, las cuales se ha visto en el análisis estático que son susceptibles de ser utilizadas como elementos blandos en Alta Velocidad, se obtienen ratios de rigidización dinámica (calculada como rigidez dinámica/rigidez estática) próximos a 3,5, lo cual, en consonancia con otros autores (Bouvet y Vincent, 1998), es apropiado para el uso de estos materiales como placas blandas. Así, se confirma que el rango 7,5-9,0 mm es el más apropiado para el uso de placas de neumáticos en Alta Velocidad.

En el caso de placas de neumáticos con distintos valores de espesor al rango definido como susceptible para el uso de placas en Alta Velocidad, al comparar los resultados con los obtenidos en otros estudios sobre placas utilizadas en el

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

ámbito del ferrocarril, se comprueba que placas con espesor próximo a 5,5 presentan valores de rigidez dinámica (próximos a 750 kN/mm) muy similares a los registrados (rango entre 700-900 kN/mm) por placas comerciales con similar espesor y fabricadas con material HDPE (Kaewunruen y Remennikov, 2008c).

Además, estas placas de neumáticos muestran valores de rigidez dinámica menores que los presentados por placas con distinto espesor fabricadas a partir de caucho y poliuretano (muy usadas en líneas Holandesas), mostrando así mayor capacidad para amortiguar las cargas (Esveld, 2009). Sin embargo, la rigidez dinámica de placas de neumáticos con 10 mm de espesor es algo superior a la mostrada por placas convencionales de caucho (65 kN/mm), indicando una rigidización del material algo superior a las placas estandarizadas de caucho.

No obstante, estos valores de rigidez dinámica pueden variar, dado que se puede observar que para un mismo espesor de placa se registraron distintos valores de rigidez dinámica, siendo este hecho acentuado al reducir su espesor, donde se obtuvieron coeficientes de variación superiores a 29%. Esto puede estar asociado al empleo de bandas elásticas procedentes de distintos neumáticos con diferente nivel de desgaste, mostrando que las capas menos gastadas (mayor espesor) dan lugar a una mejor correlación entre el espesor del elemento y su comportamiento esperado.

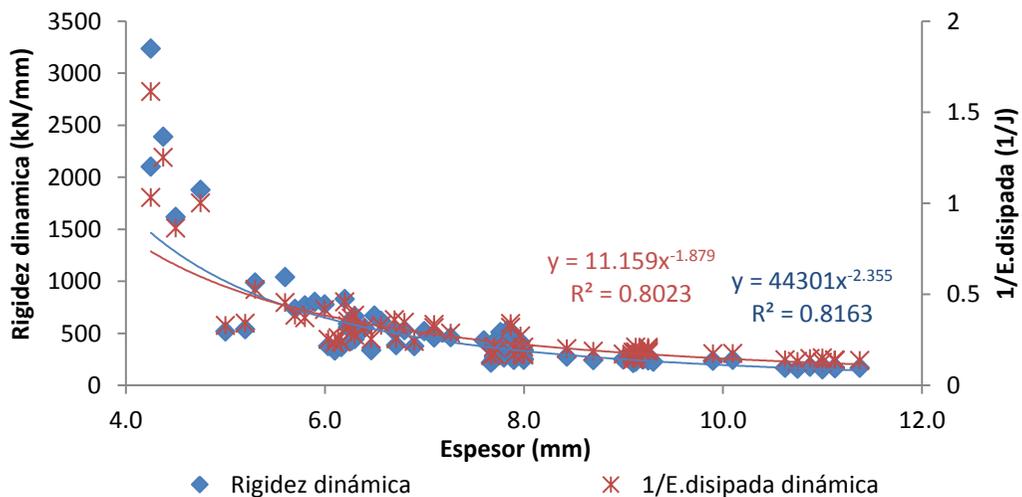


Figura 119: Resultados de rigidez dinámica y energía disipada (inversa) en el ensayo dinámico para placas de asiento con diferentes valores de espesor

Para profundizar en el análisis de la respuesta dinámica, la Figura 120 muestra las curvas de desplazamiento vertical registradas en el último ciclo de carga para placas con 4,5 mm, 6,0 mm, 7,5 mm, 9,0 mm y 11,0 mm. Los resultados indican que el incremento del espesor del elemento lleva a menor linealidad de la curva carga-desplazamiento, a la vez que se reduce su comportamiento elástico dado que aumenta la separación entre la curva de carga y la de descarga, lo cual puede estar asociado con los mayores valores de desplazamiento máximo registrados.

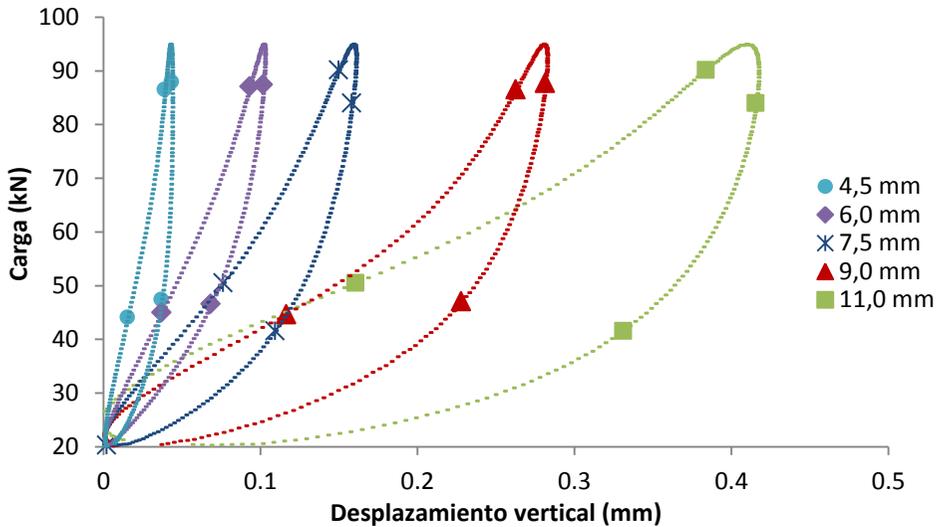


Figura 120: Curvas carga-desplazamiento vertical medidas en el ensayo dinámico para placas con distintos espesores.

Además, para evaluar la evolución de las propiedades de las placas durante el ensayo dinámico, la Figura 121 muestra que durante los primeros ciclos de carga se produce el descenso de los valores de energía disipada, debido a la rigidización del material, siendo este hecho acentuado al incrementar el espesor de placa. Sin embargo, a partir de 500-600 ciclos el comportamiento de estos materiales se estabiliza, obteniendo mayores valores de energía disipada para placas con mayor espesor, las cuales permitirían amortiguar las cargas transmitidas a los componentes inferiores de la vía ferroviaria.

No obstante, al igual que ocurría en el estudio estático, se debe tener presente que valores elevados de energía disipada podrían llevar a mayor resistencia al avance de los vehículos y menor vida útil de otros componentes como carril o sistema de sujeción (Sauvage y Fortin, 1982; Teixeira, 2003), por lo que el uso de las placas de 11,0 mm podría quedar limitado.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

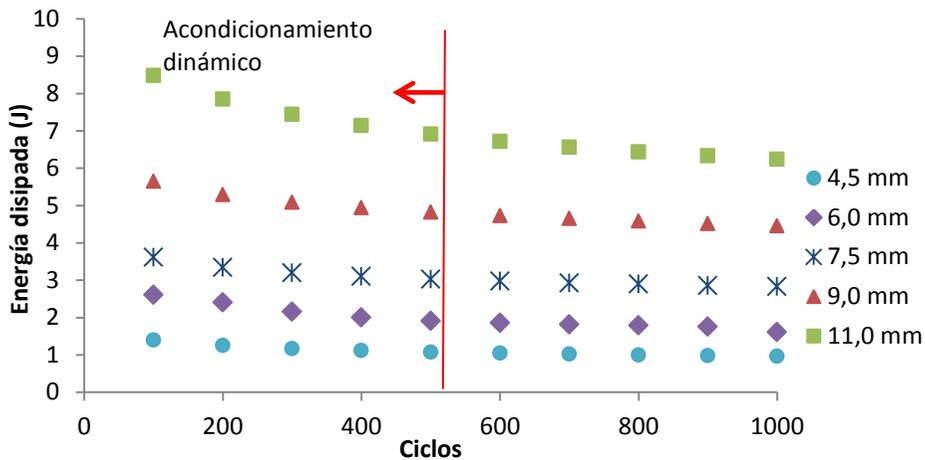


Figura 121: Evolución de la energía disipada por ciclo durante los ensayos dinámicos para placas con distintos espesores.

A partir del análisis de la influencia del espesor de las placas de neumáticos en su respuesta estática y dinámica, se han podido definir como valores óptimos de diseño de placas para Alta Velocidad los correspondientes al rango 7,5 mm y 9,0 mm, dado que permiten obtener placas de asiento blandas, a la vez que se evitan problemas derivados de un exceso en la deflexión de la vía ante el paso de los trenes.

Por parte de placas con distintos valores de espesor, éstas podrían ser apropiadas para vías convencionales con diferentes exigencias para estos materiales, dado que se ha comprobado que presentan un comportamiento comparable al de placas estudiadas en otros trabajos de investigación.

Sin embargo, también se ha podido ver que estos resultados pueden variar dentro de un mismo valor de espesor (registrando coeficientes de variación superiores a 34%), lo que podría estar relacionado con el uso de distintos neumáticos en la elaboración de las placas. De esta forma, se hace necesario analizar como otro parámetro de diseño para el desarrollo de placas, la influencia que el tipo de neumático utilizado puede tener en la variabilidad del comportamiento de las placas.

Determinación del tipo de neumático (repetibilidad de resultados)

En esta parte de la fase de desarrollo de las placas de asiento, se muestra el efecto de los neumáticos en la variabilidad de resultados, seleccionando para ello elementos con espesor entre 7,5 mm y 9,0 mm ya que se ha visto que éstos

son los valores más apropiados para su uso en vías de alta velocidad, las cuales requieren mayor calidad geométrica y mayor homogeneidad de comportamiento del conjunto.

Dado que de cada banda de rodadura se obtienen entre 8 y 10 placas, en primer lugar se presenta la repetibilidad de resultados para cada neumático usado en esta fase de estudio, los cuales son denominados como NFU 1, 2, 3 (para el caso de placas con 7,5 mm) y 4, 5, 6 (para placas con 9,0 mm), de acuerdo a la Figura 122 (esquema de la izquierda).

Posterior a este estudio, se indica la variabilidad de resultados al utilizar distintos ejemplares de neumáticos, pero dentro de un mismo tipo y modelo (en este caso NFU 1). Para este análisis se emplean placas procedentes de 3 neumáticos que son nombrados como NFU 1-1, 1-2 y 1-3, según muestra la imagen de la derecha de la Figura 122.

Además, en un tercer análisis se recogen los resultados medios registrados para cada tipo de neumático (NFU 1, 2, 3, 4, 5 y 6) y se comparan con los obtenidos para el resto de tipos de material, analizando de esta forma la influencia de utilizar distintos tipos y modelos de neumáticos. Además, se evalúa la repetibilidad de comportamiento en función del espesor de placa, dado que este estudio se desarrolla para 3 neumáticos diferentes con grosor igual a 7,5 mm y otros 3 para un espesor próximo a 9,0 mm.

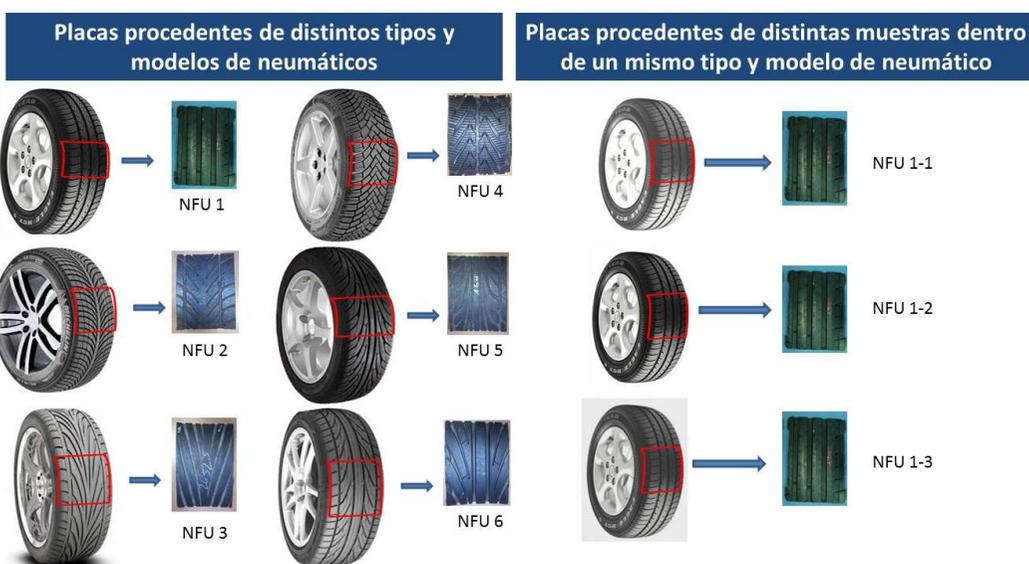


Figura 122: Esquema de los distintos neumáticos empleados para evaluar la influencia del tipo de neumático en la repetibilidad de resultados.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

En primer lugar, para estudiar la influencia de emplear placas procedentes de un único neumático, la Tabla 20 presenta los valores medios y el coeficiente de variación de la rigidez, energía disipada y deformación remanente, registrados en los ensayos estáticos (entre 20 y 95 kN y entre 100-200 kN) y dinámico a 4 Hz, para placas fabricadas a partir de un único neumáticos fuera de uso (NFU), desarrollando este estudio de forma individual para cada tipo de material (NFU 1, 2, 3, 4, 5 y 6).

Tabla 20: Resultados para placas procedentes de un mismo neumático. Estudio realizado para distintos tipos de neumáticos.

Tipo neumático	Ensayo	Rigidez (kN/mm)		E. disipada (J)		Deformación remanente (%)	
		Media	C. V. (%)	Media	C. V. (%)	Media	C. V. (%)
NFU 1	20-95 kN	107,56	9,06	19,41	8,18	6,90	7,93
	100-200 kN	268,38	6,08	15,57	5,56	4,28	1,95
	Dinámico	468,83	9,67	3,27	11,59	-	-
NFU 2	20-95 kN	104,44	2,97	12,48	3,53	4,05	3,83
	100-200 kN	292,40	8,96	8,21	11,69	2,51	3,92
	Dinámico	258,08	4,93	5,92	2,08	-	-
NFU 3	20-95 kN	121,77	2,12	11,30	2,94	3,61	3,25
	100-200 kN	400,36	9,16	5,86	6,32	1,98	8,86
	Dinámico	330,96	2,05	4,79	1,99	-	-
NFU 4	20-95 kN	79,12	1,90	20,96	6,09	7,02	4,33
	100-200 kN	209,23	10,17	18,94	7,61	4,07	5,26
	Dinámico	248,12	3,06	5,91	4,32	-	-
NFU 5	20-95 kN	59,33	4,96	25,76	9,17	8,33	2,01
	100-200 kN	192,33	10,09	25,52	7,18	5,36	4,44
	Dinámico	251,89	10,62	6,00	10,45	-	-
NFU 6	20-95 kN	86,75	1,75	14,53	4,57	5,28	4,03
	100-200 kN	269,62	7,96	13,90	10,47	3,09	7,29
	Dinámico	259,17	5,68	5,12	6,13	-	-

En general, los coeficientes de variación son próximos a 10% o inferiores, lo cual puede ser adecuado para el uso de estos materiales en vías ferroviarias dado que se obtienen variaciones de deflexión muy inferiores a 0,5 mm, a la vez que se registran reducidas oscilaciones de las propiedades elásticas del material. Así, en base a los resultados, se entiende que la elaboración de placas de asiento a partir de un mismo neumático da lugar a reducidas variaciones de su comportamiento mecánico.

Por otra parte, se estudia la homogeneidad del comportamiento de placas elaboradas a partir de distintos neumáticos, pero dentro de un mismo tipo y modelo. La Tabla 21 muestra que la variación del comportamiento de las placas es del orden al registrado para elementos procedentes de un único neumático, ya que en ambos casos los coeficientes son inferiores a 10%, en términos generales. De esta forma, las placas fabricadas a partir de distintos neumáticos, pero del mismo tipo, son susceptibles de ser utilizadas en infraestructuras ferroviarias sin presentar variaciones importantes en el comportamiento de la vía.

Tabla 21: Resultados registrados para placas procedentes de distintos neumáticos del mismo tipo y modelo.

Propiedad	Parámetro	Ensayo 20-95 kN	Ensayo 100-200 kN	Ensayo dinámico
Rigidez	Media (kN/mm)	100,83	377,19	460,84
	Coef. Variación (%)	7,24	9,50	11,56
Energía disipada	Media (J)	14,68	6,74	3,33
	Coef. Variación (%)	1,60	2,92	8,27
Deformación remanente	Media (%)	6,92	0,964	-
	Coef. Variación (%)	3,49	7,02	-

En referencia a placas procedentes de distintos tipos y modelos de neumáticos, la Tabla 22 presenta los resultados estáticos y dinámicos para placas con 7,5 mm de espesor y 9,0 mm, siendo estos valores los extremos del rango definido para el uso de placas en Alta Velocidad (vías con elevadas exigencias mecánicas). Así, también se analiza la variabilidad de resultados en función del espesor de las placas de neumáticos.

En términos generales, se puede apreciar un ligero incremento de los coeficientes de variación al reducir el espesor de las muestras, lo cual puede ser debido al aumento de rigidez del material. Esto pone de manifiesto que al

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

utilizar placas de neumáticos con mayor nivel de desgaste (menor espesor) se obtiene menor homogeneidad en su comportamiento mecánico. No obstante, en ambos casos estudiados, se comprueba que el uso de diferentes tipos y modelos de neumáticos lleva a mayor heterogeneidad del comportamiento de las placas, en relación a placas procedentes de un mismo tipo de neumático. Esto puede ser debido a las diferencias de composición y geometría (dibujo de la huella) de los neumáticos dependiendo del tipo y modelo, así como del fabricante.

A pesar de estas oscilaciones en el comportamiento de las placas, éstas podrían ser susceptibles de ser utilizadas en vías ferroviarias dado que las variaciones de deflexión vertical son inferiores a 0,5 mm, lo cual es adecuado según las recomendaciones de la UIC (2011). No obstante, el uso de placas fabricadas a partir de un mismo tipo de neumático sería más apropiado para su uso en vías de ferrocarril, especialmente en Alta Velocidad. Este hecho es posible mediante la tecnología de deconstrucción de neumáticos dado que permite seleccionar los neumáticos utilizados en el proceso de obtención de las capas elásticas.

Tabla 22: Resultados para placas procedentes de distintos tipos y modelos de neumáticos. Estudio realizado para placas con 7,5 mm y 9,0 mm.

Propiedad	Parámetro	Ensayo 20-95 kN	Ensayo 100-200 kN	Ensayo dinámico
<i>Placas de 7,5 mm de espesor</i>				
Rigidez	Media (kN/mm)	112,45	328,66	350,30
	Coef. Variación (%)	9,12	21,16	29,81
Energía disipada	Media (J)	16,15	8,92	4,8
	Coef. Variación (%)	22,08	34,85	25,26
Deformación remanente	Media (%)	5,46	2,80	-
	Coef. Variación (%)	30,19	37,35	-
<i>Placas de 9,0 mm de espesor</i>				
Rigidez	Media (kN/mm)	75,93	220,80	247,70
	Coef. Variación (%)	14,02	14,16	8,71
Energía disipada	Media (J)	19,61	19,46	5,80
	Coef. Variación (%)	23,97	26,86	13,50
Deformación remanente	Media (%)	6,88	4,22	-
	Coef. Variación (%)	22,61	23,95	-

Como síntesis de esta fase de estudio de la influencia de emplear distintos tipos de neumáticos en el desarrollo de placas de neumáticos, se ha podido comprobar que la elaboración de los elementos elásticos a partir de un único tipo de neumático (aunque distintos ejemplares) lleva a valores adecuados de homogeneidad de comportamiento. Sin embargo, al utilizar distintos tipos y modelos de neumáticos, la heterogeneidad del material incrementa, lo cual puede estar relacionado con las diferencias geométricas presentadas por la huella de las bandas de rodadura empleadas en la fabricación de las placas. Además, se comprueba que este hecho se acentúa al reducir el espesor de las placas.

Así, para continuar con el desarrollo de placas de neumáticos óptimas para su empleo en vías de ferrocarril, se analizan distintos procesos de tratamiento del material con el fin de conseguir un comportamiento más homogéneo, siendo por tanto este parámetro (influencia del tratamiento del material) definido también como factor de diseño para el desarrollo de placas de neumáticos.

Determinación del tratamiento del material

Ante la posible relación entre la heterogeneidad del comportamiento de las placas y las diferencias de la geometría de la huella de los neumáticos utilizados, en esta fase de estudio se analiza la respuesta de placas a las que se les adhirió una lámina de fibras de vidrio (mediante la aplicación de una presión de 80 bares durante 4 minutos a 200°C), y placas a las que se les incorporó resina tipo epoxy en las ranuras de la huella del neumático (proceso realizado mediante la introducción de placas con la resina en moldes cerrados durante 1,5 minutos a 140°C). Estos tratamientos tenían por objeto regularizar la superficie de las placas.

Por otro lado, se recogen los resultados de placas a las que se les aplicó un tercer tratamiento consistente en un proceso de envejecimiento térmico (2 horas a 200°C) con el fin de tratar de regularizar las posibles diferencias asociadas a la composición química mediante la alteración de la respuesta elástica del material como consecuencia del deterioro climático. El efecto de este tratamiento, junto con los dos anteriores, se compara con la respuesta mecánica de placas sin tratamiento, usadas como patrón de referencia, teniendo todas ellas un espesor de 7,5 mm, dado que en la etapa anterior se vio que la variabilidad de resultados era mayor para este valor (en referencia a los resultados medidos para 9,0 mm).

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

La Figura 123 muestra el aspecto visual de las placas con distintos tratamientos (a) sin tratar; (b) con resina; (c) con lámina de fibra de vidrio; (d) tras proceso de envejecimiento.

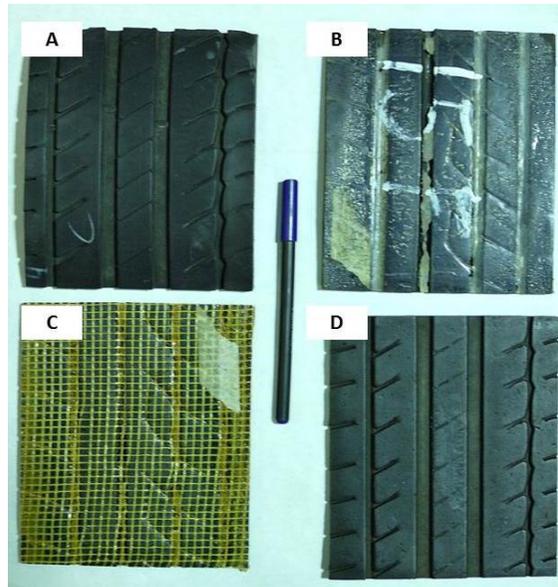


Figura 123: Aspecto visual de placas de neumáticos con diferentes tratamientos. (a) sin tratamiento; (b) con resina epoxy; (c) con lámina de fibras de vidrio; (d) placa tras envejecimiento térmico.

Para analizar el efecto de los distintos tratamientos, la Figura 124 muestra los valores medios de rigidez, así como su variación (C.V.), registrados en los ensayos estáticos (20-95 kN y 100-200 kN) y dinámico para placas de neumáticos sin tratar, con fibras, resina y envejecimiento térmico.

Se observa que los procesos utilizados para modificar el material llevan a una variabilidad de resultados superior (salvo en el caso de envejecimiento térmico que es comparable) a la presentada por placas sin tratar, siendo este hecho más significativo en las placas con resina. Además, se puede ver que los tratamientos dan lugar a la rigidización del material, obteniendo los mayores valores de rigidez estática para placas con fibras, y de rigidez dinámica para el caso de envejecimiento térmico.

De esta forma, dado que la rigidización de las placas va en sentido opuesto al deseado para estos materiales, en especial para vías de alta velocidad, lo más adecuado sería el uso de placas de neumáticos sin tratar.

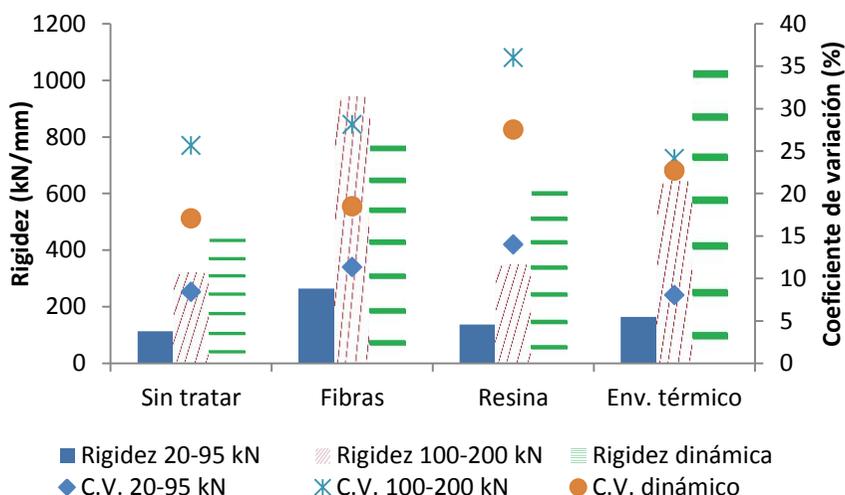


Figura 124: Resultados de rigidez medidos para las placas de neumáticos con distintos tratamientos.

Para profundizar en este análisis, la Figura 125 muestra los valores medios y su variación de la capacidad para disipar energía (arriba) y de la deformación remanente (abajo) para placas sin tratar, con fibras, resina y envejecimiento térmico. Esta última propiedad sólo se muestra para los ensayos estáticos (entre 20-95 kN y entre 100-200 kN), dado que en el caso dinámico todas las medidas tienden a cero, mostrando reducida variación entre las distintas placas.

Al igual que en el estudio de la rigidez, se puede ver que en general los tratamientos dan lugar a coeficientes de variación del mismo orden o incluso superiores a los presentados por el material original. Además, el uso de tratamientos lleva al descenso de la capacidad del material para disipar energía tanto en los ensayos estáticos como dinámicos, siendo este hecho más notable en el caso de placas con fibras, lo cual está relacionado con la rigidización del material. Como consecuencia de esta rigidización, en general se comprueba que desciende la deformación remanente de las placas con tratamiento, obteniendo así un comportamiento más elástico.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

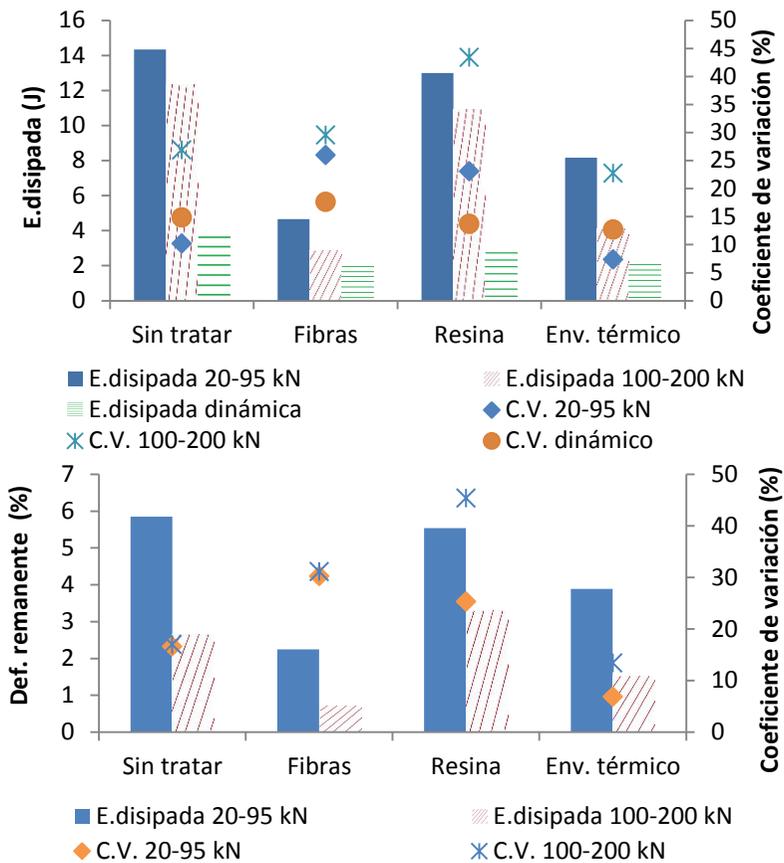


Figura 125: Resultados de energía disipada y deformación remanente para placas de neumáticos con diferentes tratamientos del material.

En resumen de los resultados presentados a cerca del análisis de la influencia de los tratamientos aplicados al material, se comprueba que en todos los casos no se mejora la homogeneidad del comportamiento de las placas de neumáticos al incorporar los tratamientos del material. Además, en los casos de fibras y resina la variabilidad de resultados incluso se acentúa, siendo destacado el caso de la resina.

Por otra parte, se ha podido ver que la aplicación de los tratamientos lleva a la rigidización del material y a la pérdida de su capacidad para deformarse (tanto elástica como plásticamente) y para disipar energía, pudiendo de esta forma desarrollar elementos elásticos con diferentes propiedades mecánicas, lo que daría lugar a un mayor rango de soluciones para vías con distintos niveles de exigencia para las placas de asiento.

Consideraciones para el desarrollo de placas de neumáticos

A partir del estudio de los distintos factores de diseño para el desarrollo de placas de neumáticos, se ha podido comprobar que los valores de espesor más apropiados para su empleo en vías de alta velocidad se encuentran en el rango 7,5 mm y 9,0 mm, mientras que espesores fuera de este rango podrían ser adecuados para su uso en vías convencionales con diferentes características de proyecto, dado que se ha visto que la respuesta de estas placas de neumáticos es comparable a la presentada por otros tipos de placas utilizadas en experiencias y estudios en el ámbito ferroviario, de acuerdo a la bibliografía consultada.

Para evitar problemas derivados de la variabilidad del comportamiento de las placas, desde esta tesis doctoral se recomienda el uso constante a lo largo de una vía, un mismo tipo de neumático, lo cual es posible mediante la tecnología de deconstrucción en capas dado que es posible clasificar los neumáticos en una etapa previa a su tratamiento. No obstante, el uso de distintos tipos de neumáticos podría ser posible dado que las variaciones de deflexión vertical son inferiores a las recomendadas.

Por otra parte, siempre que sea posible se deben de utilizar placas de neumático sin ningún tipo de tratamiento del material, dado que además de reducir costes de producción, se obtienen menores valores de variabilidad de resultados. No obstante, si se requieren placas con distinto comportamiento mecánico, dentro de un valor fijado de espesor, se recomienda el desarrollo de un proceso de envejecimiento térmico (2 horas a 200°C) para incrementar la rigidez del material, dado que permite obtener valores de homogeneidad de resultados comparable a las placas sin tratamiento. De igual modo, si el incremento de rigidez debe de ser más acentuado, se recomienda aplicar un tratamiento consistente en la adhesión de una lámina de fibras.

5.2.2.2 *Suelas bajo traviesa*

Al igual que en el caso de las placas de asiento, en la definición de las características geométricas para las suelas bajo traviesa y la determinación de los parámetros de diseño de estudio, se seleccionó el espesor de la suela como el factor principal de análisis. Así, en primer lugar se muestra la influencia de este parámetro en la respuesta de suelas de neumáticos.

Determinación del espesor

La Figura 126 muestra los valores de módulo estático para distintos niveles de tensión (C_{estat1} 0,01-0,10 N/mm²; C_{estat2} 0,01-0,20 N/mm², correspondientes con

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

presión media y alta de la capa de balasto) obtenidos para suelas con espesor entre 5,0 y 11,0 mm. Se puede observar que, tal y como ocurre en el caso de las placas de asiento, los valores de módulo se ajustan a una ley exponencial en referencia al espesor, obteniendo valores de R^2 que marcan una adecuada correlación entre el comportamiento estático de las suelas y su espesor.

Esto indica que se puede obtener una amplia gama de resultados al variar el espesor de las suelas. Además, los resultados muestran que el aumento de la presión de balasto de $0,10 \text{ N/mm}^2$ a $0,20 \text{ N/mm}^2$ daría lugar a mayores valores de módulo estático, poniendo de manifiesto la rigidización del material al incrementar el nivel de esfuerzo, aspecto a tener en cuenta en el diseño de la sección de vía dependiendo de las cargas esperadas.

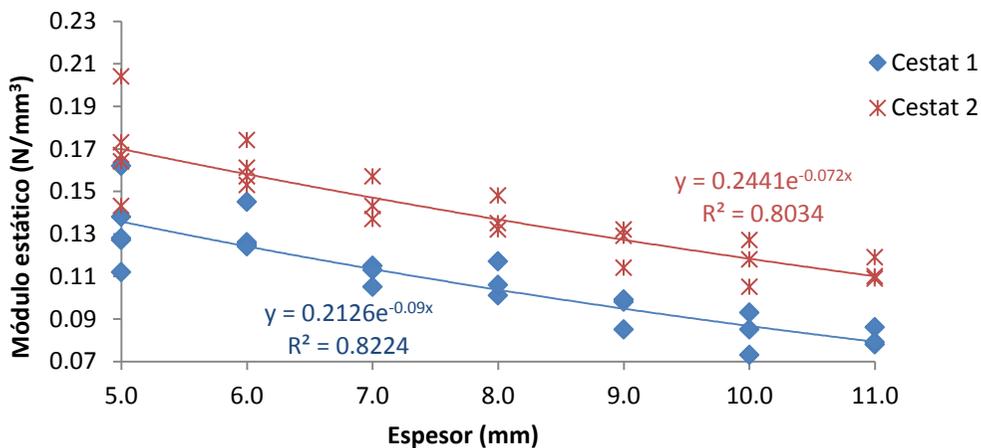


Figura 126: Resultados de módulo estático para suelas de neumáticos con diferentes espesores.

A partir de los resultados (Figura 126), en base a lo indicado por otros autores (CEN-document, 2009, recogido en UIC, 2013), para presiones de balasto medias ($C_{\text{estat1}} 0,01-0,10 \text{ N/mm}^2$) las distintas suelas de neumáticos estudiadas podrían ser clasificadas como blandas, las cuales permitirían reducir las tensiones y vibraciones transmitidas por los trenes.

Por otra parte, en el caso de presiones de balasto altas ($0,20 \text{ N/mm}^2$), las suelas con espesor superior a 7,0 mm seguirían siendo clasificadas como blandas, mientras que para espesores iguales o inferiores a 7,0 mm las suelas podrían ser usadas como elementos de rigidez media, permitiendo reducir el espesor de la capa de balasto y el fenómeno de corrugación, además de proporcionar una

transición suave entre tramos con distintos valores de rigidez vertical (Teixeira, 2003; CEN-document, 2009, recogido en UIC, 2013).

De igual modo, en comparación con los resultados obtenidos en otros estudios (Schneider, 2013) que han usado el mismo método de ensayo para caracterizar el comportamiento de las suelas, se comprueba que los elementos de neumáticos con 10 mm de espesor presentaron valores de rigidez estática comparables con los registrados por 4 suelas (de 5 tipos de materiales estudiados) con el mismo valor de espesor, las cuales han sido empleadas como elemento elástico en algunas líneas europeas. Este hecho, valida los resultados obtenidos para suelas de neumáticos, y las hace susceptibles de ser empleadas en vías de ferrocarril.

Por otra parte, la Figura 127 las curvas de desplazamiento vertical medidas en el ensayo estático para suelas con distinto espesor. Se comprueba que al incrementar el espesor aumenta el desplazamiento vertical máximo, mientras que los valores de deformación resiliente son próximos a 0,2 mm para todos los casos, lo que indica que el espesor no tiene notable influencia en las propiedades elásticas de las suelas de neumáticos ante cargas esperadas para estos materiales en vías de ferrocarril.

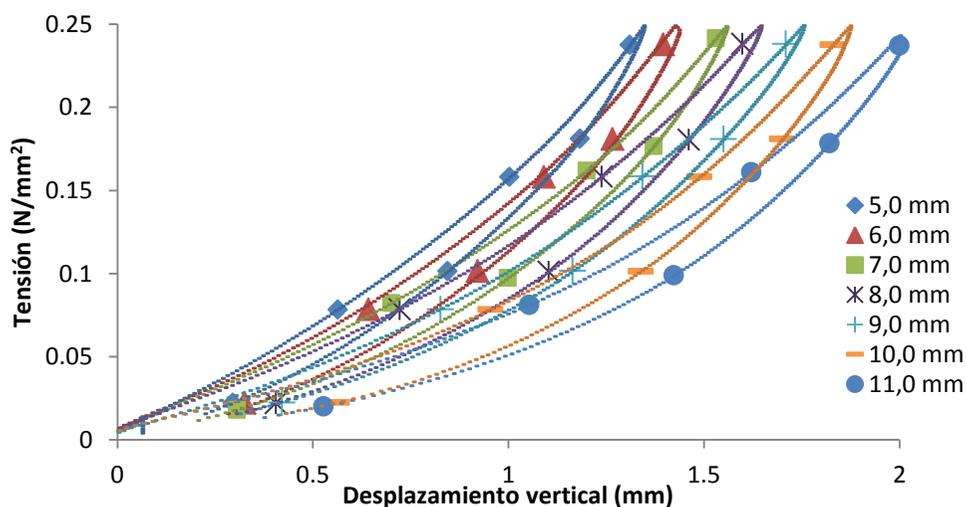


Figura 127: Curvas tensión/desplazamiento vertical medidas en los ensayos estáticos para suelas con diversos espesores.

Además, a partir de estas curvas (con similar forma que las registradas para placas, lo que muestra la repetibilidad del comportamiento del material) se puede calcular la energía disipada por las distintas suelas, comprobando que el

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

aumento de espesor da lugar a elementos elásticos con mayor capacidad para disipar energía. De esta forma, se puede pasar de un valor próximo a 2,23 J (por ciclo de carga) para suelas con 5,0 mm de espesor a 3,67 J para el caso de suelas con 11,0 mm, reduciendo en más de un 50% la energía transmitida a capas inferiores.

Por parte de la respuesta dinámica, la Figura 128 (izquierda) muestra los valores de módulo dinámico para distintas frecuencias (5 y 10 Hz), mientras que la Figura 128 (derecha) recoge los valores de la relación entre módulos dinámicos y módulo estático. Para el cálculo de este último parámetro se utiliza C_{estat1} , dado que los valores de módulos dinámicos fueron medidos para el mismo nivel de tensión (0,01-0,10 N/mm²).

Los resultados muestran que los módulos de rigidez se ajustan para ambas frecuencias a una ley lineal con valores de R^2 iguales a 0,8189 (5Hz) y 0,8262 (10 Hz), lo que indica un amplio rango del comportamiento de las suelas de neumáticos en función del espesor de las mismas. Así, sería posible utilizar estos materiales para conseguir transiciones más suaves entre tramos de vía con distintos valores de rigidez vertical. Además, se puede ver que al incrementar el valor de la frecuencia de carga de 5 a 10 Hz, se produce el aumento de los valores de módulos dinámicos, estando esto en consonancia con lo indicado por otros autores (Carrascal et al., 2011) para componentes ferroviarios elásticos.

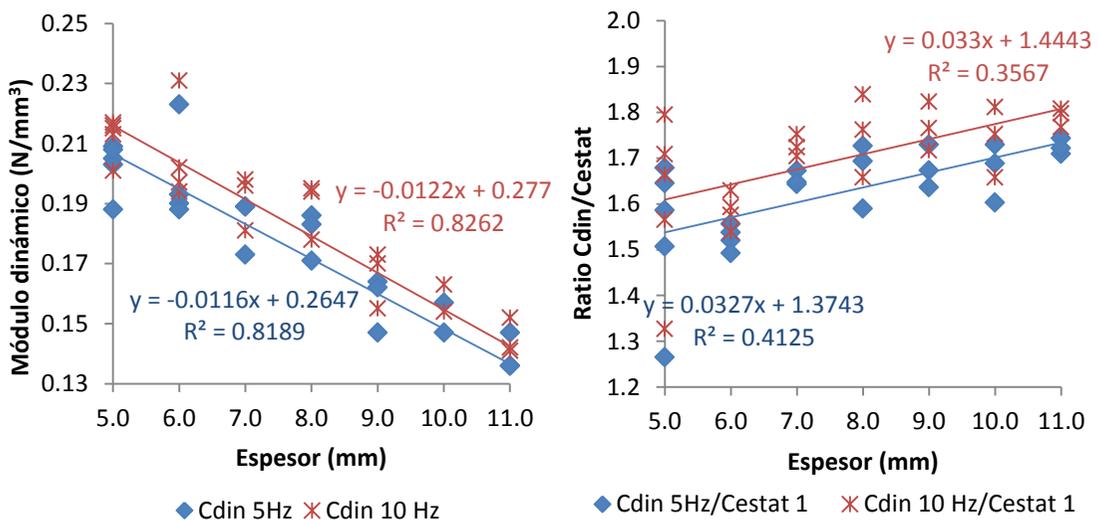


Figura 128: Resultados dinámicos para suelas con distintos valores de espesor.

Respecto a los valores de los ratios entre módulos dinámicos y módulo estático (Figura 128), se puede comprobar que existe una leve tendencia a incrementar el valor de este parámetro en relación al espesor de suela, lo que indica mayor rigidización por parte de las suelas con mayor espesor. Sin embargo, se observa que la correlación es baja (R^2 en torno a 0,3 y 0,4) lo que indica cierta heterogeneidad de este parámetro en relación al espesor, siendo este hecho acentuado al reducir el valor de espesor (es decir, al utilizar neumáticos con mayor desgaste).

No obstante, estos valores de los ratios (C_{din}/C_{estat}) están en consonancia con los resultados obtenidos por otros autores (Schneider, 2013) para 4 suelas comerciales (de 5 estudiadas) utilizadas como elementos elásticos en vías de ferrocarril. De igual modo, los resultados de rigidez dinámica presentados para frecuencias de 5 Hz y 10 Hz, son comparables con los valores presentados por la mayoría de las suelas comerciales analizadas en dicho estudio.

Además, a diferencia de los resultados registrados para el caso de las placas de neumáticos, en el caso de las suelas se comprueba que para un mismo valor de espesor los valores de rigidez son del mismo orden, obteniendo coeficientes de variación máximos (para el caso de 6,0 mm) inferiores a 8,3% a pesar de la utilización de distintos tipos de neumáticos, lo que en este tipos de materiales este factor de diseño podría tener reducida importancia.

Para un análisis con mayor profundidad del efecto del espesor en el comportamiento dinámico de suelas de neumáticos, la Figura 129 muestra los valores de desplazamiento remanente medidos en los ensayos a 5 Hz (izquierda) y 10 Hz (derecha) para placas con espesor entre 5,0 y 11,0 mm.

En términos generales, se puede observar que el incremento de espesor de las suelas lleva a mayores valores de desplazamiento permanente, lo cual puede estar relacionado con la mayor capacidad de deformación máxima asociada al incremento de espesor de suela. Además, al comparar los resultados obtenidos a 5 y 10 Hz, se pudo ver que el aumento de frecuencia lleva a menores valores de desplazamiento mínimo, obteniendo así un comportamiento más elástico del material.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

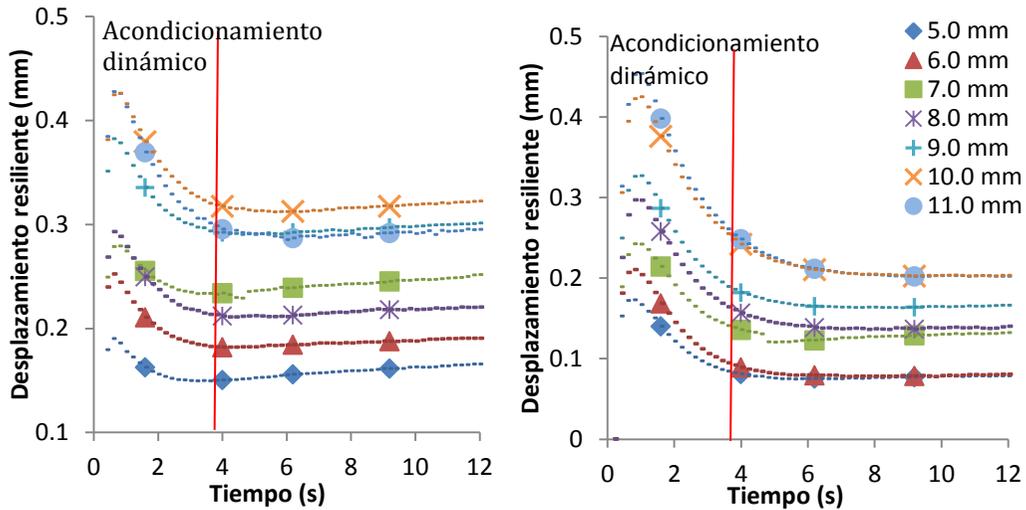


Figura 129: Desplazamiento resiliente medido para suelas con distintos espesores en los ensayos dinámicos a 5 Hz (izquierda) y a 10 Hz (derecha).

Por otra parte, la Figura 130 recoge la evolución de la energía disipada para ambos valores de frecuencia de carga (5 Hz izquierda, 10 Hz derecha). Se comprueba que los valores de energía disipada, además de incrementar con el espesor de suela, existe la misma tendencia con la frecuencia de carga, estando estos resultados en consonancia con lo registrado por otros autores (Carrascal et al., 2001) que han analizado la respuesta de elementos elásticos a distintas frecuencias de carga.

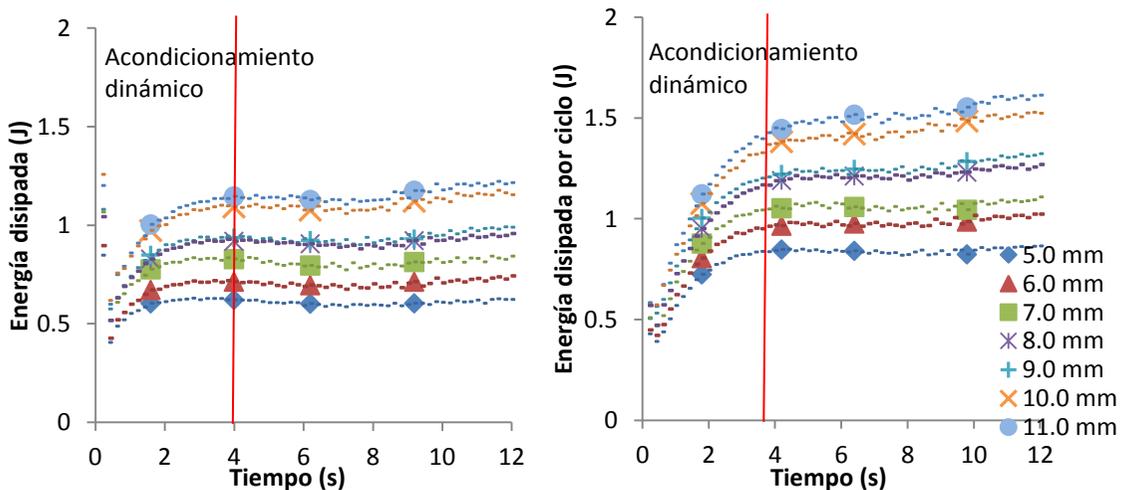


Figura 130: Resultados de energía disipada por ciclo medidos en los ensayos dinámicos a 5 Hz (izquierda) y a 10 Hz (derecha).

Como síntesis de los resultados obtenidos en esta fase de determinación del espesor óptimo de las suelas de neumáticos, se ha podido comprobar que el aumento de este parámetro lleva a un notable descenso de la rigidez del material, a la vez que se incrementa su capacidad para deformarse y para disipar energía. Así, el valor de 7,0 mm puede ser definido como espesor límite para diferenciar entre suelas blandas (espesores superiores) y suelas de rigidez media (espesores inferiores a 7,0 mm), de acuerdo con recomendaciones recogidas por la UIC (CEN-document, 2009, recogido en UIC, 2013).

No obstante, aunque estos resultados se pueden ver influenciados por el tipo de placa de balasto empleada en la realización de los ensayos (Iliev, 2012), se comprueba que para obtener suelas de neumáticos de mayor rigidez podría ser necesario llevar a cabo procesos de tratamientos del material, dado que en el estudio de las placas de asiento se vio que este método permite rigidizar el material. De esta forma, sería posible incrementar el rango de soluciones elásticas, lo cual es apropiado dado que las suelas son componentes utilizados principalmente para conseguir variaciones graduales de rigidez en tramos con cambios de secciones como por ejemplo entre terraplenes y puentes o entre vía sobre balasto y vía en placa (UIC Project Under Sleeper Pads, 2009; Darlhberg, 2010; Insa et al., 2011).

Así, como siguiente parámetro de diseño, se muestran los resultados obtenidos para suelas de neumáticos con distintos tratamientos del material. En este caso de las suelas, no se analiza la influencia del tipo de neumático dado que en el análisis de la influencia del espesor se han obtenido resultados homogéneos (coeficientes de variación inferiores a 8,5%), a la vez que el caso de las suelas la variabilidad podría ser debida a otros factores relacionados con el proceso de fabricación de las muestras embebidas en los bloques de hormigón (factores como la falta de planitud de la probeta, adhesión de la suela a los bloques de hormigón, etc.).

Determinación del tratamiento del material

Con el objetivo de incrementar la rigidez de las suelas de neumáticos, se presentan los resultados para dos tratamientos del material, ambos relacionados con la aplicación de calor, dado que en el estudio de las placas de asiento se vio que podría ser el método más efectivo. Así, se analiza la influencia de un proceso de envejecimiento térmico consistente en someter el material 2 horas a 200°C; y el efecto del desarrollo de un proceso consistente en la aplicación simultánea de calor y presión (1 hora a 200°C, mientras que se aplica una presión al material igual a 10 kg/cm²) sobre las suelas.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

La Tabla 23 recoge los valores de variación de los módulos estáticos y dinámicos, así como de la energía disipada, tras aplicar un proceso de envejecimiento térmico y un proceso de calor y presión, en relación a los valores obtenidos para suelas sin ningún tratamiento. Valores positivos indican incremento, mientras que los negativos se deben a la reducción del valor del parámetro en relación a los datos originarios (suelas sin tratamiento).

Los resultados muestran que ambos tratamientos llevan al incremento de la rigidez estática y dinámica del material, siendo este hecho más acentuado para el caso de las suelas tras envejecimiento térmico. Además, también se registran mayores valores de la relación entre módulos dinámicos y módulo estático, lo que indica mayor rigidización del material al pasar de cargas estáticas a dinámicas. Por otra parte, se puede ver que se reduce la capacidad del material para disipar la energía transmitida por el paso de los trenes, siendo de nuevo este hecho más notable para el caso de envejecimiento térmico.

Tabla 23: Resultados de variación de rigidez y energía disipada para suelas de neumáticos con diferentes tratamientos del material.

Tratamientos	Variación del comportamiento de las suelas (%) <i>(en referencia a los resultados de suelas de neumáticos sin tratar)</i>					
	<i>C₁ estat</i>	<i>C₂ estat</i>	<i>C_{din} 5Hz</i>	<i>C_{din} 10Hz</i>	<i>C_{din} 5Hz/ C₁ estat</i>	<i>C_{din} 10Hz/ C₁ estat</i>
Env. térmico	21,05	29,56	30,94	24,34	7,54	2,18
Calor y presión	7,65	9,81	10,03	11,96	1,69	3,07
<i>E. disipada</i>	<i>Ensayo estático</i>		<i>Dinámico a 5Hz</i>		<i>Dinámico a 10 Hz</i>	
Env. térmico	-20,85		-10,90		-11,34	
Calor y presión	-3,72		-4,11		-1,24	

De esta forma, se comprueba que los tratamientos estudiados podrían ser efectivos para ampliar la gama de soluciones elásticas dentro de elementos del mismo espesor, ya que permiten modificar la respuesta del material ante cargas que simulan el paso de los vehículos. Así, para vías donde se requieran elementos con menor flexibilidad sería posible utilizar suelas tratadas con un proceso de calor y presión, o incluso un proceso de envejecimiento térmico para conseguir mayor rigidez del material.

Determinación del método de adherencia

Una vez determinados los parámetros de diseño que definen las características mecánicas de la respuesta de las suelas de neumáticos, para estos componentes es necesario establecer el método de adherencia requerido para unir estos

elementos a la parte inferior de las traviesas. Así, la Tabla 24 presenta los resultados medios de ensayos de tracción realizados para 3 soluciones consistentes en embeber el textil interno de la capa de neumático en el hormigón, utilizando para ello distintos tipos de textil (categoría A, definida como la mayor calidad, cantidad y longitud del textil; categoría B, calidad intermedia; y categoría C, calidad baja).

Los resultados muestran que la solución tipo C es la que registra los menores valores de resistencia al arrancamiento, mientras que las muestras con textil tipo A y B presentan valores del mismo orden. Esto pone de manifiesto la importancia de la calidad del textil utilizado en la unión entre las suelas y el hormigón de las traviesas. Las suelas A y B, a pesar de tener distinto textil, presentan valores muy similares, lo que puede estar relacionado con el incremento de área de la muestra, ya que el dispositivo para transmitir los esfuerzos es de área constante (circular, con diámetro de 120 mm), por lo que al aumentar la superficie de la suela adherida al hormigón, incrementan los esfuerzos de cizalla entre la suela elástica y el bloque de hormigón.

Tabla 24: Resultados del ensayo de arrancamiento para diferentes soluciones de adherencia entre las suelas de neumáticos y el hormigón de las traviesas.

Tipo de muestra	Superficie suela elástica (mm ²)	Esfuerzo máximo tracción (kN)	Tensión máxima tracción (kPa)
Suela con textil A	25.116	1,71	68,08
Suela con textil B	27.200	1,93	70,95
Suela con textil C	24.424	1,20	49,13

En base a este estudio, se ha podido comprobar que el tipo de textil extraído de la suela para su unión puede tener notable influencia en la resistencia al arrancamiento entre este elemento y las traviesas de hormigón. Así, el textil tipo A sería el recomendado para su uso en la adhesión entre ambos materiales, dado que es el de mayor calidad y longitud, lo que permite mayor cantidad de textil embebido en el hormigón.

La Figura 131 muestra un ejemplo del textil de las suelas tras el ensayo de arrancamiento, en el que se comprueba que es necesario romper el textil embebido en el hormigón para separar la suela, lo que pone de manifiesto de nuevo la importancia del textil, ya que a mayor calidad, mayor resistencia.



Figura 131: Aspecto visual de la unión suela-hormigón (con textil embebido en el hormigón) tras el ensayo de arrancamiento.

Consideraciones para el desarrollo de suelas de neumáticos bajo traviesas

En base a los resultados obtenidos en la etapa de determinación del efecto de los factores de diseño, se ha comprobado que para la obtención de suelas blandas puede ser apropiado el uso de espesor superiores a 7,0 mm, mientras que valores inferiores pueden dar lugar a rigideces medias por parte del material, de acuerdo con otros autores (CEN-document, 2009, recogido en UIC, 2013). Además, para la consecución de materiales con mayor rigidez, puede ser apropiado el desarrollo de tratamientos consistentes en la aplicación de calor, siendo el más efectivo un proceso de envejecimiento térmico, en el que la suela elástica se somete a una temperatura de 200°C durante 2 horas.

En referencia al método de unión entre la suela y el hormigón de las traviesas, los resultados han indicado que para conseguir mayor resistencia de la unión entre ambos materiales es necesario emplear el textil interno de las suelas de mayor longitud y calidad, definido en esta tesis doctoral como tipo A.

5.2.2.3 Mantas bajo balasto

Para el desarrollo de mantas bajo balasto a partir de capas de neumáticos, se muestra la influencia del valor del espesor de estos materiales, dado que éste es definido como el principal parámetro de diseño debido a que es la variable más sencilla de controlar durante su elaboración. Para el análisis de este factor se

recogen en primer lugar los resultados obtenidos de acuerdo a la normativa DBS 918 071-01, y posteriormente, para las mantas susceptibles de ser usadas tanto en vías convencionales como en Alta Velocidad, se recoge la influencia del espesor en consonancia con la DIN 45673-5. El uso de distintas normativas se debe a que esta última permite reproducir de forma más realista las condiciones de trabajo de las mantas elásticas, por lo que es usada para comprobar el efecto del espesor.

Determinación del espesor

La Figura 132 muestra los resultados medios del módulo de rigidez estático para mantas de neumáticos con diferentes valores de espesor, de acuerdo a la normativa DBS 918 071-01. Se puede ver que los datos se ajustan a una ley potencial ($R^2=0,8202$), mostrando mayor efecto del espesor para mantas con valores de este parámetro inferior a 19,0 mm. De esta forma, el uso de mantas con distinto espesor permitiría graduar la rigidez vertical del conjunto en función de las características de diseño y de explotación de la vía.

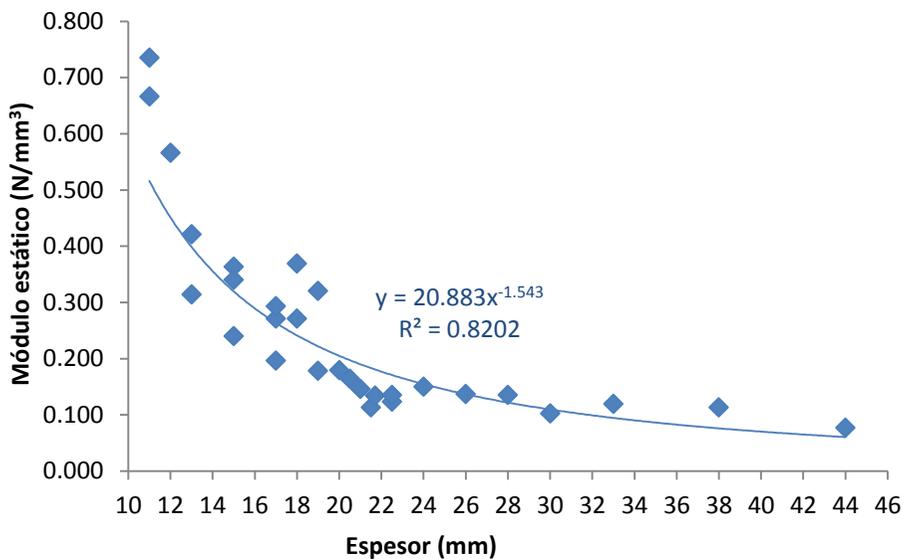


Figura 132: Tendencia del módulo estático de las mantas de neumáticos en relación a su espesor.

En relación a los límites establecidos por la norma DBS 918 071-01 para el módulo de rigidez, las mantas con espesor comprendido entre 19,0 mm y 38,0 mm son susceptibles de ser utilizadas en vías donde la velocidad de los trenes es inferior a 230 km/h (donde $0,10 \text{ N/mm}^3 < C_{\text{est}} < 0,25 \text{ N/mm}^3$). Sin embargo, para vías de alta velocidad, las mantas de neumáticos deben de tener un

espesor superior a 21,0 mm, dado que los valores de módulo estático deben estar comprendidos entre $0,10\text{N/mm}^3$ y $0,15\text{N/mm}^3$. Esto es debido a que este tipo de vías requieren elementos con mayor flexibilidad con el fin de reducir el exceso de rigidez vertical del conjunto, habitualmente asociado al incremento de la capacidad portante del sistema (López Pita, 2006).

En comparación con otros materiales, las mantas formadas mediante capas de neumáticos presentaron valores del módulo de rigidez superiores a los registrados ($0,019\text{N/mm}^3$) en otros estudios (Carrascal et al., 2013) para mantas con espesor igual a 35 mm, fabricadas a partir de polvo de neumático. Esto indica que podría ser necesario usar mayores espesores para las mantas elaboradas a partir de capas de neumáticos.

Por otra parte, la Figura 133 recoge las curvas tensión-desplazamiento vertical medio para mantas con espesor de 11, 15, 20, 26, 33 y 44 mm, seleccionados como espesores representativos. La Figura 132 muestra es posible obtener desplazamientos verticales máximos desde valores próximos a 0,2 mm para mantas con 11,0 mm de espesor hasta valores próximos a 1,5 mm para el caso de espesores iguales a 44,0 mm. Esto indica que para vías que requieran aumentar la deflexión del conjunto es necesario recurrir a mantas de mayor espesor, pudiendo además graduarse el comportamiento de la vía en tramos de transición mediante la disposición de mantas con distinto espesor, evitando de esta forma cambios de deflexión superiores a 0,5 mm, de acuerdo con las recomendaciones de la UIC (2011).

Además, a partir de las curvas de desplazamiento-tensión, cuya forma no-lineal es similar a la obtenida para el caso de placas y suelas, se comprueba que los mayores valores de energía se registran para la manta de 44,0 mm de espesor (próximo a 1,70 J), mientras que el menor valor se mide para el caso de 11,0 mm (0,18 J). Estos resultados indican que el aumento del espesor de las mantas permite disipar mayor cantidad de la energía transmitida a las capas de asiento ante el paso de vehículos, consiguiendo así menor deterioro de la plataforma de la infraestructura.

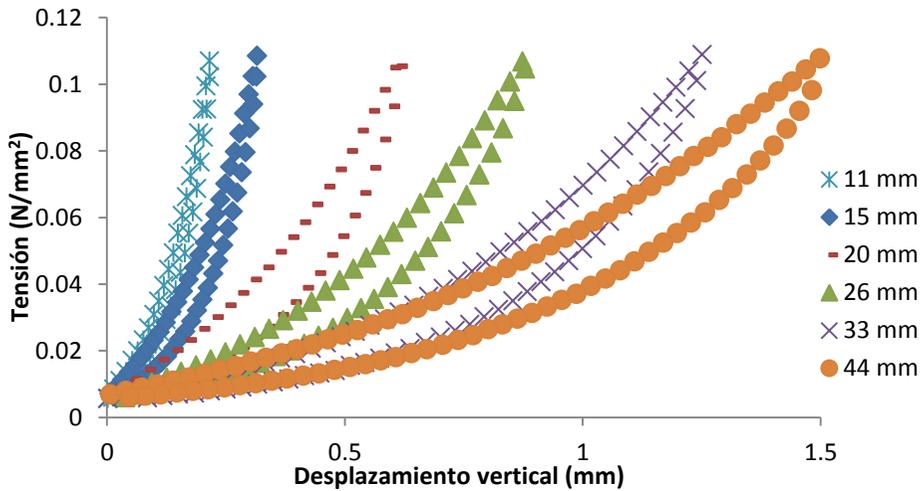


Figura 133: Curvas tensión/desplazamiento vertical medido para mantas con distinto espesor en los ensayos estáticos.

En relación a la respuesta dinámica de las mantas, la Figura 134 muestra los resultados medios del módulo de rigidez dinámico (C_{din}) a 1 Hz, 5 Hz y 10 Hz, de acuerdo a la normativa DBS 918 071-01.

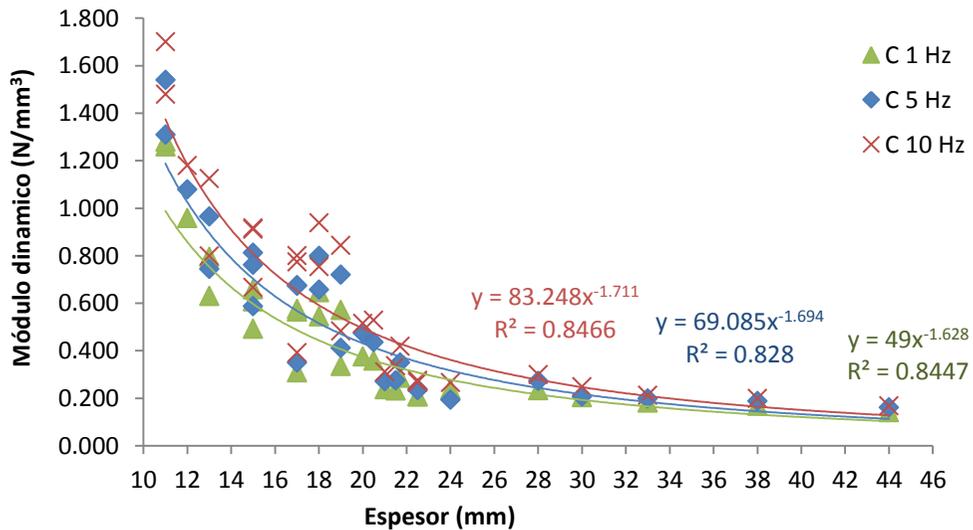


Figura 134: Resultados del módulo dinámico a diferentes frecuencias para muestras de mantas con distintos espesores.

De nuevo, al incrementar el espesor de la manta disminuye su módulo de rigidez, siguiendo una ley potencial para las distintas frecuencias estudiadas. Además, se comprueba que el incremento de la frecuencia de carga lleva a

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

mayores valores del módulo de rigidez, obteniendo así mayor rigidización del material. De esta forma, en relación al módulo estático, para la frecuencia de 10 Hz se obtienen valores del ratio entre rigidez dinámica y estática ($C_{din\ 10Hz}/C_{est}$) próximos a 2,0-2,5, lo cual se corresponde con lo obtenido por otros autores (Carrascal et al., 2013).

De igual modo, la Figura 135 (izquierda), la cual recoge los datos de una manta con espesor igual a 22,5 mm (tomada como ejemplo), muestra que al incrementar la frecuencia de carga disminuyen los valores de desplazamiento vertical máximo y aumenta la distancia entre la curva de carga y descarga, mostrando así menor elasticidad por parte del material. Por su parte, en la Figura 135 (derecha) se puede ver que la energía disipada por las mantas aumenta de forma considerable al incrementar la velocidad de sollicitación, lo que indica que es posible incrementar la velocidad del tren sin que se acelere la degradación de la vía, para valores de tensión del mismo valor. No obstante, se debe considerar el hecho del aumento de rigidez del material al aumentar la velocidad del tren (frecuencia de carga), lo cual puede derivar en mayores sollicitaciones dinámicas (Prud'Homme, 1977).

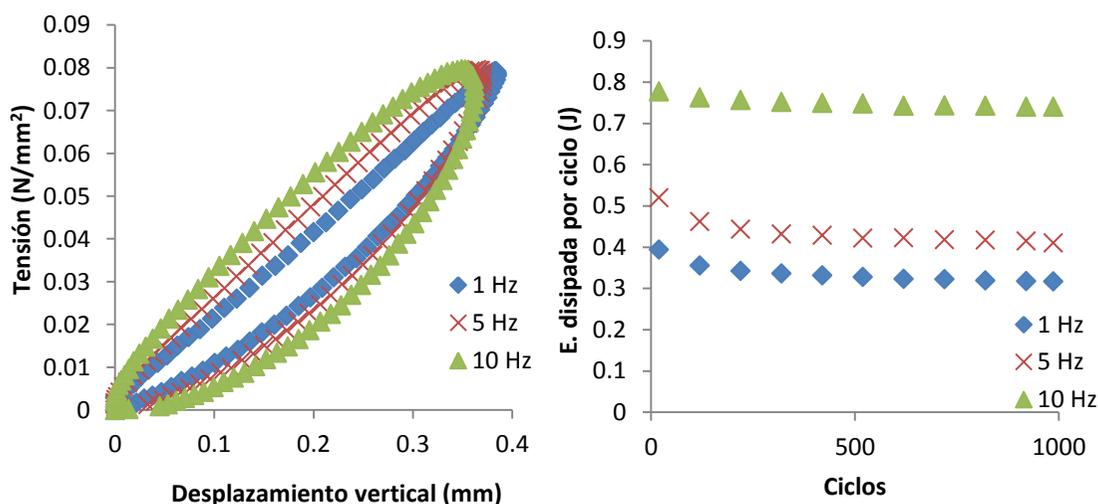


Figura 135: Influencia de la frecuencia de ensayo en las propiedades dinámicas de muestras de mantas de neumáticos.

Por otra parte, con el fin de analizar la respuesta de las mantas de neumáticos bajo condiciones de carga más realistas, se evaluó su comportamiento de acuerdo con la DIN 45673-5, que a diferencia de la norma DBS 918 071-1,

establece la sustitución de una de las placas planas de carga por una placa normalizada de balasto, simulando así el contacto manta-balasto. Las Figuras 136 y 137 muestran los resultados estáticos y dinámicos para mantas con espesor entre 21 y 44 mm, definidas en el estudio anterior como susceptibles de ser usadas en Alta Velocidad, a la vez que son apropiadas para su uso en vías convencionales. En trazo continuo se presentan los resultados medidos de acuerdo a la DIN 45673-5, y en discontinuo (y sin relleno de marcadores) los registrados anteriormente según la DBS 918 071-01.

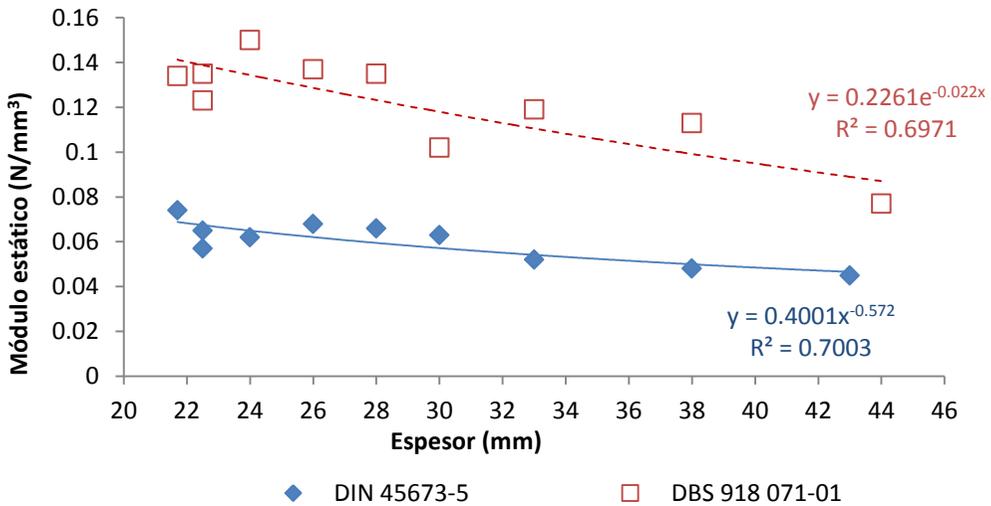


Figura 136: Influencia de la normativa utilizada para ensayo de laboratorio, en el módulo estático de mantas de neumáticos.

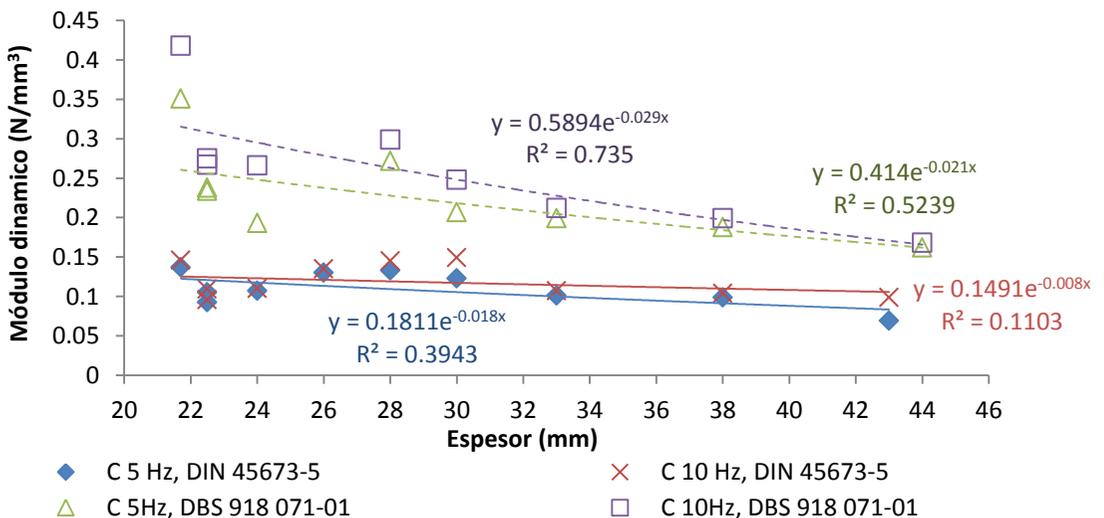


Figura 137: Resultados de módulos dinámicos a distinta frecuencia, dependiendo de la normativa utilizada en la realización de ensayos.

Comparando los resultados obtenidos en ambos métodos, se puede ver que el uso de una placa de balasto lleva a menores valores del módulo de rigidez estático y dinámico de las mantas de neumáticos, comprobando además que en este caso el efecto del espesor del elemento elástico es menos acusado que en el caso de placas metálicas planas (usadas como actuadores).

No obstante, en este último procedimiento de ensayo, de nuevo se obtiene que las mantas elaboradas a partir de capas de neumáticos presentan valores de rigidez mayores que los presentados por mantas de polvo de neumático con 35 mm de espesor ($0,014 \text{ N/mm}^3$), de acuerdo con otros estudios (Carrascal et al., 2013). Así, sería necesario recurrir a mayores valores de espesor en el caso de las mantas formadas a partir de la capa de rodadura de neumáticos usados. No obstante, en este caso de empleo de placa de balasto en el ensayo, las diferencias entre ambos materiales son menores que en el caso de ensayo con placas planas.

Por su parte, se observa que al usar una placa de balasto se registra, en general, mayor variabilidad de resultados (menor R^2 , salvo en el caso estático que son del mismo orden), lo cual está en consonancia con lo indicado por otros autores (Carrascal et al., 2013). Este hecho es más significativo al incrementar la velocidad de aplicación de la carga, siendo necesario tener en cuenta este fenómeno a la hora de analizar en laboratorio la respuesta de mantas elásticas ante cargas que simulan el paso de trenes.

Continuando con la comparativa del comportamiento de las mantas en relación al tipo de placa utilizada para solicitar el elemento elástico, la Figura 138 recoge para ambos casos (placas planas y placa de balasto) las curvas tensión-desplazamiento vertical tanto en un ensayo estático (Figura 138 izquierda) como uno dinámico a 5 Hz (Figura 137 derecha).

Los resultados muestran que ante un mismo esfuerzo, aumentan los valores de desplazamiento vertical medidos durante los ensayos estáticos y dinámicos que utilizan una placa de balasto (situación más realista). Esto puede estar relacionado con una mayor tensión sobre el material como consecuencia de la reducción de la superficie de contacto al pasar de un actuador con placa plana a una placa de balasto normalizada. No obstante, estos resultados pueden verse influenciados por el tipo de placa de balasto utilizada durante los ensayos, según otros estudios (Iliev, 2012), dado que puede variar la superficie de contacto entre dicha placa y el material ensayado.

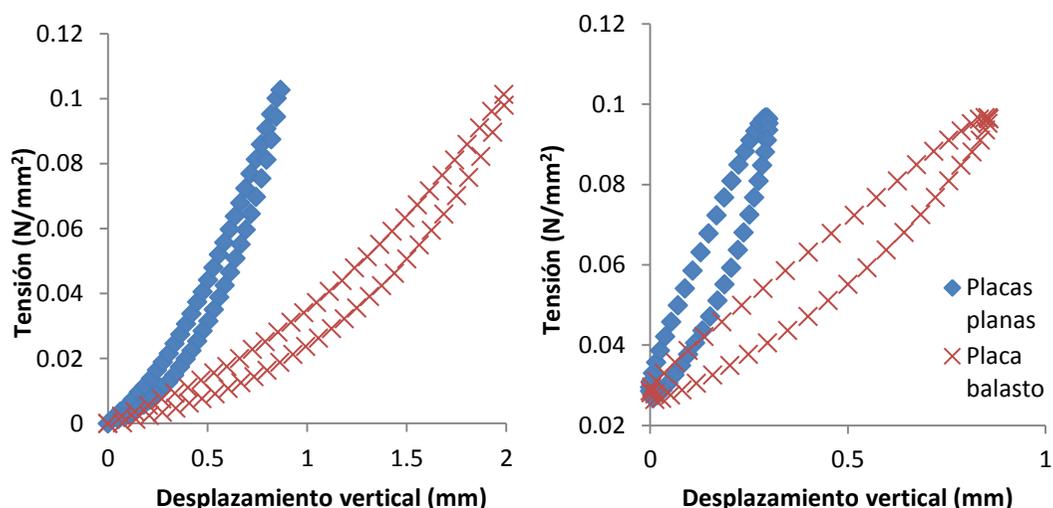


Figura 138: Curvas tensión/desplazamiento medidas en el ensayo estático (izquierda) y dinámico a 5 Hz (derecha) para muestras de mantas evaluadas de acuerdo a dos normativas diferentes.

Consideraciones para el desarrollo de mantas de neumáticos

En referencia a los resultados obtenidos en el estudio de los factores de diseño para las mantas de neumáticos, se ha podido comprobar que de acuerdo a la normativa DBS 918 071-1 (la cual establece placas planas para la realización de los ensayos) los elementos debe tener un espesor superior a 19,0 mm, siendo este valor mínimo incrementado hasta 21,0 mm para el caso de su uso en Alta Velocidad.

Por otra parte, en comparación con otros materiales (por ejemplo mantas elaboradas a partir de polvo de neumático) se ha podido ver que las mantas elaboradas a partir de capas de neumáticos son menos elásticas, por lo que requieren mayores valores de espesor. No obstante, se ha comprobado que el tipo de ensayo, así como el tipo de placa de balasto para realizar las pruebas de laboratorio, pueden influir de forma notable en los resultados.

5.2.3 Recomendaciones de diseño para el uso de elementos de neumáticos

En base al análisis de diseño realizado en esta fase de estudio para el desarrollo de elementos elásticos a partir de capas de neumáticos deconstruidos, se han podido determinar las principales características que deben presentar estos elementos para su uso en vías de ferrocarril con diferentes exigencias para estos materiales. Así, la Tabla 25 resume las recomendaciones para estas propiedades de diseño para cada elemento de neumático, siendo clasificados

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

según su rigidez. No obstante, se debe de tener presente que estas características se pueden ver influenciadas por el tipo de neumático utilizado, ya que en el análisis de la repetibilidad de resultados se comprobó que puede ser un factor de diseño con importante influencia. De este modo, sería recomendable elaborar los elementos elásticos a partir de un sólo tipo de neumático.

La clasificación de la rigidez puede depender del tipo de vía, y sus exigencias. Así, para el caso de las placas, se distingue entre placas blandas (rigidez entre 80 kN/mm y 125 kN/mm, apropiada para Alta Velocidad), y placas de rigidez media y alta, considerando estas últimas como aquellas que tienen un valor superior a 125 kN/mm y un valor muy superior, respectivamente.

En el caso de las suelas, la clasificación se realiza en referencia a recomendaciones de la UIC (CEN-document, 2009, recogido en UIC, 2013), mientras que las mantas se clasifican según la DBS 918 071-1. Para este último elemento se exige que su rigidez sea baja, por lo que sólo se presenta el caso de mantas blandas y mantas de rigidez media, sin llevar a cabo ningún tipo de tratamiento del material que rigidice su respuesta ante cargas de compresión.

Tabla 25: Resumen de las propiedades óptimas recomendadas para el uso de distintos tipos de placas de asiento, suelas bajo traviesa y mantas bajo balasto.

Elemento elástico	Tipo	Geometría horizontal (mm)	Espesor (mm)	Posible tratamiento
Placas de asiento	<i>Blandas</i>	<u>Largo:</u> 180 ± 1	7,5-9,0	-
	<i>Rigidez media</i>	<u>Ancho:</u> 140 ± 1 (carril UIC 54)	4,5-7,5	-
	<i>Rígidas</i>	148 ± 1 (carril UIC 60)	4,5-7,5	Env. Térmico Fibras
Suelas bajo traviesa	<i>Blandas</i>	<u>Largo:</u> 1.000	>7,0	-
	<i>Rigidez media</i>	<u>Ancho:</u> 180-280	<7,0	-
	<i>Rígidas</i>	<u>Adhesión:</u> textil del neumático (mayor calidad) embebido en el hormigón.	<7,0	Env. Térmico Calor-presión
Mantas bajo balasto	<i>Blandas</i>	<u>Largo:</u> Ilimitado	21,0-44,0	-
	<i>Rigidez media</i>	<u>Ancho:</u> >2.500	19,0-38,0	-

De acuerdo con los condicionantes geométricos que presentan las capas de rodadura de los neumáticos usados (longitud y ancho próximos a 1,80 m y 0,18 m respectivamente), se ha podido comprobar que para la elaboración de placas de asiento es suficiente un proceso de corte de las bandas de neumático de acuerdo con las dimensiones exigidas a las placas elásticas.

En vista de la Tabla 25, de acuerdo con la bibliografía consultada, el uso de las placas de neumáticos blandas (espesor 7,5-9,0 mm) podría mejorar el comportamiento el comportamiento de la vía en tramos de transición de rigidez (López Pita, 2006; Dahlberg, 2007), a la vez que se reduciría el efecto de corrugación de carril así como el deterioro de traviesas y balasto (Egana, 2006; Giannakos, 2010). Sin embargo, el uso de estas placas, a pesar de poder reducir las vibraciones asociadas a movimientos de balasto y traviesa, podría provocar mayores vibraciones de carril en comparación con el uso de placas de menor espesor y con tratamiento del material (mayor rigidez), de acuerdo con Thompson y Jones (2006) y Vincent et al. (1996). No obstante, estos efectos, así como la elección de un tipo de placa u otro, dependen de las características de proyecto de la vía ferroviaria.

En referencia a la elaboración de suelas de neumáticos, este elemento debe elaborarse a partir de la unión de capas de neumáticos para conseguir tener una anchura de suela apropiada para su disposición en la parte inferiores de las traviesas, mientras que para conseguir una longitud apropiada basta con cortar el material (ya que las bandas de neumáticos tienen mayor longitud que la requerida por las suelas). No obstante, estas dimensiones de ancho de suela dependerán de la geometría de la traviesa en la que vayan a ser usadas las suelas. En referencia al método de unión entre ambos materiales (suelas y traviesas), se recomienda utilizar el textil interno de las suelas (con la mayor longitud y calidad posible, dentro de los distintos tipos de tejidos que incorporan los neumáticos) para embeber éste en el hormigón de las traviesas.

Dentro de estas suelas elaboradas a partir de neumáticos, el uso de materiales con espesor inferior a 7,0 mm (y posible tratamiento como envejecimiento térmico) podría mejorar el comportamiento de la vía en curvas, a la vez que se reduce la corrugación del carril (Schilder, 2006; Loy, 2008), mientras que el uso de elementos blandos (espesor superior a 7,0 mm) permitiría reducir la vibraciones transmitidas al terreno y el ruido emitido al paso de los vehículos (Asmussen, 2012), aunque podrían incrementarse los movimientos de carril y traviesas (Müller-Boruttau y Kleinert, 2001). No obstante, de acuerdo a estos últimos autores, junto con otros estudios (Stahl, 2006; López Pita, 2006), el

empleo de cualquier tipo de suela permite reducir el deterioro del balasto y sus vibraciones.

Por parte de las mantas, se ha visto que para su elaboración es necesario llevar a cabo un proceso un unión de distintas bandas de neumáticos, tanto en sentido horizontal (para conseguir mantas con amplias dimensiones) como vertical (superponiendo bandas de neumáticos), dado que el espesor de las mantas se encuentra en términos generales entre 19,0-44,0 mm, mientras que el grosor de las capas de neumáticos oscila entre 4,0 mm y 11,5 mm.

El uso de estas mantas elaboradas a partir de capas de neumáticos, además de reducir el deterioro de la vía, principalmente permitirían mitigar parte de las vibraciones transmitidas al terreno, especialmente en los rangos de frecuencia superiores a 31,5 Hz e inferiores a 250 Hz (UIC Code 719-1, 2001; Getzner Werstoffe, 2006; Kleinert et al., 2006).

5.3 Evaluación de la resistencia de los elementos de neumáticos

Una vez desarrollados los elementos de neumáticos y definidas sus características óptimas de diseño para su uso en distintos tipos de vías ferroviarias, se muestran los resultados del estudio de su capacidad resistente, pudiendo de esta forma comprobar la aptitud mecánica de estos materiales y su durabilidad, factor fundamental para su empleo. Este análisis es mostrado en primer lugar para las placas de asiento, seguido de las suelas y las mantas de neumáticos.

5.3.1 Placas de asiento

Para evaluar la aptitud resistente de las placas de neumáticos, se recoge el estudio de su resistencia a la fatiga mecánica ante la aplicación repetida de cargas dinámicas, y su durabilidad ante agentes climáticos que pueden tener lugar durante la vida de servicio de estos materiales.

5.3.1.1 Fatiga mecánica

La Tabla 26 muestra los desplazamientos del carril (tanto en la cabeza como en el patín) antes y después del proceso de fatiga ante cargas inclinadas (33°) para esfuerzos máximos (F_{\max}) iguales a 83 kN y mínimos (F_{\min}) de 5 kN. De igual modo, se recoge la variación de estos movimientos para evaluar el efecto de la fatiga mecánica en la respuesta de placas de neumático.

En términos generales, se puede ver que los desplazamientos del carril después del proceso de fatiga son superiores a aquellos medidos antes de la aplicación repetida de cargas dinámica, lo cual, además de la variación del comportamiento de la placa de neumático, puede estar asociado a la fatiga del propio sistema de sujeción. Además, se puede ver que las mayores variaciones de movimiento se registraron en la cabeza del carril, estando relacionado con la mayor magnitud de este tipo de desplazamientos como consecuencia del uso de una sujeción tipo elástica. No obstante, en ambos casos (cabeza y patín), las variaciones de movimiento son aceptables para el uso de placas de neumáticos en vías ferroviarias (de acuerdo con las prescripciones de ADIF).

Tabla 26: Resultados de movimiento de carril antes y después del proceso de fatiga, así como la variación entre ambos casos, para placas bajo carga inclinada.

Desplazamientos de carril	D ₁ cabeza	D ₂ cabeza	D ₁ patín	D ₂ patín	D ₃ patín	D ₄ patín
Previo a la fatiga						
Desplazamientos F _{max} (mm)	2,163	2,164	0,595	0,619	0,675	0,630
Desplazamientos F _{min} (mm)	0,170	0,159	0,032	0,047	0,036	0,038
Posterior a la fatiga						
Desplazamientos F _{max} (mm)	2,462	2,422	0,667	0,671	0,651	0,663
Desplazamientos F _{min} (mm)	0,179	0,222	0,0523	0,060	0,082	0,065
Variación de los resultados						
Desplazamientos F _{max} (mm)	0,299	0,258	0,072	0,052	0,024	0,033
	Valor medio: 0,279		Valor medio: 0,049			
Desplazamientos F _{min} (mm)	0,009	0,063	0,020	0,013	0,046	0,026
	Valor medio: 0,036		Valor medio: 0,026			

Para evaluar la durabilidad de las placas de neumáticos ante procesos de fatiga, la Figura 139 muestra su cambio de rigidez estática entre 20-95 kN (Figura 139, izquierda) y dinámica (Figura 139, derecha) de la placa de neumático como consecuencia del proceso de fatiga.

Los resultados indican que tanto en régimen estático como dinámico, la aplicación repetida de cargas lleva a la rigidización del material, produciéndose un incremento de 16,38% para el caso estático, y 13,10% para el dinámico, además de un descenso de la capacidad para disipar energía en torno al

27,25% para el caso estático y al 14,23% para el estudio dinámico, lo que indica que el paso repetido de vehículos puede llevar a la reducción de la capacidad de las placas para amortiguar las cargas transmitidas.

No obstante, al comparar estos resultados con los obtenidos por otros autores (Carrascal et al., 2006) en el estudio a fatiga de placas de asiento, se comprueba que la degradación de las placas de neumáticos es menor que la presentada por placas comerciales elaboradas a partir de material TPE, ya que éstas registraron incrementos de rigidez superiores a 17% y descensos de energía disipada mayores de 40% (tanto en régimen estático como dinámico). Así, en base a estas consideraciones, junto con las exigencias establecidas por ADIF para Alta Velocidad (variación de la rigidez inferior a 25%), se puede comprobar que las placas de neumáticos presentan una apropiada resistencia a la fatiga, haciendo estos elementos susceptibles de ser empleados tanto en vías convencionales como de alta velocidad.

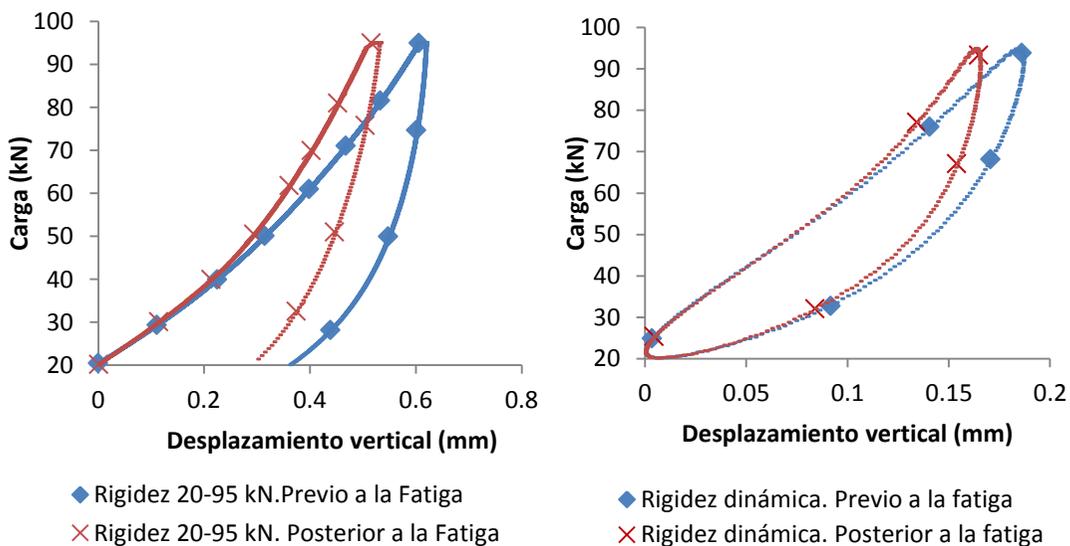


Figura 139: Comparación de las curvas carga/desplazamiento medidas antes y después del proceso de fatiga, en los ensayos de rigidez estática (izquierda) y dinámica (derecha).

5.3.1.2 Deterioro climático

A parte de la evaluación de la resistencia a fatiga, para profundizar en el estudio de la durabilidad de las placas de neumáticos, se presentan los resultados de su resistencia al deterioro climático. La Figura 140 muestra la variación de la rigidez estática (entre 20-95 kN y entre 100-200 kN) y dinámica para placas

sometidas a envejecimiento térmico, y ciclos de frío-calor y congelación-descongelación.

Las mayores variaciones se obtienen para la rigidez dinámica del material, pudiendo destacar el caso de hielo-deshielo dado que presenta mayor cambio que los otros dos procesos, los cuales presentan un porcentaje de variación del mismo orden, al igual que ocurre en el caso estático. En términos generales, se comprueba que los cambios de rigidez provocados por los procesos climáticos son inferiores a 20%, lo que indica una adecuada durabilidad del material ante estos agentes externos (ADIF), siendo así susceptibles las placas de neumáticos de ser usadas en vías de ferrocarril sin que se produzca una degradación acelerada de sus propiedades, y por tanto, conservando su capacidad para disipar las cargas provocadas por el paso de los vehículos.

Además, si se comparan los resultados de rigidez estática (20-95 kN/mm) con los presentados por placas comerciales elaboradas a partir de TPEE (Carrascal et al., 2006), se comprueba que las variaciones de comportamiento de las placas de neumático son comparables a las presentadas por las placas comerciales (en el rango 5-10% para los tratamientos de calor y de congelación-descongelación). Esto indica una adecuada resistencia a la degradación por parte de las placas de neumáticos, lo cual podría estar asociado a la reducida modificación de las propiedades de los neumáticos gracias al proceso de deconstrucción del material sin necesidad de su trituración (técnica habitualmente utilizada para la elaboración de elementos elásticos).

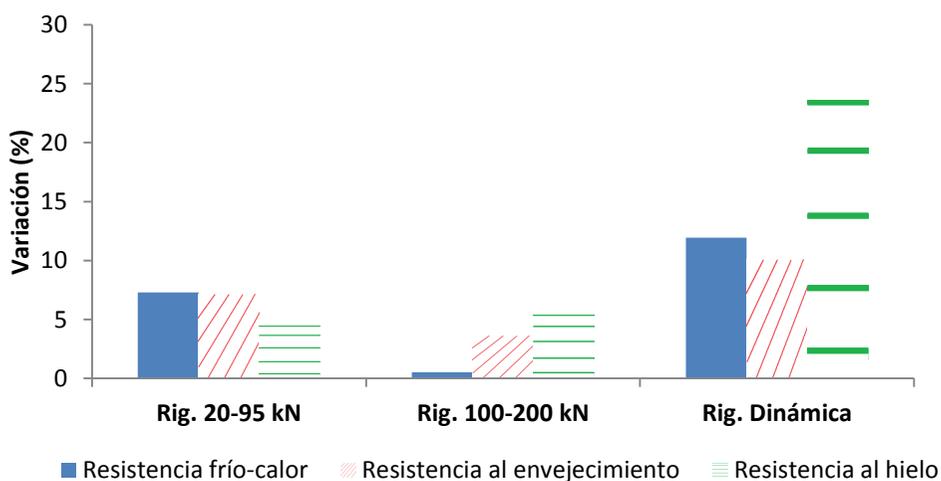


Figura 140: Variación de los resultados medidos para placas de neumáticos como consecuencia de distintos proceso de deterioro climático.

5.3.2 Suelas bajo traviesa

Por parte del estudio de capacidad resistente de las suelas de neumáticos, se presenta un análisis de su aptitud ante un proceso de fatiga mecánica bajo cargas repetidas, así como la durabilidad del material bajo condiciones atmosféricas esperadas para estos elementos elásticos.

5.3.2.1 Fatiga mecánica

La Figura 141 muestra la evolución media de la rigidez dinámica y la energía disipada por las suelas de neumáticos durante un ensayo de fatiga realizado sobre cajón de balasto. A partir de los resultados se comprueba que el módulo dinámico del conjunto (bloque de hormigón con suela sobre capa de balasto) incrementa en los primeros ciclos de carga, lo cual puede ser debido a un proceso de densificación del balasto. Sin embargo, para ciclos superiores a 100.000, el módulo dinámico y la energía disipada por el sistema se mantienen prácticamente constantes hasta el millón de ciclos (número total de ciclos de carga), lo que indica un comportamiento estable de las suelas de neumáticos.

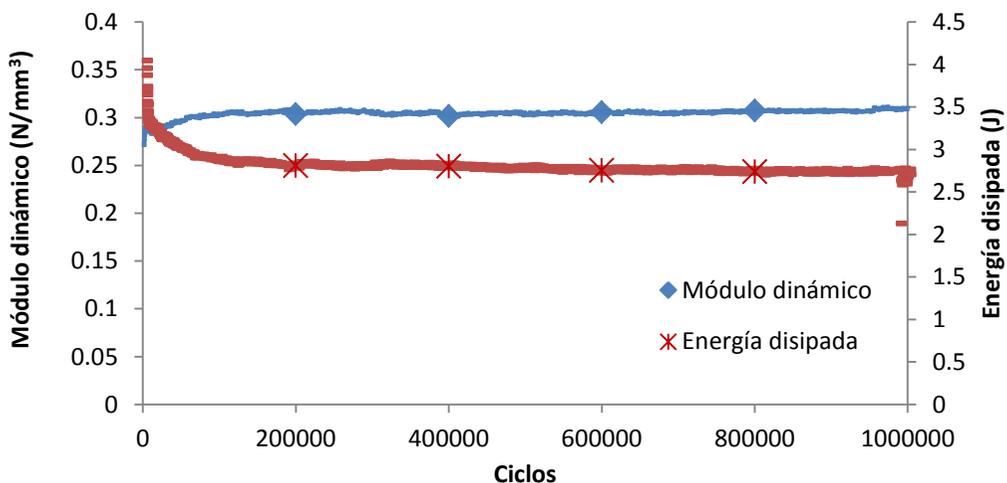


Figura 141: Evolución del comportamiento dinámico de suelas de neumáticos durante el proceso de fatiga.

A parte de la evolución del comportamiento del sistema durante el proceso de fatiga, la Tabla 27 muestra los valores de módulos y energía disipada en ensayos estáticos y dinámicos realizados antes y después del proceso de fatiga, pudiendo así evaluar la durabilidad del material. Los resultados muestran que la aplicación de cargas repetidas a largo plazo lleva al deterioro de la flexibilidad del material, dado que se incrementan los valores de los módulos

estáticos y dinámicos de rigidez. De igual modo, se puede ver que el proceso de fatiga provoca el descenso de la capacidad de las suelas de neumáticos para disipar la energía transmitida por lo vehículos a su paso por la vía.

No obstante, la totalidad de los parámetros analizados aumentan un porcentaje inferior a 15%, lo que muestra una adecuada aptitud del material para la aplicación de suelas de neumáticos en vías ferroviarias (de acuerdo con la normativa de ADIF y con las recomendaciones de la UIC, 2009).

Tabla 27: Variación del comportamiento de suelas de neumáticos como consecuencia del proceso de fatiga.

Parámetros	Variación del comportamiento de las suelas			
	$C_{1\text{ estat}}$	$C_{2\text{ estat}}$	$C_{\text{din } 5\text{Hz}}$	$C_{\text{din } 10\text{Hz}}$
Módulos rigidez (N/mm^3)				
Antes de fatiga	0,097	0,127	0,179	0,188
Después de fatiga	0,110	0,143	0,197	0,212
Variación (%)	13,40	12,59	10,00	12,76
$E. \text{ disipada } (J)$	Ensayo estático		Dinámico 5Hz	Dinámico 10Hz
Antes de fatiga	2,73		1,14	1,32
Después de fatiga	2,33		1,06	1,20
Variación (%)	-14,65		-7,02	-9,09

5.3.2.2 Deterioro climático

Por otra parte, para evaluar la durabilidad del material utilizado en la elaboración de suelas de neumáticos, la Tabla 28 recoge los cambios medidos en la resistencia a tracción (σ) y capacidad de elongación (ϵ) para probetas de halterio obtenidas a partir de la banda de rodadura de neumáticos, tras aplicarles un proceso de envejecimiento térmico y ciclos de hielo-deshielo y frío-calor. Este estudio se realiza de acuerdo a las especificaciones de ADIF para el uso de suelas bajo traviesa. Los valores negativos indican descenso de la propiedad, mientras que los positivos significan aumento de la resistencia o capacidad de elongación.

Los resultados indican que para el caso de la tensión máxima a tracción, los distintos procesos climáticos llevan al incremento de esta magnitud, siendo destacado el caso de las muestras sometidas a ciclos de hielo-deshielo. Por su parte, este último proceso junto al de frío-calor, también dan lugar al aumento de la capacidad de elongación del material, mientras que el envejecimiento térmico provoca el descenso de la capacidad de deformación del material.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

En base a estos resultados, a pesar de estos cambios de las propiedades mecánicas, las suelas de neumáticos podrían ser adecuadas para su uso en vías de ferrocarril, mostrando en general una apropiada resistencia a los agentes climáticos (salvo por la reducción de elongación tras el envejecimiento térmico). No obstante, se debe tener presente que estos datos pueden estar influenciados por el tipo de neumático empleado en el estudio, y por su dibujo de la huella (con mayor o menor número de acanaladuras de distintas dimensiones).

Tabla 28: Variación del comportamiento del material constituyente de las suelas debido a distintos procesos de deterioro climático.

Propiedades originales del material de las suelas		Variación de las propiedades del material					
		Env. Térmico		Ciclos frío-calor		Ciclos hielo-deshielo	
σ (MPa)	ϵ (%)	σ (%)	ϵ (%)	σ (%)	ϵ (%)	σ (%)	ϵ (%)
24,7	22,3	8,5	-39,5	1,2	2,7	33,8	20,6

5.3.3 Manta bajo balasto

Al igual que en los casos anteriores de placas y suelas de neumáticos, la durabilidad de las mantas bajo balasto es un parámetro fundamental para el desarrollo de estos elementos elásticos, siendo en este caso acentuada la importancia de la aptitud resistente dada la dificultad técnica y económica para su reemplazamiento. De esta forma, en este estudio se evalúa la aptitud resistente de mantas de neumáticos bajo un proceso de fatiga que simula las condiciones de trabajo de estos elementos, a la vez que se recoge su cambio de propiedades ante condicionantes climáticos esperados durante su vida útil.

5.3.3.1 Fatiga mecánica

La Figura 142 muestra las curvas tensión-desplazamiento vertical medidas en ensayos estáticos y dinámicos (a 5 Hz de frecuencia) realizados en una etapa previa y posterior al proceso de fatiga, pudiendo de esta forma analizar el cambio de comportamiento del material tras la aplicación repetida de cargas. En ambos casos, se comprueba que el proceso de fatiga lleva a la reducción de la capacidad de deformación de la manta elástica, incrementando así su rigidez.

No obstante, esta variación es inferior a 17,79% para el caso estático, y a 18,19% en el caso dinámico, lo que muestra la aptitud del material para su uso en vías ferroviarias (DIN 45673-5). De igual modo, al medir el cambio de la capacidad de las mantas para disipar la energía transmitida por los vehículos se

comprueba que la variación es inferior al 20%, lo que indica una adecuada durabilidad de la aptitud mecánica de estos componentes ferroviarios.

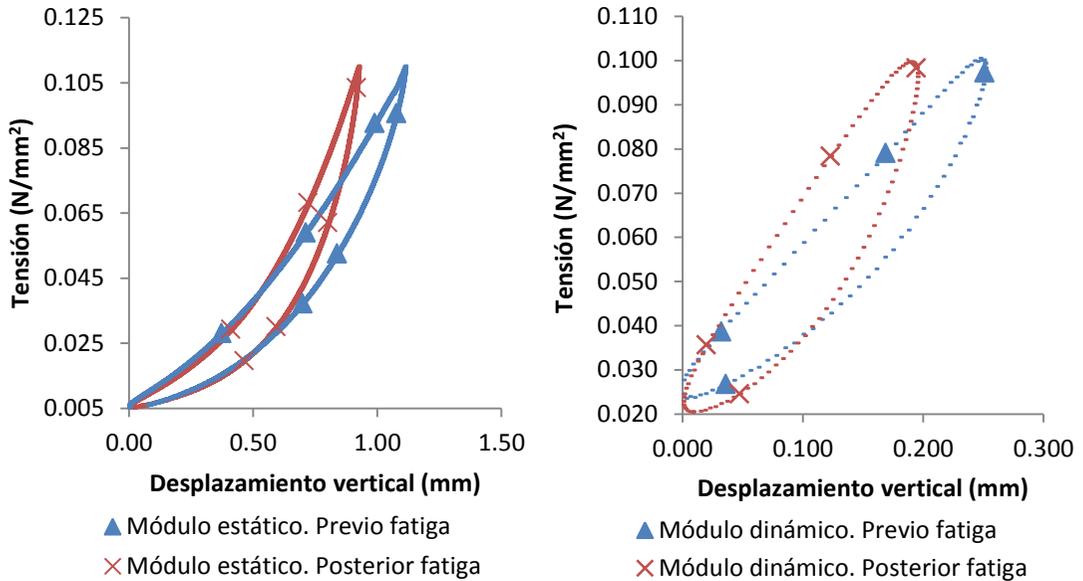


Figura 142: Curvas tensión-desplazamiento medidas en ensayos estáticos (izquierda) y dinámicos a 5Hz de frecuencia (derecha).

5.3.3.2 Deterioro climático

Para profundizar en el estudio de la durabilidad de las mantas de neumáticos, la Figura 143 muestra la variación de sus módulos de rigidez estáticos y dinámicos tras procesos de envejecimiento térmico, ciclos de hielo-deshielo y la acción a largo plazo del agua. Los resultados muestran que la presencia prolongada de agua lleva al descenso del módulo de rigidez, mientras que el efecto del calor da lugar a la rigidización del material, lo cual está en consonancia con los resultados obtenidos por otros autores (Carrascal et al., 2013) que han evaluado el deterioro de mantas elásticas fabricadas con polvo de neumáticos reutilizados. Además, en general estas variaciones se acentúan al incrementar la velocidad de carga, lo cual también puede estar asociado a la mayor rigidez del material.

Respecto al proceso de hielo-deshielo, la mayor variación de rigidez se presenta en régimen estático, siendo este valor superior al presentado por los otros procesos de deterioro climático, mientras que para el caso dinámico los mayores cambios se registraron para el proceso térmico (7 días a 70°C). Sin embargo, independientemente del proceso climático aplicado, los resultados

muestran que en términos generales las variaciones de rigidez del material son inferiores a 20%, lo cual denota la aptitud del material para su uso en vías ferroviarias, obteniendo una adecuada durabilidad de las mantas ante agentes atmosféricos de acuerdo con la DIN 45673-5 y DBS 918 071-01, y con los resultados obtenidos en otros estudios sobre el comportamiento de mantas (Carrascal et al., 2013).

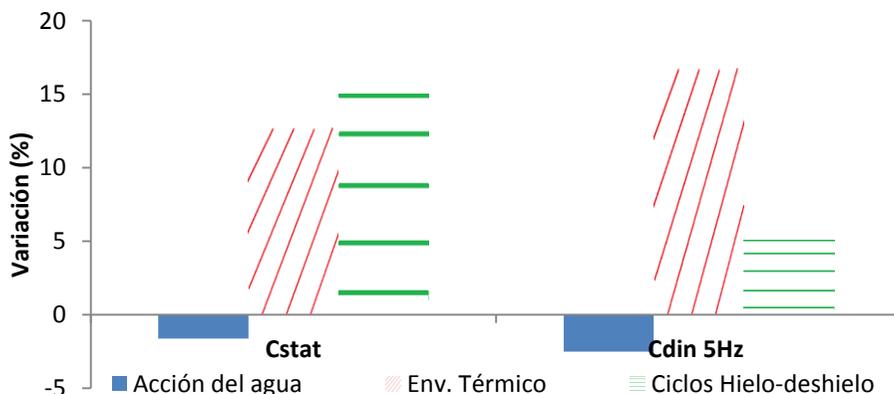


Figura 143: Variación del módulo estático y dinámico de muestras de mantas como consecuencia de la aplicación de distintos procesos de deterioro climático.

A partir de estos resultados, junto con los obtenidos en la evaluación de la aptitud resistente de las placas y suelas de neumáticos, se ha podido comprobar que en términos generales la elaboración de elementos elásticos mediante el uso de capas de rodadura de neumáticos fuera de uso (obtenidas por el proceso de deconstrucción) se presenta como técnica apropiada para conseguir componentes resistentes a las acciones esperadas para estos materiales en su aplicación en vías de ferrocarril. No obstante, dado que el empleo de elementos elásticos tiene como principal función variar la respuesta de la vía ferroviaria, es necesario completar el estudio de estos materiales elaborados con neumáticos usados mediante el análisis de su influencia en la respuesta de la vía.

5.4 Estudio de la influencia de los elementos de neumáticos en la respuesta de la vía

Una vez desarrollados los elementos de neumáticos y analizado su aptitud resistente, en esta sección se recoge un análisis del posible efecto que puede tener la introducción de elementos elásticos en la respuesta de la vía, hecho

fundamental para predecir el comportamiento del conjunto del sistema ante la aplicación de los materiales desarrollados en esta tesis.

Así, en primer lugar se presentan los resultados obtenidos en un estudio sobre cajón de balasto en el que se compara el comportamiento del sistema al introducir elementos de neumáticos con la respuesta del sistema sin estos elementos (salvo en el caso de las placas, que se utiliza como referencia una placa compuesta por material de alta rigidez).

Una vez conocido el efecto global de los elementos de neumáticos, se muestra, de forma particular, la influencia de las placas de neumáticos en la capacidad de la vía para atenuar cargas de impacto, a la vez que se analiza el efecto de las suelas en posibles variaciones de la resistencia lateral de la vía y en el cambio del área de contacto entre traviesa y partículas de balasto.

5.4.1 Influencia sobre cajón de balasto

Con el fin de evaluar la influencia de los elementos elásticos fabricados a partir de neumáticos desechados en la respuesta del conjunto de la vía, se presentan los resultados de la evolución de la rigidez vertical, energía disipada y asiento del sistema ferroviario sobre cajón de balasto, incorporando distintas soluciones elásticas: placa rígida (de material HDPE) usada como patrón de referencia; placa de neumático (NFU) apropiada para su uso en Alta Velocidad; placa NFU y suela de neumático bajo la traviesa; placa NFU y manta de neumático bajo la capa de balasto.

Se emplea como patrón de referencia una placa rígida (Figura 144) para poder apreciar con mayor claridad el efecto de las placas de neumático (NFU). Para los otros dos casos estudiados, de placa NFU más suelas bajo la traviesa o manta bajo balasto, se recoge la comparativa con el caso del sistema incorporando con sólo placa NFU (sin suela ni manta), con el fin de conocer el efecto de estos dos componentes elásticos.

La Figura 144 muestra el aspecto visual de los materiales analizados: placa rígida de referencia (a); placa (b), suela (c) y manta (d) de neumático.

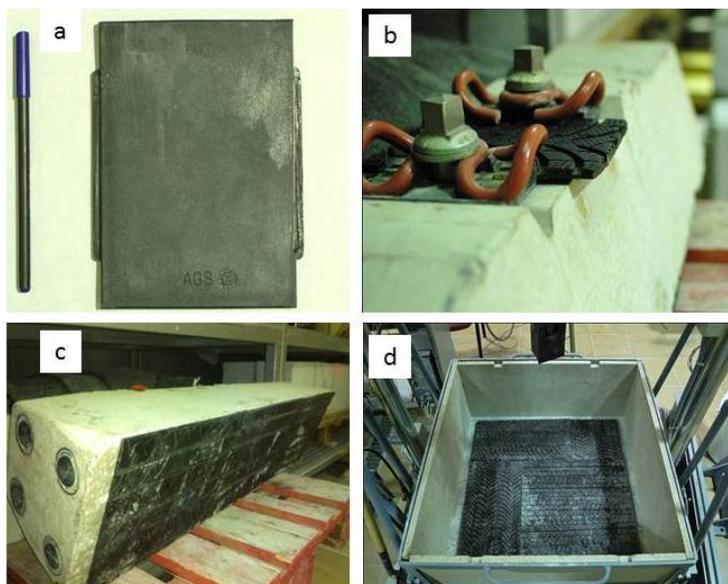


Figura 144: Aspecto visual de los elementos elásticos utilizados en el estudio de su influencia sobre cajón de balasto.

A partir de este análisis, en las Figuras 144 y 146 se comprueba que el empleo de placas de asiento de neumáticos (placa NFU) lleva al descenso de la rigidez del conjunto y al aumento de la energía disipada, en relación al comportamiento presentado al utilizar una placa de asiento comercial rígida. Esto está en consonancia con el hecho de utilizar placas de asiento blandas en vías de alta velocidad con el fin de reducir el exceso de rigidez vertical provocado por la disposición de mayor número y capas de asiento para incrementar la capacidad portante de la pista. De esta forma, el uso de placas de neumáticos permitiría reducir las sobrecargas dinámicas y la energía transmitida por los vehículos a capas inferiores, disminuyendo así el deterioro de la vía.

Los efectos de reducción de rigidez del conjunto y aumento de energía disipada al emplear placas de neumáticos, se ven ampliamente acentuados al emplear suelas NFU bajo traviesas y mantas NFU bajo balasto, llevando estas últimas a un considerable incremento de capacidad para disipar energía por parte del sistema, lo cual está relacionado con la alta deformabilidad registrada por estos materiales.

Además, al estudiar el caso de las mantas de neumáticos, se observó que la incorporación de este elemento lleva a ligero cambio de tendencia de la rigidez

del sistema y de la energía disipada, tal y como se muestra en las Figuras 145 y 146. Este hecho puede ser debido a la descompactación del balasto como resultado del efecto vibratorio con amplios desplazamientos verticales provocados por el uso de mantas flexibles.

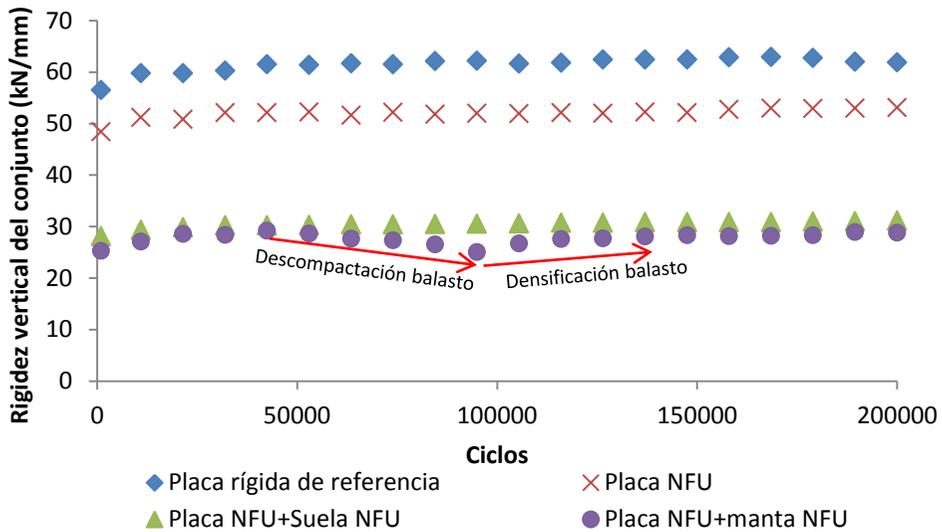


Figura 145: Evolución de la rigidez del conjunto ante la incorporación de distintas soluciones elásticas.

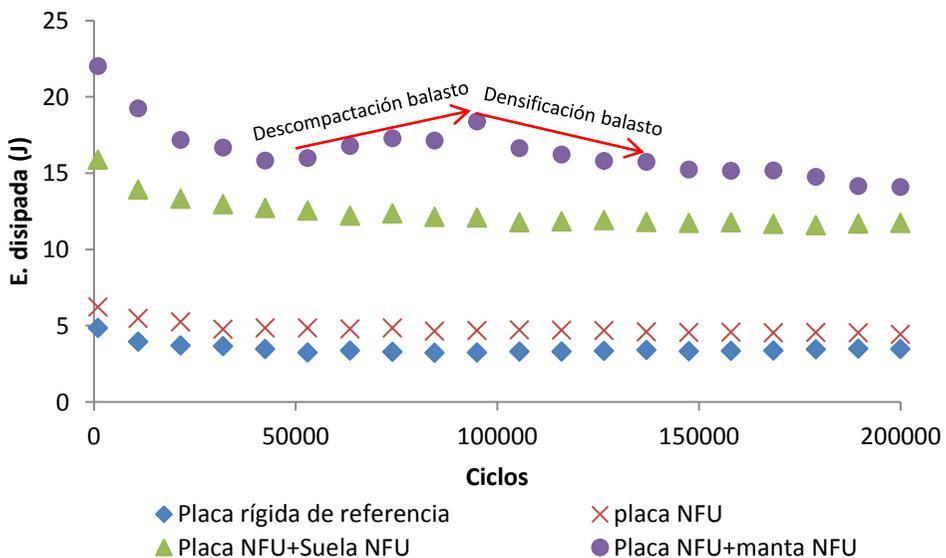


Figura 146: Influencia de los elementos de neumáticos en la energía disipada por ciclo de carga sobre el conjunto del cajón de balasto.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Para completar el análisis del efecto de los elementos de neumáticos en la respuesta del cajón de balasto, la Figura 147 muestra la evolución del asiento del conjunto sobre una capa de balasto de 35 cm. Los resultados indican que el uso de placas de neumáticos como placas de asiento da lugar al descenso del asiento total del sistema sobre balasto, en comparación con lo registrado para el caso de la placa comercial rígida. Además, este efecto se acentúa al disponer una suela de neumático bajo la traviesa. Este hecho puede estar asociado a la capacidad de amortiguación de cargas por parte de las suelas de neumáticos, lo que reduce la energía y presión transmitida al balasto.

Sin embargo, el empleo de mantas de neumáticos provoca un notable incremento del asiento del conjunto, lo que puede deberse a la posible descompactación de la capa de balasto por el efecto dinámico en un medio granular con baja rigidez como resultado la incorporación de mantas flexibles bajo el balasto. No obstante, se comprueba que el mayor asiento se produce en los primeros 120.000 ciclos de carga, los cuales corresponden a un comportamiento inestable de la capa de balasto (Idraratna et al. 2006), obteniendo posteriormente una respuesta más estable y menor pendiente de la evolución del asiento del sistema. Así, podría ser adecuado realizar un estudio en profundidad del comportamiento de mantas en un sistema a mayor escala, que permita reducir el efecto vibratorio.

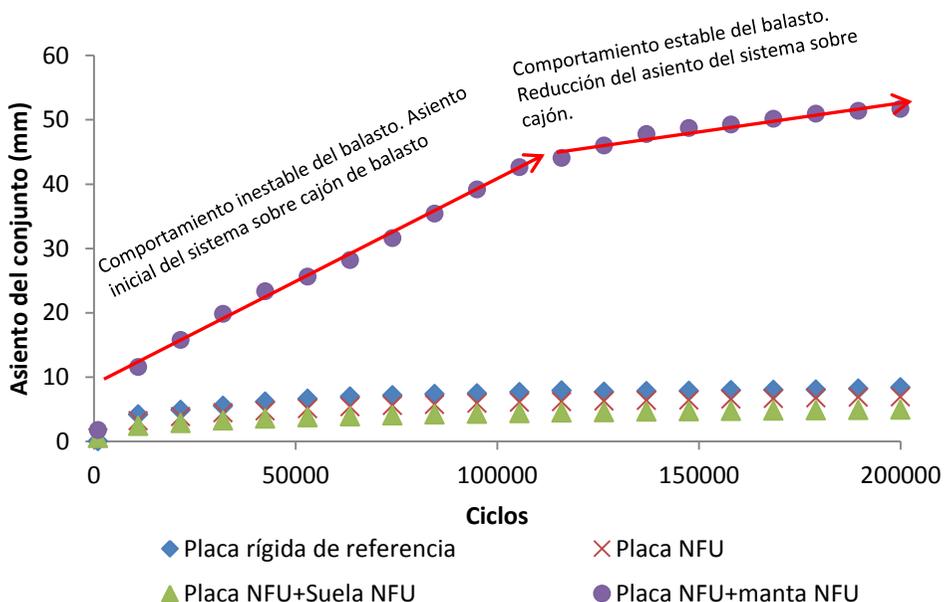


Figura 147: Efecto de los elementos de neumáticos en el asiento del balasto.

Para profundizar en el análisis del efecto de los elementos de neumáticos en el asiento del conjunto, la Tabla 29 muestra para las distintas soluciones elásticas un parámetro definido como “*Settlement Ratio per Load Cycle*” (SRLC, expresado en mm/ciclo de carga según la Ecuación 15; en español se define como Tasa de Asiento por Ciclo de Carga), obteniendo un valor medio para los últimos 80.000 ciclos (entre 120.000 y 200.000 ciclos) definidos como zona de comportamiento estable. Además, también se muestra el STLC calculado en los primeros 10.000 ciclos de dicha zona (entre 120.000 y 130.000 ciclos), así como en el tramo final (entre 190.000 y 200.000 ciclos).

$$SRLC = \frac{S_N - S_0}{N} \quad (15)$$

donde :

S_N y S_0 son el asiento (en mm) medido al final y al principio de la fase de ensayo considerado.

N es el número de ciclos de carga aplicados durante la fase de ensayo.

A partir de los resultados se comprueba que el SRLC medio disminuye al incorporar elementos de neumáticos (placas y suelas), en relación a la solución de referencia (placa comercial rígida), salvo en el caso de las mantas que se obtiene un notable incremento del STRC medio como consecuencia de la descompactación de la capa de balasto. Sin embargo, este último caso presenta una importante reducción del STRC entre el inicio y el final de la zona estable de comportamiento del sistema. Esto indica una tendencia a la estabilización del conjunto al incorporar mantas de neumáticos. Además, esta diferencia entre el inicio y el final también es más acentuada en el caso de utilización de placas de NFU y placas NFU+suelas, lo que muestra que la incorporación de elementos de neumáticos lleva a menor asiento de la vía a largo plazo, en comparación con el conjunto tradicional con placa rígida.

Tabla 29: Resultados del parámetro SRLC para las distintas soluciones elásticas estudiadas en cajón de balasto.

Solución elástica	SRLC (mm/ciclo de carga) $\times 10^{-6}$		
	Media	Inicio	Final
Placa comercial rígida	9,88	19,32	18,7
Placa NFU	9,00	10,69	5,72
Placa NFU+suela	5,26	7,41	4,95
Placa NFU+manta	77,79	183,54	31,42

En base a estos resultados, se debe de considerar que el empleo de placas de neumáticos permite mejorar la respuesta del conjunto sobre cajón de balasto en relación al comportamiento del sistema al utilizar una placa rígida de referencia. Además, estos beneficios se podrían ver acentuados al disponer suelas de neumáticos bajo traviesas. Sin embargo, en el caso de las mantas sería necesario profundizar en el estudio del efecto de este elemento, dado que se obtuvieron valores de asiento del conjunto excesivos para su uso en vías de Alta Velocidad, pudiendo deberse a la flexibilidad del sistema sobre cajón de balasto.

5.4.2 Atenuación de impactos

Una vez vista la influencia de los elementos elásticos en la respuesta general del sistema, en esta sección se presenta el caso particular del efecto de las placas de neumáticos en la capacidad de la vía para atenuar los impactos provocados por la presencia de irregularidades en el carril o las ruedas de los trenes.

Este análisis se realiza solamente para las placas de asiento dado que son los elementos elásticos más influyentes debido a que son los más cercanos al contacto rueda-carril. Así, para evaluar el efecto de los elementos de neumáticos en la atenuación de impactos, se analiza la influencia de emplear placas procedentes de capas de neumáticos frente a placas comerciales rígidas utilizadas como referencia, según la UNE-EN 13146-3.

Así, la Figura 148 muestra las curvas de desplazamientos medidos en la parte superior (ϵ_s) e inferior (ϵ_i) de una traviesa, bajo la zona de asiento del carril donde se dispone una placa de neumático (PN), y una placa de referencia tipo rígida (PR, rigidez estática superior a 2500 kN/mm).

Además, la Tabla 30 recoge la magnitud de estos valores medidos para 5 ensayos, a partir de los cuales se obtiene la capacidad de atenuación de la placa de neumático, en relación a la placa rígida usada de referencia, para la parte superior (a_s) e inferior (a_i) de la traviesa (calculados de acuerdo a la Ecuación 16), así como su valor medio (capacidad de atenuación).

$$a_s = 100 \left(1 - \frac{\epsilon_s PN}{\epsilon_s PR} \right) \% ; \quad a_i = 100 \left(1 - \frac{\epsilon_i PN}{\epsilon_i PR} \right) \% ; \quad a = \frac{(a_s + a_i)}{2} \% \quad (16)$$

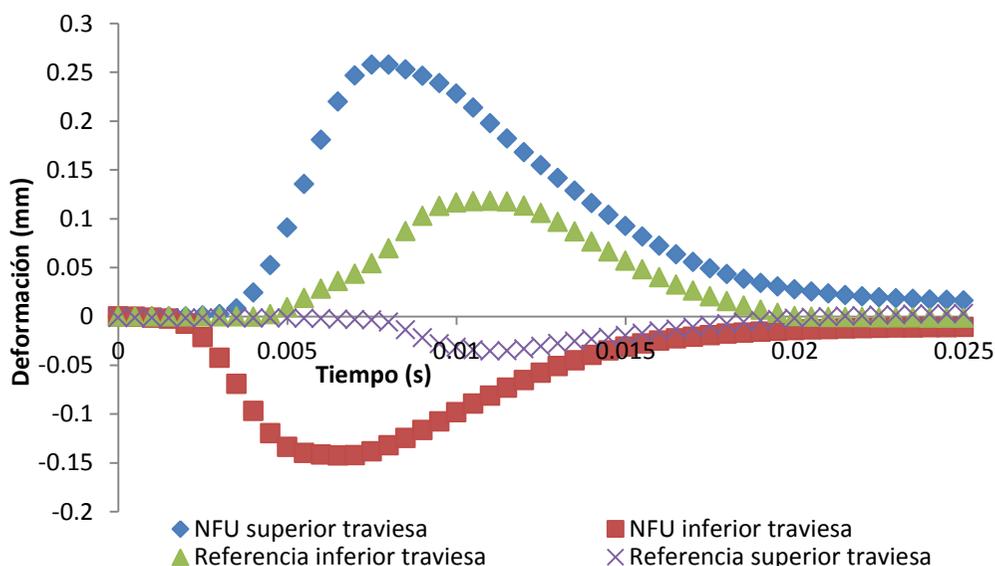


Figura 148: Resultados de deformación de la zona superior e inferior de la traviesa al utilizar placas de neumáticos y placas de referencia.

Los resultados indican que el uso de placas de neumáticos proporciona un valor apropiado de atenuación de impactos ($a=61,38\%$) para su uso en vías ferroviarias tanto convencionales como de alta velocidad, ya que este valor es superior a los resultados obtenidos por otros investigadores (Kaewunruen y Remennikov, 2008b; Carrascal et al., 2011) para placas convencionales elaboradas con material HDPE (atenuación próxima a 50%) y para placas usadas en Alta Velocidad de material TPE (atenuación igual a 54,6%).

Tabla 30: Resultados de atenuación de impactos para placas de neumáticos, en referencia a una placa patrón de material rígido.

Ensayo	1	2	3	4	5	Media	Atenuación placa de neumático
Superior (%)	52,730	60,856	68,553	62,079	52,529	59,35	$a = \frac{59,35 + 63,41}{2}$ <p>a=61,38%</p>
ϵ_s PN (mm)	0,116	0,128	0,091	0,124	0,122	Superior (a_{sup}) (%)	
ϵ_s PR (mm)	0,245	0,327	0,286	0,327	0,257		
Inferior (%)	78,535	57,515	58,523	63,602	58,878	63,41	
ϵ_i PN (mm)	0,017	0,034	0,052	0,029	0,035	Inferior (a_{inf}) (%)	
ϵ_i PR (mm)	0,081	0,081	0,121	0,081	0,085		

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Además, dado que este valor es muy superior al límite inferior establecido por las especificaciones españolas para Alta Velocidad (ADIF), el uso de placas de neumáticos podría reducir el deterioro de la vía producido por las sollicitaciones de elevada magnitud que se producen por los impactos entre ruedas y carril, reduciendo así los costes de mantenimiento de la vía.

5.4.3 Contacto traviesa-balasto

Por parte de las suelas de neumáticos, estos elementos pueden modificar la superficie de contacto entre las traviesas y la capa de balasto. Para analizar este efecto, la Tabla 31 muestra el porcentaje de área de contacto entre las partículas de balasto y bloques de hormigón con y sin suelas de neumáticos.

Los resultados indican que la utilización de los elementos elásticos lleva a un incremento (próximo a 10,00%) del área de contacto entre ambos materiales, lo que pone de manifiesto que la utilización de suelas de neumáticos podría dar lugar a una mejor distribución de las tensiones transmitidas a la capa de balasto, reduciendo así el deterioro de este componente.

Estos resultados de incremento de área son ligeramente inferiores a los registrados por otros autores (Müller-Borutta et al., 2001), pudiendo estar relacionado con la geometría (dibujo) de la huella de los neumáticos usados en la elaboración de las suelas. No obstante, a pesar de obtener resultados inferiores a los presentados en otros estudios (superiores a 18%), la Figura 149 muestra un notable incremento del área de contacto, permitiendo así mejorar la respuesta de la vía.

Tabla 31: Resultados de la influencia de suelas en el área de contacto traviesa-balasto.

Tipo de muestra	Nº muestra	Área contacto (%) (muestras de 300x300 mm)	Valor medio (%)	Coficiente variación (%)
Bloque de hormigón con suela	1	12,33	12,14	2,19
	2	11,95		
Bloque de hormigón sin suela	1	2,29	2,51	12,77
	2	2,74		

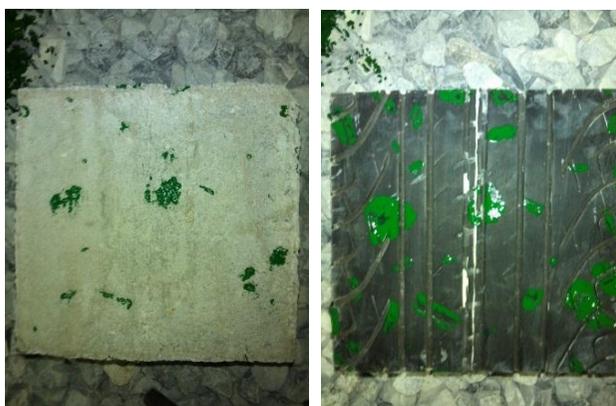


Figura 149: Aspecto visual del área de contacto entre un bloque de hormigón (que simula la traviesa) y el balasto (imagen de la izquierda) y entre el bloque con suela y el balasto (derecha).

5.4.4 Desplazamiento lateral

La disposición de suelas elásticas en la cara inferior de las traviesas también puede modificar la respuesta lateral del sistema como consecuencia de la variación en el contacto traviesa-balasto. Así, la Tabla 32 muestra los valores de esfuerzo lateral máximo (aplicados con un ángulo de 15°) para producir un desplazamiento horizontal de 2 mm, registrados para muestras de bloques de hormigón que simulan las traviesas, con y sin suela de neumáticos.

Los resultados indican que las muestras con suelas dan lugar a un valor medio de esfuerzo lateral superior al medido para bloques sin suelas. Sin embargo, al analizar los datos obtenidos para las distintas muestras, se comprueba que algunos bloques de hormigón sin suela registran mayores valores de esfuerzo que algunas muestras con suelas. Esto pone de manifiesto una elevada variabilidad de resultados, lo que puede ser debido a las irregularidades de la capa de balasto, así como su grado de compactación y la superficie de contacto entre las muestras (bloques de hormigón con o sin suela de neumático) con las partículas granulares. No obstante, este hecho de variabilidad de resultados ya ha sido puesto de manifiesto en otros estudios europeos (recogidos en los documentos de la UIC, 2009; UIC, 2013) centrados en tratar de determinar la influencia de las suelas de neumáticos en la resistencia lateral de la vía.

De esta forma, podría ser necesario profundizar en el análisis de laboratorio para este parámetro, así como estudios a escala real. No obstante, los resultados ponen de manifiesto que la utilización de suelas de neumáticos no lleva a un importante descenso de la resistencia lateral del sistema, lo cual las hace susceptibles de ser utilizadas como elementos elásticos bajo las traviesas.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Tabla 32: Resultados del efecto de las suelas de neumáticos en la resistencia lateral del sistema sobre capa de balasto.

Tipo de muestra	Nº muestra	Fuerza horizontal máxima (kN) <i>(para 2 mm desplazamiento)</i>	Valor medio (kN)
Bloque de hormigón con suela	1	1,11	1,41
	2	1,19	
	3	1,92	
Bloque de hormigón sin suela	1	1,60	1,16
	2	0,48	
	3	1,41	

Por otra parte, la Figura 150 presenta la acumulación media del desplazamiento lateral registrado durante la aplicación de cargas dinámicas inclinadas, sobre los bloques con suelas y sin suelas. Se puede ver el empleo de suelas de neumáticos podría llevar al descenso de los desplazamientos ante el paso de los vehículos, mejorando así la calidad geométrica a largo plazo de la vía. Además, se aprecia que para el caso de los bloques con suela, el mayor incremento de los desplazamientos laterales se produce en los primeros ciclos de carga, tendiendo posteriormente a estabilizarse el movimiento del conjunto. No obstante, al igual que en el estudio estático, sería interesante desarrollar un estudio con mayor profundidad (como por ejemplo en tramos de pruebas de vías ferroviarias) sobre la influencia de las suelas en la resistencia lateral del sistema.

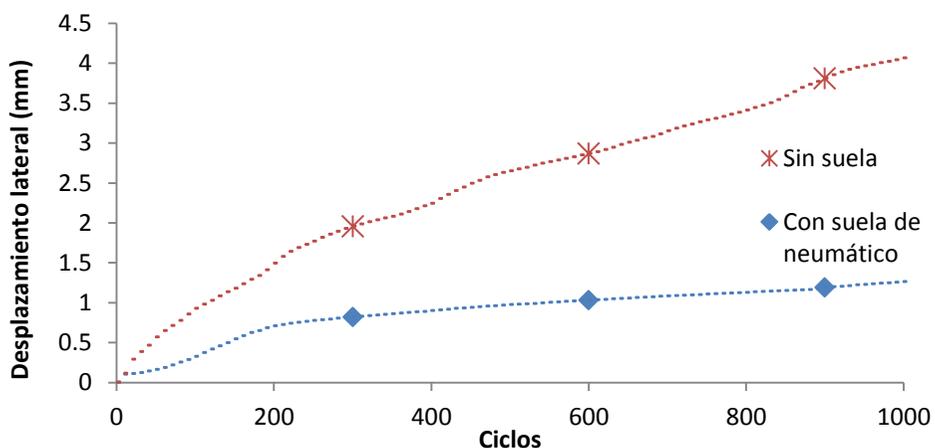


Figura 150: Comparativa entre el desplazamiento lateral de un bloque de hormigón con y sin suela sobre una capa de balasto.

En base a los resultados obtenidos en los diferentes estudios de la influencia de los elementos elásticos en el comportamiento de la vía (análisis en cajón de balasto, atenuación de impactos, contacto traviesa-balasto, y resistencia lateral del conjunto sobre capa de balasto), la Tabla 33 resume el efecto de introducir los diferentes elementos elásticos desarrollados. Se indica el porcentaje de modificación en relación a las configuraciones de referencia: placa rígida para la evaluación del efecto de placas de neumáticos; sistema sin elemento elástico bajo traviesa, para el caso de las suelas; y cajón de balasto sin componente elástica en el fondo, para evaluar la influencia de las mantas.

Tabla 33: Resumen de la influencia de los distintos elementos de neumáticos en la respuesta de la vía.

Estudio	Parámetro	Placas de asiento	Suelas bajo traviesa	Mantas bajo balasto
Cajón de balasto	<i>Rigidez</i>	Descenso (-16,4%)	Descenso (-41,6%)	Descenso (-45,1%)
	<i>E. disipada</i>	Aumento (28,6%)	Aumento (160,1%)	Aumento (237,7)
	<i>Asiento balasto</i>	Descenso (-19,7%)	Descenso (-11,3%)	Aumento (843,4%)
Atenuación de impactos	<i>Capacidad de atenuación</i>	Aumento (61,4%)	-	-
Contacto traviesa-hormigón	<i>Área de contacto</i>	-	Aumento (380%)	-
Resistencia lateral de la vía sobre balasto	<i>-Fuerza máxima</i>	-	Aumento (17,7%)	-
	<i>-Desplazamiento</i>	-	Descenso (-241,6%)	-

De esta forma se comprueba que las mayores variaciones de rigidez y energía disipada en el cajón de balasto se obtienen cuando las suelas o mantas son utilizadas, aunque el uso de este último elemento puede provocar importantes asientos del balasto debido al efecto vibratorio inducido en las partículas de balasto, mientras que las placas y suelas también tienen un efecto beneficioso desde el punto de vista de este parámetro (asiento de vía).

Además, las placas de asiento aumentan la capacidad de la vía para atenuar el efecto de las cargas de impacto derivadas de irregularidades en algunos componentes como carril y/o ruedas de vehículos. De igual modo, el uso de suelas de neumáticos puede aumentar el contacto traviesa-balasto y la

resistencia lateral del conjunto, aunque se ha visto que en el análisis de este último parámetro se obtiene una elevada variabilidad de resultados (al igual que en otros estudios recogidos por la UIC), por lo que sería interesante profundizar en este análisis mediante su estudio en vías de ferrocarril a escala real.

5.5 Comprobación del cumplimiento de la normativa española

Una vez desarrollados los elementos elásticos a partir de capas de neumáticos usados, y evaluada su capacidad resistente y posible influencia sobre el comportamiento de la vía, en esta sección se recoge un análisis de la aptitud de estos elementos en referencia a las exigencias mecánicas establecidas por el principal administrador ferroviario español (ADIF). En primer lugar se presenta el caso de las placas de neumáticos, para su uso tanto en vías convencionales como de alta velocidad, seguido del caso de las suelas y mantas de neumáticos, realizando este estudio sólo para la normativa de alta velocidad dado que es la disponible actualmente, y debido a que estos dos últimos elementos son utilizados principalmente en Alta Velocidad.

5.5.1 Placas de asiento

Para homologar la aptitud mecánica de las placas de neumáticos para su aplicación en vías ferroviarias, de acuerdo a la normativa española, se toman como referencia las especificaciones técnicas de ADIF denominadas como E.T.03.324.005.2 para vías convencionales, y la E.T.03.360.570.0 para Alta Velocidad.

5.5.1.1 Normativa para vía convencional

En referencia al uso de placas de neumáticos en vías convencionales, Figuras 151 y 152 muestran las curvas de carga-desplazamiento medidas en un ensayo de compresión entre 5 kN y 200 kN, para placas de neumáticos con 4,5 mm de espesor y otras con 9,0 mm, respectivamente, siendo estos valores de espesor seleccionados de acuerdo a la E.T. 03.324.005.2 de ADIF para este tipo de vías.

Los resultados muestran que las curvas medidas quedan dentro de los límites establecidos por la especificación técnica de ADIF para placas de caucho de asiento de carril (E.T. 03.324.005.2), obteniendo un comportamiento más homogéneo en el caso de las placas de 9,0 mm de espesor, lo cual puede estar relacionado con la menor rigidez por parte de estos materiales. En base a estos resultados, para sistemas de sujeción que permitan disponer este tipo de placas

de asiento, el uso de placas de neumáticos con espesor de 9,0 mm podría llevar a la mejora de las prestaciones mecánicas y de servicio de la vía ferroviaria, mientras que las placas con 4,5 mm podrían ser utilizadas en infraestructuras que requieran elementos elásticos con menor flexibilidad y menor capacidad para deformarse, dado que éstas registran menores valores de desplazamiento vertical.

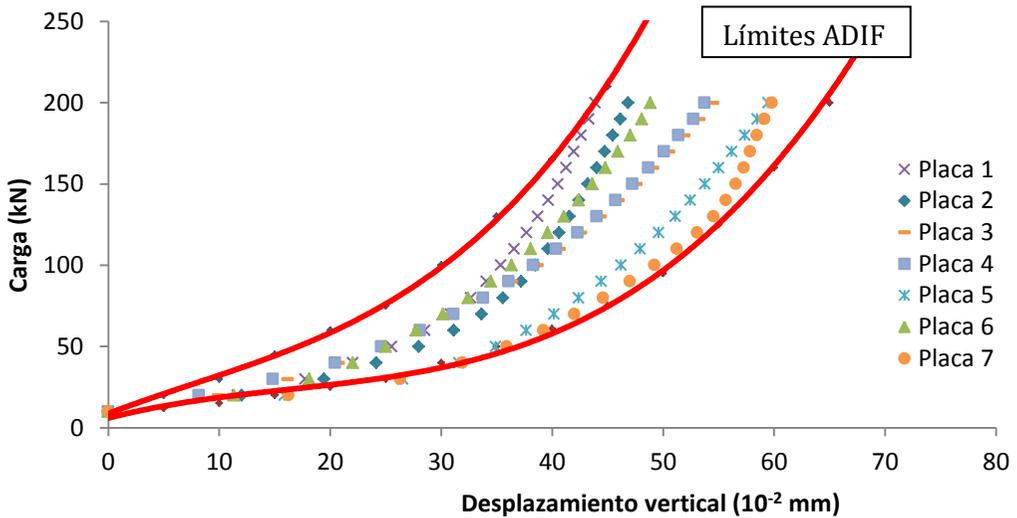


Figura 151: Curvas de deformación vertical para placas de neumáticos con espesor próximo a 4,5 mm.

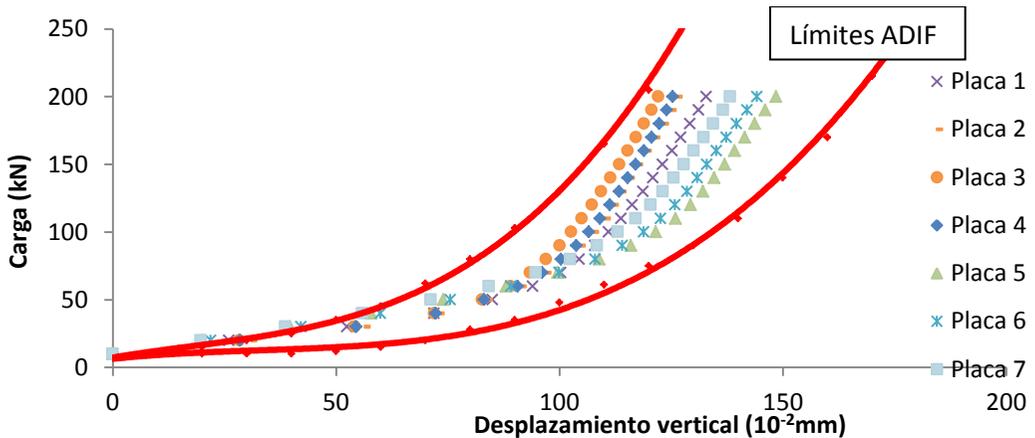


Figura 152: Curvas carga/deformación vertical de placas con 9,0 mm de espesor. Ensayo desarrollado de acuerdo a la E.T. 03.324.005.0 de ADIF.

Así, en base a estos estudios, se comprueba que las placas elásticas fabricadas a partir de capas de neumáticos podrían ser homologadas para su uso como elementos elásticos bajo carril en vías convencionales.

5.5.1.2 Normativa para Alta Velocidad

Por otra parte, de acuerdo a la E.T. 03.360.540.0 de ADIF, las placas de asiento deben ser del tipo blandas para su uso en Alta Velocidad, con el fin de reducir el exceso de rigidez vertical de este tipo de infraestructuras (López Pita, 2006). Además, estas especificaciones técnicas indican que el espesor de las placas debe de ser próximo a 7,0 mm, dado que es la dimensión más apropiada para el sistema de sujeción tipo HM que es el indicado en dicha normativa.

Sin embargo, en la etapa de estudio de la influencia de los parámetros de diseño, se pudo ver que para el caso de las placas de neumático el rango de espesores para placas blandas queda fijado entre 7,5 mm y 9,0 mm. De esta forma, se utilizan placas con 7,5 mm de espesor dado que es el valor más próximo al indicado por la normativa para Alta Velocidad. A pesar de esta diferencia de espesor, las placas de neumáticos podrían ser utilizadas mediante el empleo de otro tipo de sujeciones que permitan mayor espesor de placa.

La Tabla 34 muestra los resultados medios registrados para 10 placas de neumáticos en relación a las exigencias mecánicas propuestas por la especificación técnica de ADIF. Se comprueba que las placas de neumáticos presentan una respuesta mecánica apropiada para su uso en vías de Alta Velocidad, pudiendo destacar la elevada durabilidad del material en relación al límite establecido por la normativa, así como su amplia capacidad para atenuar impactos.

De esta forma, se comprueba que las placas de neumáticos cumplen con las exigencias de ADIF para su homologación de uso en Alta Velocidad. No obstante, para la generalización de su uso podría ser necesario recurrir a otro tipo de sujeción, o evaluar en mayor profundidad la posibilidad de emplear placas de 7,5 mm en la sujeción tipo HM, sin que se reduzca su capacidad elástica y su resistencia para ejercer la fuerza de apriete necesaria.

Tabla 34: Resumen de la respuesta de placas de neumáticos en relación a las especificaciones de ADIF para Alta Velocidad.

Ensayos		Placas de neumático	Límites ADIF	Cumplimiento normativa
Rigidez secante a 80 kN (kN/mm)		96,52	<150	✓
Rigidez secante 20-95 kN (kN/mm)		107,09	80<k<125	✓
Rigidez secante 100-200 kN (kN/mm)		267,94	<300	✓
Rigidez dinámica (kN/mm)		466,90	-	-
Fatiga convencional, carga inclinada	Incremento rigidez estática (%)	15,25	<25,00	✓
	Desplazamiento cabeza Fmax. (mm)	0,279	<1,00	✓
	Desplazamiento cabeza Fmin. (mm)	0,036	<1,00	✓
	Desplazamiento patín Fmax. (mm)	0,049	<0,50	✓
	Desplazamiento patín Fmin. (mm)	0,026	<0,50	✓
Atenuación impactos (%)		61,38	>25,00	✓

5.5.2 Suelas bajo traviesa

Para el caso de las suelas de neumáticos, se emplea la especificación de ADIF (E.T. 03.360.574.2) para el uso de suelas bajo traviesas en vías de Alta Velocidad. Se utiliza esta normativa dado que en nuestro país, este tipo de elementos elásticos se usa casi exclusivamente en zonas de cambios de rigidez en vías destinadas para alta velocidad, las cuales requieren elevados índices de calidad geométrica.

5.5.2.1 Normativa para Alta Velocidad

La Tabla 35 recoge un resumen de las prestaciones mecánicas medias para 15 suelas de neumáticos con espesor entre 5,0 y 11,0 mm, en función de las exigencias establecidas por la especificación (E.T. 03.360.574.2) de ADIF. El uso de estas suelas permitiría embeber en el hormigón de las traviesas un mínimo de 2-3 mm, dado que la normativa indica que el elemento elástico debe sobresalir entre 3,0 y 8,0 mm a lo largo de toda la superficie de apoyo de la traviesa, teniendo un espesor máximo de 15,0 mm.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Los resultados muestran que el módulo estático presentado por las suelas de neumáticos es inferior al establecido por la normativa empleada, por lo que podría ser necesario desarrollar distintos tratamientos del material para incrementar su rigidez vertical. Así, la aplicación de un proceso de envejecimiento térmico permitiría incrementar la rigidez del material hasta casi un 30%, de acuerdo a los resultados obtenidos en esta tesis doctoral. No obstante, estos resultados pueden estar influenciados por el tipo de placa de balasto empleada en el estudio de laboratorio, según lo indicado por Iliiev en su tesis doctoral sobre el efecto de usar suelas elásticas bajo traviesa (2012).

Por parte de la resistencia a la fatiga y al deterioro climático, estos valores se encuentran dentro de los límites establecidos por ADIF, lo que pone de manifiesto una adecuada resistencia a la degradación por parte del material. En cuanto a la resistencia de la unión entre suela y hormigón de la traviesa, este parámetro es inferior al prescrito por ADIF, por lo que sería conveniente desarrollar algún tipo de unión más efectivo entre las suelas y el hormigón. No obstante, este factor se podría ver influenciado por la dimensión de las probetas usadas (bloques de hormigón de 300 mm x 300 mm). Así, este parámetro sería apropiado medirlo sobre suelas unidas a traviesas a nivel industrial, además de los bloques de hormigón con suela estudiados en esta tesis doctoral.

Tabla 35: Resumen de las propiedades de las suelas de neumáticos en relación a las prescripciones de ADIF para su uso en Alta Velocidad.

Ensayos	Suelas de neumático	Límites ADIF	Cumplimiento normativa
Módulo estático entre 0,01-0,10 N/mm ² (N/mm ³)	0,08-0,16	0,20 < k < 1,50	✗
Módulo dinámico a 10Hz entre 0,01-0,10 N/mm ² (N/mm ³)	0,14-0,23	-	-
Refuerzo (C _{din 10Hz} /C _{est})	1,31-1,84	-	-
Resistencia a la fatiga (Variación módulo estático, %)	13,40	<15,00	✓
Resistencia al deterioro climático (Cambio resistencia tracción, %)	>1,20	>-20	✓
Resistencia al arrancamiento (kg)	193	300	✗

A pesar de no cumplir las exigencias de ADIF para Alta Velocidad debido a los valores de rigidez, de acuerdo con otras experiencias y estudios europeos en vías con diferentes características de diseño, este tipo de suelas (blandas) podría ser apropiado para mitigar diversos problemas en vías de ferrocarril. Así, Krüger (2007) mostró que el uso de suelas blandas con valores de rigidez similares a los presentados por las suelas de neumáticos, da lugar a un notable descenso de la tensión y energía transmitida al balasto, lo que reduce su deterioro.

De igual modo, en una experiencia desarrollada en un tramo en curva en la línea austriaca Markerdorf, el uso de suelas con rigidez próxima a la presentada por las suelas de neumáticos permitió reducir el fenómeno de corrugación de carril (Schilder, 2006). En cuanto a las vibraciones, en diversas líneas europeas (como Waghäusel, Timelkam, Nüziders, Baden o Mattsetten-Rothrist) se han usado suelas con similares valores de módulo de rigidez, consiguiendo en general importantes pérdidas de inserción sonora para un amplio rango de frecuencias. Así, en base a estos estudios y experiencias, el uso de suelas de neumáticos podría ser apropiado para mitigar diversos problemas en infraestructuras ferroviarias.

5.5.3 Mantas bajo balasto

Por parte de las mantas de neumáticos, para comprobar su aptitud de homologación se presenta una comparación entre su comportamiento mecánico y las principales exigencias recogidas en la normativa DIN 45673-5, siendo ésta empleada dado que es la adoptada como referencia por ADIF en pliegos de prescripciones técnicas para la construcción de algunos tramos de vía ferroviaria para Alta Velocidad, el cual es el tipo de infraestructuras más habituales para el uso de estos componentes elásticos.

5.5.3.1 Normativa para Alta Velocidad

En referencia a la normativa DIN 45673-5, la Tabla 36 recoge los resultados de las características mecánicas de 15 muestras de mantas de neumáticos con espesores comprendidos entre 21,0 mm y 44,0 mm, dado que este rango de grosor es el más apropiado para el uso de mantas en Alta Velocidad, a la vez que es inferior a 50,0 mm (espesor máximo establecido por ADIF).

Los resultados muestran que las mantas de neumáticos presentan valores de rigidez tanto estática como dinámica superiores a los establecidos por ADIF, aunque esto puede estar relacionado con el tipo de placa de balasto empleada en el estudio, dado que en otros estudios (Iliev, 2012) se ha puesto de

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

manifiesto la notable influencia de este factor en los resultados de laboratorio, así como en la variabilidad de los mismos (Carrascal et al., 2013). En cuanto a las propiedades de degradación del material, se comprueba que tanto la resistencia a la fatiga como al deterioro climático son apropiadas para el uso de estos componentes de acuerdo a las especificaciones de ADIF.

Tabla 36: Resumen de las características de las mantas de neumáticos en referencia a las exigencias de ADIF para Alta Velocidad.

Ensayos	Mantas de neumático	Límites ADIF	Cumplimiento normativa
Módulo estático entre 0,02-0,10 N/mm ² (N/mm ³)	0,04-0,07	<0,03	✗
Módulo dinámico a 10Hz entre 0,02-0,10 N/mm ² (N/mm ³)	0,10-0,15	<0,05	✗
Refuerzo (C _{din 10Hz} /C _{est})	1,68-2,36	-	-
Resistencia a la fatiga (Variación módulo estático, %)		<20,00	✓
Resistencia al deterioro climático (Variación módulo estático, %)	15,04	<20,00	✓

No obstante, a pesar de no cumplir los valores de los módulos de rigidez con las exigencias de ADIF para Alta Velocidad, podría estudiarse la posibilidad de su utilización en otro tipo de vías distintas a las de ADIF dado que su durabilidad es adecuada. Así, a partir de la bibliografía consultada se ha comprobado que mantas con módulo de rigidez estática superior a 0,04 N/mm³ han sido utilizadas en otro tipo de vías a nivel europeo para reducir el efecto de algunos problemas singulares.

Según la UIC (Code 719-1, 2011), mantas con módulo de rigidez próximo a 0,06 N/mm³ son efectivas para reducir las vibraciones transmitidas a la estructura (especialmente en las frecuencias de 63 Hz y 125 Hz), lo cual también fue puesto de manifiesto en experiencias desarrolladas por la administración suiza (SBB) y por la Deutsche Bahn alemana. De igual modo, este último administrador ha utilizado mantas con módulo próximo a 0,10-0,15 N/mm³ para reducir el efecto de los cambios de rigidez en tramos de transición (Kleinert et al., 2006). Por otra parte, en la línea Hannover-Würzburg, se emplearon este tipo de mantas para proteger las capas subyacentes al balasto y reducir su deterioro (Dold y Potocan, 2013).

De esta forma, se desprende que independientemente del hecho de que las mantas de neumáticos no cumplan las exigencias de ADIF para Alta Velocidad, su uso podría ser aconsejado para mejorar el comportamiento de vías de ferrocarril convencionales u otro tipo de infraestructuras a nivel europeo, ya que diversas experiencias en líneas de Europa han empleado este tipo de mantas (con rigidez superior a $0,04 \text{ N/mm}^3$).

5.6 Comparativa con elementos comerciales

Tras evaluar la aptitud de los elementos de neumáticos para su homologación de acuerdo con la normativa de ADIF, se ha podido ver que las placas de asiento son el único elemento que cumple las especificaciones de ADIF para vías convencionales y de Alta Velocidad (aunque se ha comprobado que las suelas y mantas de neumáticos podrían ser apropiadas para otro tipo de infraestructuras ferroviarias de acuerdo con los resultados registrados en otros estudios y experiencias).

Así, para completar el desarrollo de las placas de neumáticos, se presenta un análisis comparativo entre estos elementos y algunas placas comerciales utilizadas de forma habitual en vías ferroviarias tanto convencionales como de Alta Velocidad, pudiendo de esta forma conocer la respuesta de los elementos de neumáticos en referencia a productos elásticos existentes en el ámbito del ferrocarril.

Para el caso de vía convencional, se muestran los resultados de comparar el comportamiento de placas comerciales fabricadas a partir de polvo de neumáticos triturados mezclado con resina, con los registrados para placas de neumáticos deconstruidos, teniendo ambos tipos de placas un espesor igual a 4,5 mm, y similar geometría (Figura 153, a). Respecto al caso de la Alta Velocidad, se compara la respuesta de placas de neumáticos deconstruidos, con la presentada por placas comerciales elaboradas con elastómeros termoplásticos (TPE), las cuales son empleadas en algunas líneas de alta velocidad española (por ejemplo en la línea Madrid-Barcelona). Estos dos últimos tipos de placas (Figura 153, b) estudiados para el caso de Alta Velocidad, tienen un espesor próximo al especificado por ADIF para este tipo de placas.

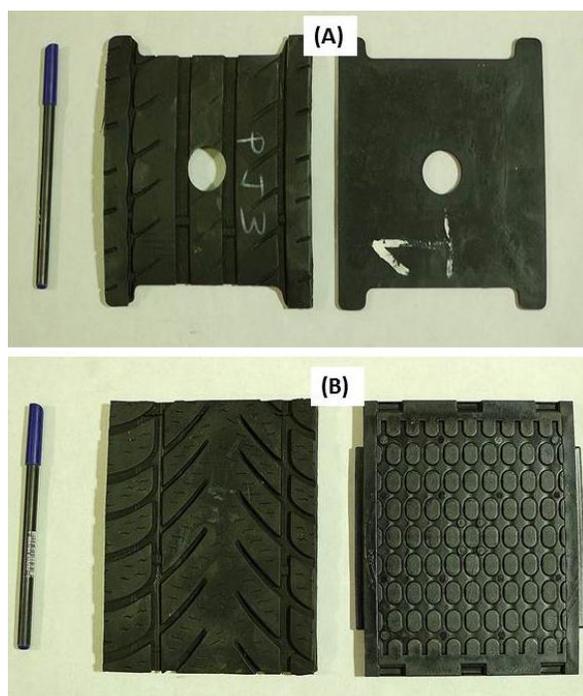


Figura 153: Aspecto visual de las placas de neumáticos (izquierda) y placas comerciales (derecha) para su estudio como placas convencionales (A) y para Alta Velocidad (B).

En este análisis comparativo tanto para placas convencionales como placas para Alta Velocidad, se recogen los resultados medidos para las distintas placas en los ensayos estáticos entre las cargas de 20-95 kN y entre 100-200 kN (UNE-EN 13146-9), así como un ensayo dinámico a 4Hz de frecuencia (según la UNE-EN 13481-2, Anexo B), todos ellos descritos en el Anexo I de la presente tesis doctoral. Además, se presentan los resultados de resistencia al deterioro climático (ante un proceso de congelación-descongelación, ciclos de frío-calor, y un proceso de envejecimiento térmico) y a la fatiga, ensayo realizado de acuerdo al método Locati (1952), el cual ha sido empleado por otros autores (Carrascal et al., 2007) con el fin de conocer la durabilidad de elementos elásticos.

5.6.1 Placas de neumáticos y placas comerciales, para vías convencionales

Comenzando por el análisis comparativo entre placas de neumáticos y placas comerciales para vías convencionales, la Tabla 37 muestra los valores de rigidez vertical secante entre 20-95 kN y entre 100-200 kN, así como el valor medio y el coeficiente de variación de los resultados registrados para placas

comerciales fabricadas a partir de polvo de neumáticos (NFU triturado) y placas elásticas elaboradas a partir de neumáticos deconstruidos (NFU deconstruido).

Los resultados indican que la rigidez estática entre las cargas de 20 kN y 95 kN para ambos materiales es del mismo orden, obteniendo un coeficiente de variación inferior a 10,00%. Sin embargo, para cargas mayores (entre 100 kN y 200 kN) se pudo ver que las placas de neumáticos deconstruidos registran menores valores de flexibilidad, lo que muestra menor capacidad de amortiguación de cargas provocadas por el impacto de rueda-carril. No obstante, este hecho es de menor importancia debido a que estas cargas tienen baja frecuencia de ocurrencia (Kaewrunruen y Remennikov, 2008b). Además, se puede ver que la homogeneidad de los resultados para las placas de neumáticos deconstruidos es mayor que para el caso de las placas formadas a partir de la trituración de estos residuos.

Tabla 37: Resultados estáticos para placas de neumáticos y placas comerciales usadas en vías convencionales.

Resultados	Placas NFU triturado (comerciales)			Placas NFU deconstruidos		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Rigidez secante 20-95 kN (kN/mm)	287,86	266,02	281,64	290,84	246,95	268,62
Valor medio (kN/mm)	278,51			268,80		
Coficiente de variación (%)	5,55			8,16		
Rigidez secante 100-200 kN (kN/mm)	352,61	583,77	404,53	855,43	690,60	632,11
Valor medio (kN/mm)	446,97			726,05		
Coficiente de variación (%)	27,13			15,95		

La Figura 154 muestra las curvas de desplazamiento vertical medio frente a la carga de compresión, medidas en el último ciclo de carga de los ensayos de rigidez secante 20-95 kN y 100-200 kN. Se puede observar que para el ensayo de rigidez 20-95 kN, la placa de neumático presenta mayor deformación máxima vertical que la registrada para la placa comercial, lo cual indica mayor capacidad de amortiguación de las cargas ferroviarias habituales por parte de la placa de neumático desmontado.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Por otro lado, al pasar a mayores niveles de esfuerzo (ensayo de rigidez 100-200 kN), se puede comprobar que las diferencias de deformación vertical se reducen hasta registrar valores máximos muy similares, observándose de esta forma que para cargas de compresión próximas a 200 kN, ambos materiales presentan un comportamiento semejante. Este hecho se debe principalmente al descenso de desplazamiento vertical registrado para la placa de neumático como consecuencia de la rigidización del material al aumentar las cargas transmitidas durante los 3 ciclos de cargas de los que consta el ensayo estático.

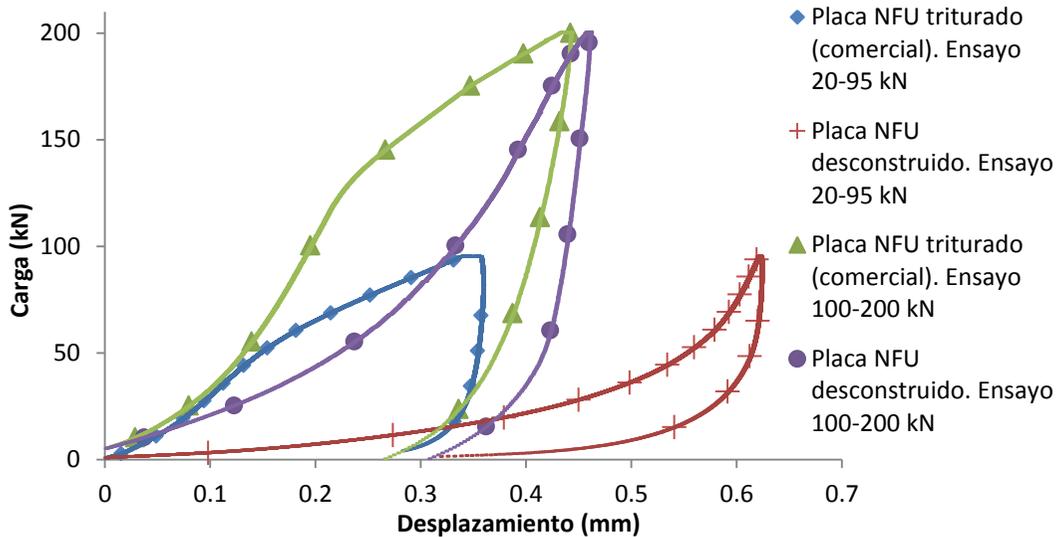


Figura 154: Curvas carga/desplazamiento para placas comerciales y placas de neumáticos para su uso en vías convencionales.

Con el fin de comparar la respuesta dinámica de ambos tipos de placas de asiento (a partir de NFU triturados y NFU desconstruidos), la Tabla 38 recoge los valores de rigidez dinámica (kN/mm) registrados para 3 placas de cada material. A partir de estos resultados, se comprende que las placas de neumáticos desconstruidos son más apropiada para la amortiguación de vibraciones y cargas dinámicas en líneas ferroviarias (Szurgott et al., 2001; Teixeira, 2003) dado que registran menores valores de rigidez dinámica. Además, éstas muestran una variabilidad de resultados muy similar a la medida para las placas comerciales, obteniendo así un adecuado comportamiento para su uso en vías ferroviarias.

Tabla 38: Resultados dinámicos para la comparativa entre placas comerciales y placas de neumáticos deconstruidos.

Resultados	Placas NFU triturado (comercial)			Placas NFU deconstruidos		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Rigidez dinámica (kN/mm)	8705,88	6029,94	9372,19	1876,24	2386,24	1615,86
Valor medio (kN/mm)	8036,00			1959,45		
Coefficiente de variación (%)	22,01			19,99		

La Figura 155 muestra las curvas de fuerza-desplazamiento medio registradas en el ciclo 1.000 del ensayo dinámico para ambos tipos de placas, a partir de las cuales se comprueba que las placas de neumáticos deconstruidos presentan desplazamientos verticales máximos muy superiores a los presentados por las placas comerciales de polvo de neumático, obteniendo además mayor capacidad para disipar energía (0,97 J) en cada ciclo de carga dinámica que estas últimas (0,27 J). De esta forma, el uso de placas de neumáticos deconstruidos podría dar lugar a mayor amortiguación de las cargas transmitidas por los trenes.

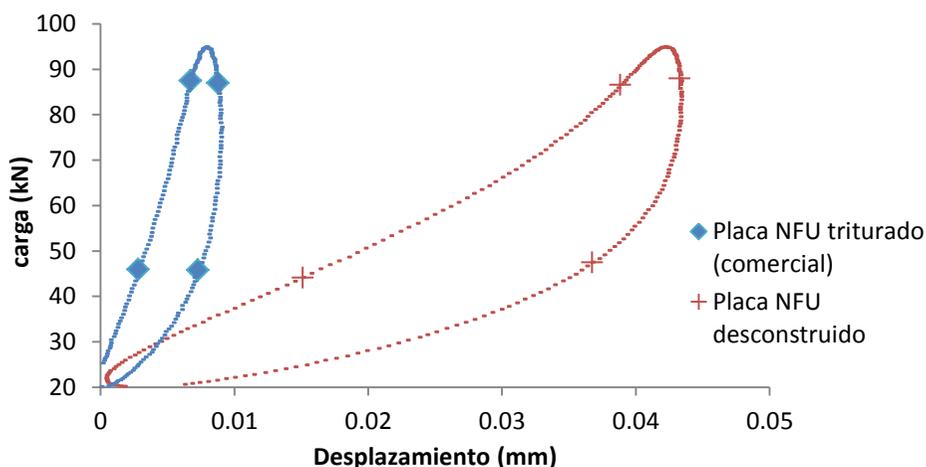


Figura 155: Curvas carga/desplazamiento medidas para placas convencionales en el ensayo dinámico.

Por otra parte, para evaluar el comportamiento a largo plazo de ambos tipos de placas, la Figura 156 presenta la evolución de su rigidez dinámica (R.D.) y energía disipada acumulada (E.D.A.) durante un proceso de fatiga acelerada

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

según el método Locati (1952), el cual consiste en 4 niveles de carga (20/75, 20/90, 20/105 y 20/120 kN) de 50.000 ciclos cada uno.

Los resultados muestran que la rigidez dinámica de las placas de neumáticos deconstruidos se mantiene constante para los distintos niveles de carga, incrementando de forma leve al pasar de un escalón de carga a otro superior. Sin embargo, la placa comercial experimenta una acusada rigidización al aumentar tanto el número como la amplitud de los ciclos de carga, mostrando así menor capacidad de amortiguación de cargas repetidas a largo plazo, y ante cargas de mayor nivel. Por otro lado, a partir de los resultados de energía disipada acumulada, se puede observar que la placa de neumático deconstruido es capaz de disipar más energía a lo largo de la vida útil del material, reduciendo así la energía transmitida a las traviesas y capas granulares, lo que llevaría a menor deterioro de estos componentes, y por tanto, menores costes de mantenimiento.

Además, para analizar la durabilidad de ambos tipos de placa ante la aplicación de cargas dinámicas, se evalúa la variación de rigidez entre 20-95 kN del material tras el proceso de fatiga. Para el caso de la placa compuesta por gránulos de caucho se obtiene un incremento de rigidez próximo a 19%, mientras que para la placa de neumático deconstruido la rigidización se sitúa en torno al 12%, lo que muestra mayor durabilidad del material sin proceso de trituración.

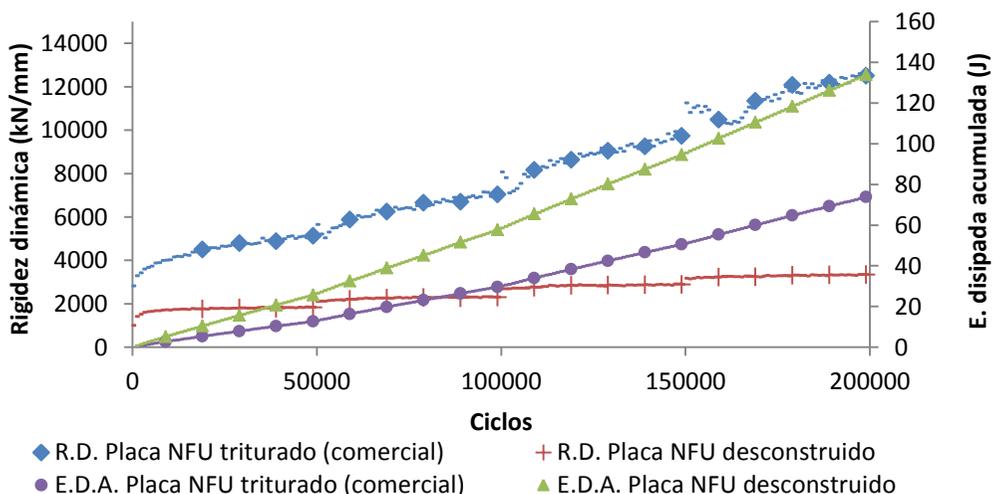


Figura 156: Evolución de la rigidez dinámica y energía disipada acumulada para placas de neumáticos y placas comerciales para su uso en vías convencionales.

En relación al deterioro climático de los dos tipos de placas, la Tabla 39 muestra su variación de rigidez estática y dinámica ante un proceso de envejecimiento térmico y ciclos de frío-calor y hielo-deshielo. Se observa que los procesos de deterioro artificial llevan al incremento (porcentaje positivo) de la rigidez estática y dinámica para ambos tipos de placas, siendo este hecho más acentuado en el caso de las placas comerciales.

De esta forma, se comprende que las placas de neumáticos deconstruidos presentan mayor resistencia al deterioro climático que las placas comerciales fabricadas a partir de neumáticos triturados, consiguiendo así mayor durabilidad del material.

Tabla 39: Variación de resultados de las placas comerciales y de neumáticos deconstruidos tras distintos procesos de deterioro climático

Resultados	Variación de rigidez (%)					
	Envejecimiento térmico		Ciclos hielo-deshielo		Ciclos frío-calor	
	Placa NFU deconstruido	Placa NFU triturado	Placa NFU deconstruido	Placa NFU triturado	Placa NFU deconstruido	Placa NFU triturado
R. estática	5,08	58,41	11,39	40,74	4,23	33,87
R. dinámica	10,69	53,85	8,34	2,44	7,17	24,09

En base a los resultados obtenidos en esta fase de análisis comparativo, se puede comprobar que las placas de neumáticos deconstruidos presenta valores de rigidez estática del orden (o incluso inferiores) a los presentados por las placas comerciales, mientras que en el caso dinámico éstas registran valores de rigidez muy superiores a los medidos para placas de neumáticos deconstruidos, lo que indica la aptitud de estas últimas para proporcionar mayor elasticidad y capacidad de amortiguamiento de cargas a la vía. De igual modo, estas placas presentaron menores valores de degradación, por lo que muestran una adecuada durabilidad en referencia a las placas comerciales.

5.6.2 Placas de neumáticos y placas comerciales, para vías de Alta Velocidad

Por parte de la comparativa entre placas de neumáticos susceptibles de ser utilizadas en Alta Velocidad y placas comerciales usadas en este tipo de vías, la Tabla 40 presenta los resultados obtenidos para ambos tipos de placas en ensayos estáticos para distintos niveles de carga (entre 20-95 kN y entre 100-200 kN).

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Los resultados indican que ambos tipos de placas presentaron valores medios de rigidez estática (para distintos niveles de esfuerzo) muy similares, mostrando así que las placas de neumáticos tienen una adecuada capacidad para reducir el exceso de rigidez vertical en vías de alta velocidad, pudiendo así conseguir un diseño óptimo de la infraestructura. En relación a los coeficientes de variación, las placas de neumáticos presentaron una variabilidad de resultados comparables (o incluso inferior) a la obtenida para placas comerciales, lo que denota la aptitud de estos materiales para su uso en Alta Velocidad.

Tabla 40: Resultados estáticos para placas comerciales y placas de neumáticos susceptibles de ser usadas en Alta Velocidad.

Resultados	Placas comerciales A.V.			Placas NFU deconstruidos		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Rigidez secante 20-95 kN (kN/mm)	106,86	107,80	102,08	100,88	107,27	108,53
Valor medio (kN/mm)	105,58			105,55		
Coefficiente de variación (%)	2,92			3,88		
Rigidez secante 100-200 kN (kN/mm)	296,81	246,42	227,47	249,88	283,53	266,17
Valor medio (kN/mm)	256,90			266,53		
Coefficiente de variación (%)	13,95			6,31		

Para profundizar en el comportamiento estático de ambos tipos de placas, la Figura 157 muestra que las placas de neumáticos deconstruidos tienen mayor capacidad de deformación para cargas entre 20-95 kN, lo cual puede estar asociado a la deformabilidad del caucho, incluso ante bajos niveles de carga. Sin embargo, para el ensayo estático 100-200 kN, las placas comerciales presentaron mayores desplazamientos máximos, debido a la rigidización del caucho contenido en las placas de neumáticos al incrementar el nivel de tensión (Van Krevelen, 1990; Folta, 2011).

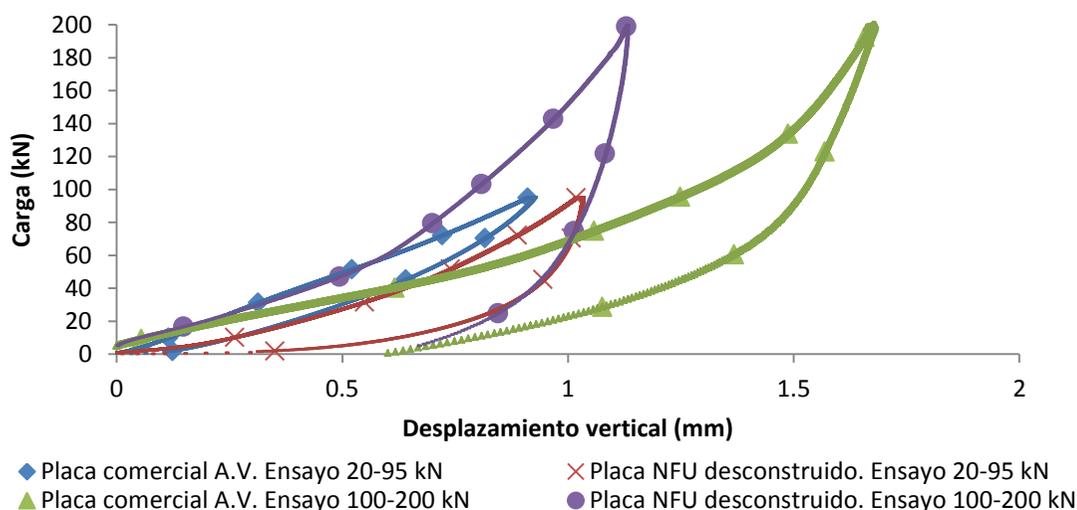


Figura 157: Curvas carga-desplazamiento medidas en ensayos estáticos para placas comerciales y placas de neumáticos para su uso en Alta Velocidad.

En referencia al comportamiento dinámico, la Tabla 41 indica que las placas de neumáticos presentaron mayores valores de rigidez dinámica, como consecuencia de la rigidización del material al pasar de régimen estático a dinámico. No obstante, el ratio entre ambos comportamientos (dinámico/estático) para las placas de neumáticos es próximo a 3,1, el cual es apropiado para el uso de este tipo de elemento elástico en vías de Alta Velocidad.

Tabla 41: Resultados dinámicos para placas comerciales y de neumáticos para su uso en Alta Velocidad.

Resultados	Placas comerciales A.V.			Placas NFU desconstruidos		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Rigidez dinámica (kN/mm)	211,19	202,91	196,17	333,56	319,95	336,08
Valor medio (kN/mm)	203,43			329,86		
Coefficiente de variación (%)	3,71			2,63		

Además, al medir la energía disipada (área encerrada por la curva carga-desplazamiento, Figura 158) por ambos materiales en los últimos ciclos del ensayo dinámico, se comprueba que las placas de neumáticos presentan un valor (4,94 J) muy similar (incluso superior) al obtenido para los elementos comerciales (4,75 J). Así, esto pone de manifiesto que a pesar de registrar

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

menores desplazamientos máximos por las placas de neumáticos, ambos componentes tienen igual capacidad para reducir las cargas y energía transmitida por los vehículos.

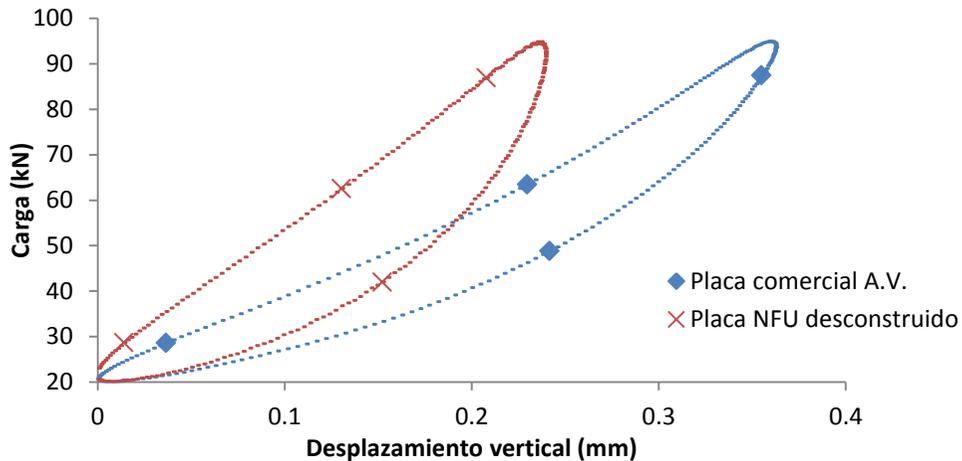


Figura 158: Curvas carga/desplazamiento medidas en ensayos dinámicos desarrollados para placas de Alta Velocidad.

Por otra parte, con el fin de conocer la respuesta dinámica a largo plazo para ambos tipos de placas, la Figura 159 muestra la evolución de la rigidez dinámica (R.D.) y la energía disipada acumulada (E.D.A.) medida en un ensayo de fatiga según el método de Locati (1952). Los resultados reflejan que las placas de neumáticos deconstruidos tienen mayor rigidez vertical ante la aplicación de cargas dinámicas, en comparación con lo registrado para las placas comerciales para Alta Velocidad. Además, este hecho se ve acentuado al incrementar el nivel de carga aplicado, obteniendo las mayores diferencias para las cargas entre 20-120 kN.

Sin embargo, a pesar de la rigidización dinámica presentada por las placas de neumáticos, éstas presentan una capacidad para disipar energía durante su vida de servicio comparable a la medida para placas comerciales. Así, se pone de manifiesto que las placas de neumáticos tienen una adecuada capacidad para proteger a las traviesas y capas inferiores de las cargas transmitidas por los vehículos, reduciendo de esta forma el deterioro de la vía.

Además, para evaluar la durabilidad de ambos materiales (placas comerciales de TPE y placas de neumáticos deconstruidos), se midió el cambio de rigidez estática entre 20-95 kN provocado por el proceso de fatiga. Se pudo comprobar

que ambos tipos de placas registraron reducidas variaciones de rigidez (8,92% las placas comerciales y 3,66% las placas de neumáticos), demostrando así una apropiada resistencia al deterioro mecánico.

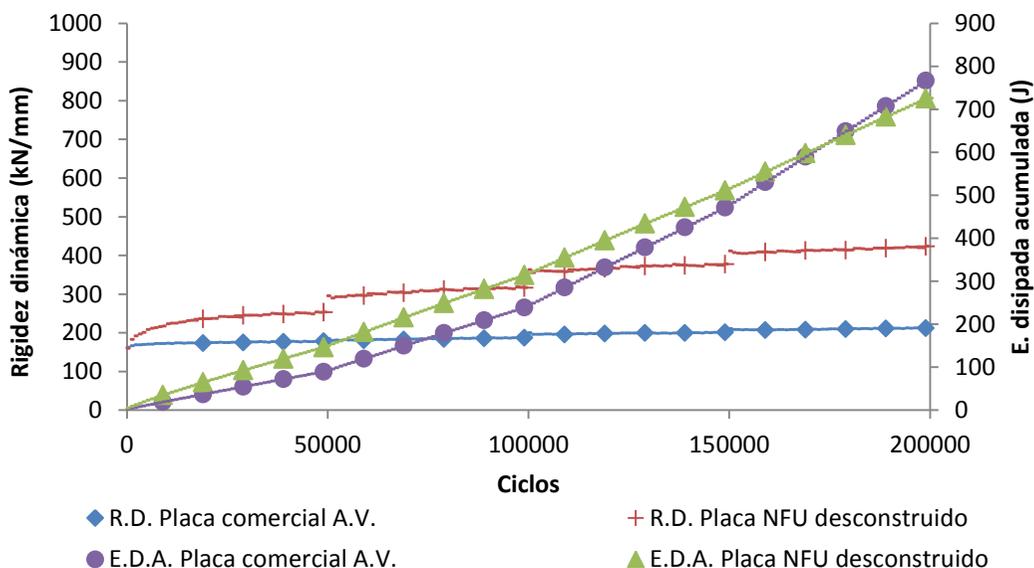


Figura 159: Evolución del comportamiento dinámico de placas comerciales y placas de neumáticos aptas para su uso en Alta Velocidad.

Con el fin de evaluar la durabilidad de ambos tipos de placas ante procesos artificiales que reproducen condiciones climáticas adversas, la Tabla 42 muestra la variación (%) de la rigidez estática y dinámica ante un proceso de envejecimiento térmico, ciclos de frío-calor, y un proceso de congelación-descongelación. Los resultados indican que para el caso estático, las placas de neumático presentan valores de cambio de rigidez algo superiores a los presentados por las placas comerciales, mientras que para el caso dinámico ocurre lo contrario, obteniendo una amplia variación por parte de las comerciales en el caso de envejecimiento térmico y ciclos de frío-calor.

De esta forma, se comprueba que las placas de neumáticos tienen una resistencia al deterioro climático del orden (o superior) a la presentada por placas comerciales que son utilizadas en algunas líneas de alta velocidad españolas. Esto denota la aptitud del material para su uso como elementos elásticos en vías de ferrocarril.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Tabla 42: Efecto de distintos procesos climáticos en la respuesta de placas comerciales y placas de neumáticos para Alta Velocidad.

Resultados	Variación de rigidez (%)					
	Envejecimiento térmico		Ciclos hielo-deshielo		Ciclos frío-calor	
	Placa NFU deconstruido	Placa comercial	Placa NFU deconstruido	Placa comercial	Placa NFU deconstruido	Placa comercial
R. estática	8,14	4,82	8,25	7,93	7,53	2,49
R. dinámica	8,22	19,72	5,12	4,45	12,17	22,05

A partir del análisis realizado en esta fase para comparar el comportamiento de placas de neumáticos aptas para Alta Velocidad con placas comerciales usadas en este tipo de vías, se ha comprobado que las placas de neumáticos presentan valores de rigidez estática, así como su variabilidad de resultados, comparables a los registrados por las placas comerciales, aunque en el caso dinámico estas últimas presentaron valores de rigidez algo inferiores a los de las placas de neumáticos.

No obstante, el ratio de rigidización dinámica de las placas de neumáticos fue apropiado para su uso en vías de alta velocidad, a la vez que la capacidad para disipar energía fue muy similar (o incluso superior) a la de las placas comerciales. Además, al evaluar la respuesta a largo plazo y resistencia al deterioro de ambos tipos de placas, se pudo ver que las placas de neumáticos presentan una adecuada durabilidad de acuerdo a los datos medidos para las placas comerciales (usadas de referencia).

5.7 Estudio en un tramo de prueba a escala real

En una etapa final de estudio, se recogen los resultados del diseño y definición de un tramo de prueba en una línea de EuskoTren (administrador ferroviario del País Vasco) en el que se utilizan placas de neumáticos para evaluar su respuesta mecánica a gran escala.

En la definición de las características de las placas de neumáticos a utilizar se tuvieron en cuenta las propiedades de las placas comerciales utilizadas en los tramos adyacentes. Así, las placas de neumáticos fueron diseñadas con espesor de 6,0 mm, y unas dimensiones horizontales iguales 180 mm x 140 mm, apropiadas para su uso bajo carril tipo UIC 54, y similares a las de las placas comerciales. La Figura 160 muestra el aspecto visual de las placas comerciales

(utilizadas en los tramos adyacentes a la sección experimental) y las placas de neumático estudiadas para su uso en el tramo de ensayo.



Figura 160: Aspecto visual del tipo de placas utilizadas en vías de EuskoTren (izquierda) y aspecto de placas de neumáticos usadas en el tramo de prueba (derecha).

Para comparar la respuesta de ambos tipos de materiales, la Figura 161 muestra los resultados de los ensayos de rigidez estática (entre 20-95 kN y entre 100-200 kN) y dinámica a 4 Hz para los dos tipos de placas. Se observa que las placas de referencia, a utilizar en tramos adyacentes, presentan valores de rigidez muy superiores a los registrados para placas de neumáticos, siendo este hecho acentuado al incrementar la velocidad e intensidad de la carga.

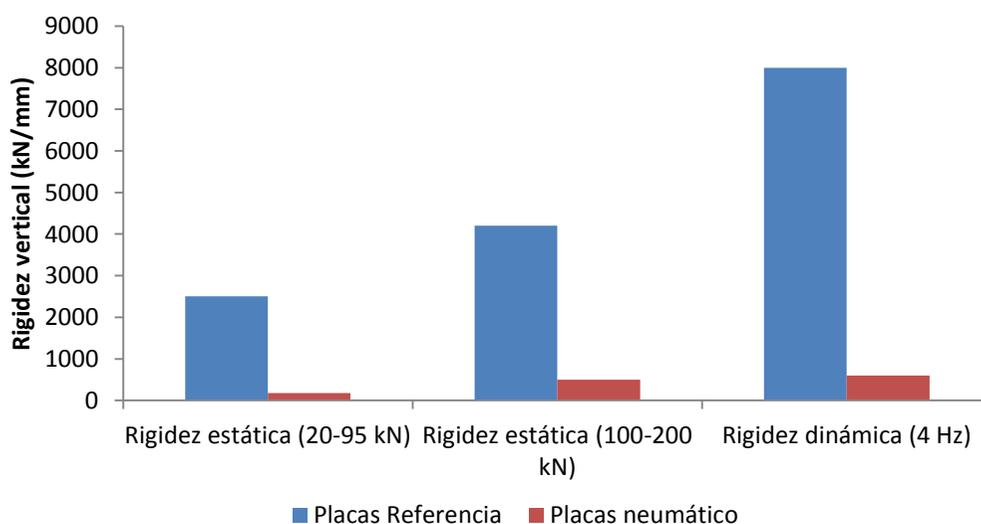


Figura 161: Resultados del comportamiento de las placas de referencia usadas por EuskoTren y de las placas de neumáticos utilizadas en el tramo de prueba.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

En vista de estas diferencias, con el fin de evitar cambios bruscos de rigidez que podrían acelerar el deterioro de la vía, se decidió desarrollar placas de neumáticos con tratamiento del material para aumentar su rigidez vertical, y ser utilizadas en tramos de transición entre la sección de ensayo para placas sin tratamiento, y la secciones adyacentes con placas comerciales.

A partir del estudio realizado en la fase de determinación de los parámetros óptimos de diseño de placas de neumáticos, al analizar la influencia de los tratamientos del material se comprobó que el proceso de incorporación de fibras correspondía al tratamiento que mayor incremento de rigidez provocaba en las placas de neumáticos. Así, para el desarrollo de placas para su uso en tramo de transición se diseñaron placas de neumáticos con similares características geométricas que las anteriores (6 mm de espesor, y dimensiones horizontales iguales a 140 mm x 180 mm), a las que se les adhirió una lámina de fibras de acuerdo a la Figura 162.



Figura 162: Aspecto visual del tipo de placas de neumáticos con lámina de fibra, utilizadas en tramos de transición entre las secciones con placas de EuskoTren y la sección con placas de neumáticos sin tratar

A partir de los ensayos de laboratorio, se comprobó que la rigidez estática de estos materiales con fibras se situó próxima a 900 kN (para el ensayo entre 20-95 kN) y a 1300 (para el caso de cargas entre 100-200 kN), mientras que la rigidez dinámica fue cercana a 3000 kN/mm. De esta forma, se comprobó que las placas de neumáticos con fibras contaban con propiedades intermedias a las presentadas por las placas comerciales usadas por EuskoTren y las placas de

neumáticos sin tratar. Así, estas placas con fibras fueron definidas como apropiadas para ser utilizadas en tramos intermedios de transición entre las secciones con las placas de asiento citadas anteriormente.

Si se consideran los valores de rigidez dinámica (donde mayores diferencias se pueden apreciar), al utilizar las placas de neumáticos con fibras en tramos de transición, sería posible pasar de deformaciones verticales iguales a 0,009 mm (asociadas a las placas comerciales), a deformaciones de 0,025 mm (presentadas por las placas de neumáticos con fibras), y finalmente a valores de 0,125 mm por parte de las placas de neumáticos sin tratamiento. Así, se conseguirían variaciones de deflexión máxima asociadas a placas de asiento inferiores a 0,5 mm, que es el valor indicado por la UIC (Code 719-1, 2011) como límite para las variaciones de rigidez en tramos de transiciones.

En referencia a la longitud, se definió un valor de 150 m para las zonas de transición (con placas de neumáticos tratadas con fibras) y de 300 m para el tramo central, el cual incorpora placas de neumáticos sin tratar. Si se consideran las recomendaciones de la UIC (Code 719-1, 2011) para la definición del tramo de transición, se comprueba que la longitud seleccionada para este estudio es conservadora, dado que la UIC indica una distancia mínima correspondiente a 0,5-1,0 segundos la velocidad del tren. Dado que en el caso de estudio se trata de una línea convencional con circulación de trenes a velocidades inferiores a 200 km/h, la longitud de 150 m corresponde a tiempos superiores a 2,5 segundos.

Para facilitar la comprensión de la configuración final del tramo experimental, la Figura 163 representa un esquema de las distintas secciones con los diferentes tipos de placas de asiento utilizados, representando de igual modo las variaciones de rigidez estática (entre 20-95 kN) y dinámica que pueden tener lugar.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

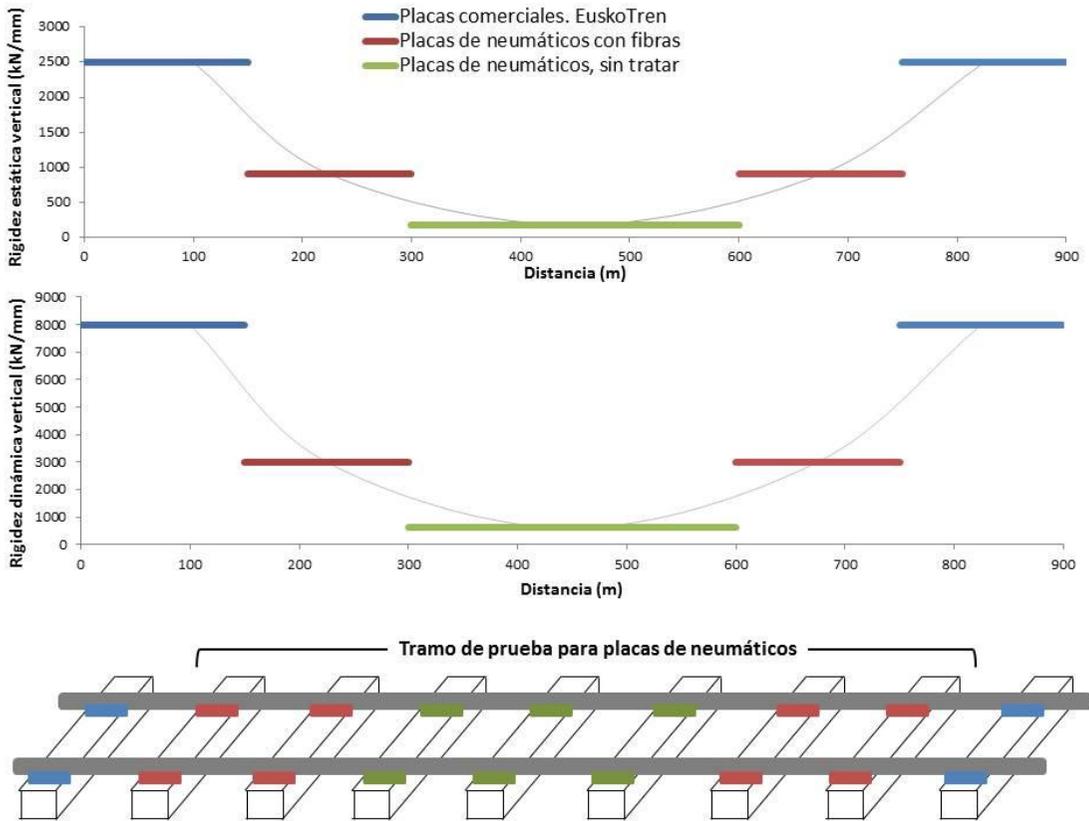


Figura 163: Configuración del tramo de prueba con placas de asiento fabricadas a partir de capas de neumáticos fuera de uso.

A partir de esta configuración para el tramo experimental con placas de neumáticos, éste fue construido en una línea de EuskoTren ubicada en Vizcaya, España. La Figura 164 muestra la colocación de las placas sobre las traviesas, para su montaje en vía. Actualmente, este tramo de ensayo se encuentra bajo estudio para evaluar el comportamiento de las placas de neumáticos a escala real en vías ferroviarias.

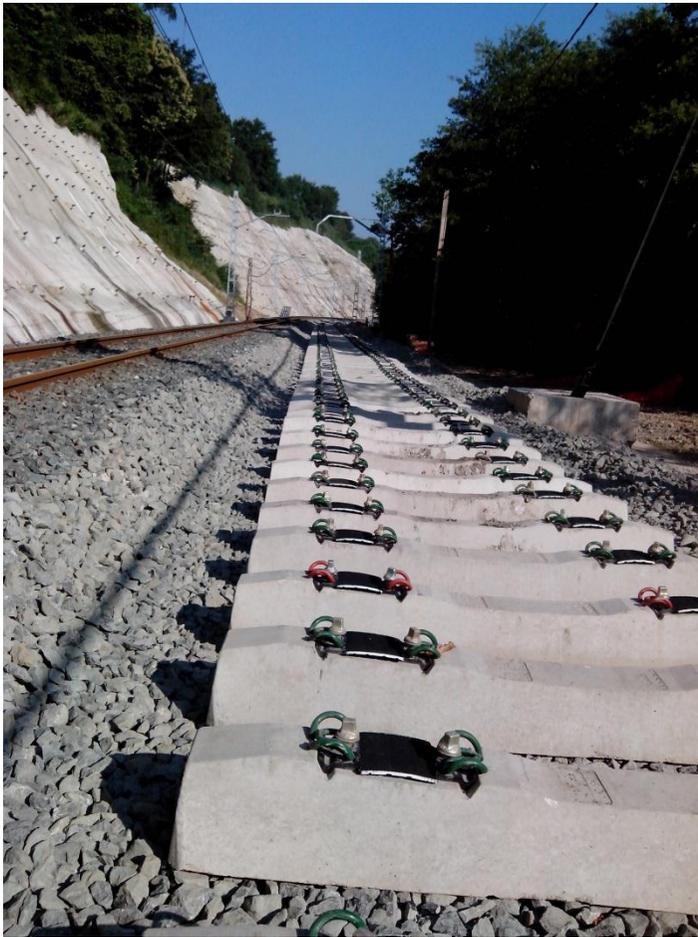


Figura 164: Aspecto visual de las placas de neumáticos dispuestas sobre las traviesas, antes del montaje en vía.

Conclusiones

Conclusions

6. Conclusiones

La presente tesis doctoral se centra en el desarrollo de componentes elásticos para su uso en vías ferroviarias, empleando como materia prima las capas de neumáticos fuera de uso que son obtenidas mediante un proceso de deconstrucción, sin necesidad de triturar el material. De esta forma, se pueden obtener elementos elásticos económicamente y medioambientalmente más competitivos, lo que permite extender la aplicación de estos componentes en vías ferroviarias para mejorar su durabilidad y reducir el impacto de su explotación (deterioro geométrico, ruido, vibraciones, etc.).

Para conseguir este objetivo se ha llevado a cabo un estudio para el desarrollo de placas de asiento, suelas bajo traviesa, y mantas bajo balasto a partir de las bandas que forman los neumáticos usados. Las principales conclusiones obtenidas son:

- La capa exterior (banda de rodadura) de los neumáticos usados es la que presenta las mejores propiedades físicas y mecánicas para su empleo como materia prima en la elaboración de elementos elásticos para su uso en vías de ferrocarril, y la que permite desarrollar componentes económicamente más competitivos y medioambientalmente sostenibles.
- El espesor de las bandas de neumáticos es el principal factor de diseño de los componentes elásticos desarrollados a partir de neumáticos usados. Como resultado de la variabilidad del espesor del residuo, puede obtenerse una amplia gama de soluciones elásticas para su uso en vías con distintas características. Así, se ha comprobado que el aumento del espesor da lugar a elementos de neumáticos con menor rigidez y mayor capacidad para disipar la energía transmitida por el paso de vehículos.
- El uso de un único tipo y modelo de neumático lleva a un comportamiento homogéneo de los elementos. Sin embargo, el empleo de distintas clases de neumáticos incrementa la heterogeneidad de resultados, siendo este hecho más notable al utilizar neumáticos con mayor desgaste (menor espesor). No obstante, en todos los casos se obtienen valores de variabilidad de resultados del orden a los registrados para elementos comerciales, lo que denota la aptitud del material a pesar de tratarse de un residuo heterogéneo.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

- Los tratamientos del material estudiados en esta investigación dan lugar al incremento de la rigidez de los elementos de neumáticos, pudiendo de esta forma ampliar el rango de soluciones elásticas. No obstante, se debe tener en cuenta que su aplicación conlleva valores de variabilidad de resultados del orden, o superior, a la medida para elementos sin tratamientos.
- El empleo de espesores entre 7,5 mm y 9,0 mm da lugar a placas de asiento del tipo blandas que cumplen las especificaciones de ADIF para su uso en Alta Velocidad. Por su parte, placas con espesores entre 4,5 mm y 7,5 mm pueden ser utilizadas en vías convencionales que requieran elementos con mayor rigidez. Ambos tipos de placas presentan un comportamiento mecánico y una durabilidad, comparable (o incluso superior) a la presentada por elementos comerciales.
- Las suelas de neumáticos con espesor superior a 7,0 mm son clasificadas como blandas, mientras que valores inferiores de este parámetro dan lugar a suelas de rigidez media. Las suelas de neumáticos no cumplen las especificaciones de ADIF para su uso en Alta Velocidad, aunque podrían ser utilizadas en vías convencionales de acuerdo a otras experiencias europeas. Para su aplicación, las suelas fabricadas a partir de neumáticos usados pueden ser adheridas a las traviesas mediante el embebido de su tejido textil en el hormigón, sin necesidad de emplear resinas o pegamentos.
- Los resultados han mostrado que las mantas de neumáticos con espesores próximos a 19,0 mm pueden ser utilizadas como elemento de rigidez media, siendo necesarios valores superiores a 21,0 mm para obtener mantas de tipo blandas, que a pesar de no cumplir las exigencias de ADIF para Alta Velocidad, podrían ser usadas en otros tipos de vías europeas dada su adecuada resistencia a la fatiga y al deterioro climático.
- En base a este estudio, se demuestra que el uso de elementos elásticos fabricados a partir de neumáticos usados deconstruidos podría mejorar la respuesta del conjunto de la vía y reducir la rigidez vertical global, en relación al sistema sin estos elementos cuya flexibilidad es definida como tipo blanda-media.

- La presente tesis doctoral demuestra por tanto la viabilidad de uso de elementos de neumáticos en vías de ferrocarril, lo que permitiría reducir los costes de fabricación gracias a la utilización de bandas de neumáticos (residuos) como materia prima. Esto podría mitigar el hándicap de empleo de elementos elásticos asociado a su elevado coste, permitiendo así su generalización de uso en vías de ferrocarril, mejorando su comportamiento y durabilidad.

6 Conclusions

The present thesis focuses on the development of railway elastic components from the layers former of end-of-life tires which are obtained by a process of deconstruction of the tires without crushing the material. Thus, it is possible to obtain competitive elastic elements from an economic and environmental point of view. This would let extend the use of these components in railway tracks to improve its durability and reduce the impact of exploitation effects (geometric degradation, noise, vibrations, etc.).

For this purpose, a study has been carried out to develop rail pads, under sleeper pads and under ballast mats from the elastic layers that form the end-of-life tires. The main conclusions are:

- The outer tire layer (tread layer) presents the most appropriate physical and mechanical properties to be used as raw material in the production of elastic components for railway tracks, which allows development of elements economic and environmentally sustainable.
- The thickness of tire layers is the main design parameter to develop elastic elements from end-of-life tires. As a result of the variability of layer thickness, a wide range of elastic solutions can be obtained to be used in railway tracks with different characteristics. Thus, it has been proved that the increase in thickness leads to softer elements with higher capacity to dissipate the energy transmitted when train passing.
- The use of a same type and model of tire in the elements production leads to homogeneous results. However, the application of different classes of tires provokes the increase in the heterogeneity of pad behaviour. This fact is more remarkable when thinner tire layers (with high level of wearing) are used. Nonetheless, the variability values are comparable to those recorded for commercial elements, which proves the ability of tire components despite the fact that used tires is a heterogeneous waste.
- The material treatments studied in the present research lead to the increase in the stiffness of tire elements, which allows a wider range of elastic solutions. Nonetheless, it should be taken into account that similar (or even higher) values of result variability are obtained when treatments are applied.

Conclusiones/Conclusions

- The use of tire thickness among 7.5 mm and 9.0 mm leads to soft rail pads, which are in consonance with ADIF requirements to be used in high-speed lines. Besides, tire pads with thickness between 4.5 mm and 7.5 mm may be used in conventional railway tracks that require stiffer elastic elements. Both types of pads present mechanical behaviour and durability values that are comparable with those obtained for commercial pads.
- Under sleeper pads with thickness higher than 7.0 mm are qualified as soft elements while medium pads are obtained when the material thickness is lower than 7.0 mm. Under sleeper pads from used tires present characteristics which are different to those required by ADIF to be utilized in high speed lines. Nevertheless, they could be used in conventional railway tracks according to other European experiences. For the application of tire USP, their textile can be embedded in the concrete of the sleepers, which avoid the utilization of resins or bonding materials.
- Results have shown that tire mats with thickness near 19.0 mm may be employed as elements with medium stiffness. For the case of soft mats, thickness values higher than 21.0 mm are required. Although tire mats do not meet ADIF requirements to be used in high speed lines, they could be utilized as elastic elements in other types of European tracks since the material presents adequate resistance to fatigue and climatic deterioration.
- According to the present study, it has been proved that the use of elements from deconstructed tires could improve the mechanical behaviour of the track and reduce its global stiffness in reference to the railway system without this type of soft-medium elastic elements.
- The study developed in the present Thesis has showed the viability of using elastic elements from tire layers in railway tracks, which allows reduction in manufacturing costs thanks to the utilization of wastes as raw material. This fact could reduce the handicap associated to the high price of elastic elements, and therefore, wider application of these components could be obtained to improve track behaviour and durability.

Futuras Líneas de Investigación

Future Lines of Research

7. Futuras líneas de investigación

Durante el desarrollo de la presente tesis doctoral, en la que se han desarrollado elementos elásticos para vías de ferrocarril a partir de capas procedentes de la desconstrucción de neumáticos, han surgido diversas líneas de investigación que se plantean como futuros estudios con el fin de ampliar el conocimiento acerca del comportamiento de los elementos de neumáticos en su aplicación como componentes ferroviarios.

En este sentido, se proponen distintas líneas de estudio en relación al trabajo presentado en esta tesis doctoral:

- La temperatura de los elementos elásticos puede variar como consecuencia de las oscilaciones térmicas (tanto diarias como estacionarias) que existen en las infraestructuras ferroviarias, especialmente en climas extremos. Así, a pesar de que los neumáticos son materiales termoestables, resulta de interés llevar a cabo un estudio en detalle de la influencia de la temperatura en la respuesta de estos elementos bajo cargas esperadas en vías de ferrocarril.
- Los componentes elásticos utilizados en vías ferroviarias deben de tener una adecuada durabilidad con el fin de evitar problemas derivados de su degradación, lo que llevaría a la necesidad de su reemplazamiento antes de completar su vida de servicio prevista. Por ello, es de interés realizar un análisis del ciclo de vida (A.C.V.), así como su estudio económico (A.E.C.V.), de los elementos elaborados a partir de capas de neumáticos usados, con el fin de garantizar su correcto comportamiento durante su esperada vida de servicio.
- Otra posible futura línea de trabajo podría estar centrada en el análisis económico del proceso de elaboración de elementos elásticos a partir de las capas de neumáticos, evaluando de igual modo el coste de los productos finales en comparación con otras soluciones existentes en el mercado del ámbito ferroviario.
- Durante el estudio se ha podido comprender que los tratamientos aplicados no consiguen la homogeneización del comportamiento de los elementos elásticos fabricados a partir de distintos neumáticos. Así, sería adecuado profundizar en el desarrollo de algún tipo de tratamiento físico o mecánico (económica y técnicamente competitivo) que permita homogeneizar su respuesta mecánica ante cargas que simulan el paso de vehículos.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

- En el caso de las suelas bajo traviesa y mantas bajo balasto, dado que se requiere la unión de capas de neumáticos para la elaboración de estos componentes, resulta de interés profundizar en el estudio del método de adhesión de las bandas elásticas.
- Al igual que en el caso de las placas de asiento, podría ser interesante profundizar en el desarrollo de suelas y mantas de neumáticos mediante su aplicación en un tramo experimental, analizando la respuesta mecánica de la vía y el comportamiento a largo plazo de estos componentes elásticos. A partir de estos tramos de prueba, junto al ya existente con placas de asiento, también sería de interés evaluar el efecto de los elementos de neumáticos en la transmisión de vibraciones y ruido ante el paso de los trenes.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAPHY

8. Referencias bibliográficas

Admetlla Pérez, N. y López Pita, A. (2010) Transición vía en placa-vía con balasto mediante traviesas cuadro. Tesina D'Especialitat. Universitat Politècnica Catalunya.

Administración de Infraestructuras Ferroviarias españolas (ADIF). www.adif.es [última consulta 25-03-2014]

Administración de Infraestructuras Ferroviarias del País Vasco (EuskoTren). www.euskotren.es [última consulta 04-08-14]

AEA Technology Rail (2005) Review of the effect of track stiffness on track performance. Rail Safety & Standards Board. Research project T372.

Alfaro Albalat, S.; Montalban Domingo, L.; Villalba Sanchis, I.; Real Herráiz, J.I.; Villanueva Segarra, A. (2011) Crumb rubber modified bitumen for sub-ballast layer. 9th World Congress on Railway Research. Lille, France.

Alias, Jean (1987) *Le Rail*. Éditions Eyrolles (1987) (Dépôt Légal: N° d'Editeur: 4608). pp. 130–135, 157–158.

Álvarez, R. (2011) Estudio de Vibraciones en Alta Velocidad. Jornada de Vibraciones Causada por el Ferrocarril. Análisis y Soluciones Correctoras. Bilbao.

Amielin, S.V. (1974) *La vía y el servicio de vía*. Traducción original del ruso por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Amirkhanian, S.N. y Arnold, L.C. (1993) A Laboratory and Field Investigation of Rubberized Asphaltic Concrete Mixtures (Pelham Road). Clemson University, Report No. FHWA-SC-93-02.

Anderson, W. F. y A. J. Key (2000) Model testing of two-layer railway track ballast. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126 (4), pp. 317-324.

Anne y Russ Evans (2006) Rubber/Plastic composite rail sleepers. The waste and resources action programme. Project code: TYR0009-27.

Asmussen, B. (2012) Results of the parameter studies and prioritization for prototype construction for ballasted track. Railway Induced Vibration Abatement Solutions. Collaborative project. SCP0-GA-2010-265754

Beltrán, M. y Marcilla, A. (2012) Tecnología de Polímeros. Universidad de Alicante. REF.978-84-9717-232-5

Berggren, E. y Jahlenius, A. (2002) Continuous track stiffness measurement: an effective method to investigate the structural conditions of the track. Proceedings of the 5th International Conference, Railway Engineering, London, July, ISBN 0-947644-49-0

Berggren, E. (2007) Vertical Track Stiffness Measurements – A Literature Review for the REVA Project. Report, Swedish National Rail Administration (Banverket), Borlänge, Sweden.

Bhanitiz, M.E. (2007) A Laboratory Study of Railway Ballast Behaviour under Traffic Loading and Tamping Maintenance. PhD dissertation, University of Nottingham.

Bolmsvik, R. (2005) Influence of USP on the track response—a literature survey, Abetong Teknik AB, 15.

Bongini, E. (2012) WP3: Conceptions of low emissive track in term of ground vibrations. Project RIVAS-Railway Induced Vibration Abatement Solutions.

Bongini, E.; Guigou, C.; Petit, C.; Poisson, F.; Ropars, P.; Villot, M. (2012) Specificities of ground vibration induced by freight traffic, from the track to building. Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation System. NNFM 1, 18, pp. 291-298

Bouvet, P. y Vincent, N. (1998) Laboratory characterization of rail pad dynamic properties. Vibratéc Report 450.004.RA.05.A.

Bounanno, A. y Mele, R. (2000) The use of bituminous mix subballast in the Italian State Railways. 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress Barcelona.

Brown, S.F.; Kwan, J.; Thom, N.H. (2007) Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast. Geotextiles and Geomembranes, 25, pp. 326-335.

Carrascal, I. (2006) Optimización y análisis de comportamiento de sistemas de sujeción para vías de ferrocarril de alta velocidad española. Tesis Doctoral Universidad Cantabria, España.

Carrascal, I.; Casado, J.A.; Polanco, J.A. Gutiérrez-Solana, F. (2007) Dynamic behaviour of railway fastening setting pads. *Engineering Failure Analysis*, 14, pp. 364-373.

Carrascal, I.; Casado, J.A.; Diego, S.; Polanco, J.A.; Gutiérrez-Solana, F. (2010) Efecto del envejecimiento de placas de asiento de carril inyectadas con TPE en la elasticidad de la vía para Alta Velocidad. 31 Encuentro del Grupo Español de Fractura, San Lorenzo del Escorial, España.

Carrascal, I.; Casado, J.A.; Diego, S.; Polanco, J.A. (2011) Atenuación frente a impacto en sistemas de sujeción ferroviaria de alta velocidad. *Anales de Mecánica de la Fractura* 28, Vol. 2, pp. 713-718.

Carrascal, I.; Casado, J.A.; Diego, S.; Polanco, J.A. (2013) Comportamiento mecánico frente a esfuerzos dinámicos de manta elastomérica para la atenuación de vibraciones en ferrocarriles. Grupo Español de Fractura, Toledo, España.

Casado del Prado, J.A. (2001) Comportamiento en fatiga de poliamidas reforzadas con fibra de vidrio corta. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, España.

CDM. Composite Damping Materials. www.cdm.com [última consulta 13-01-2014]

CEDEX-Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (2007) Manual de Empleo de Caucho de NFU en Mezclas Bituminosas. Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente.

CEN-document TC 256 WI 00256597 - Railway applications/Track - Concrete sleepers and bearers - Concrete sleepers and bearers with under sleeper pads. Documento recogido por la UIC en sus recomendaciones para las suelas elásticas. Año 2009

Clark, R. A.; Dean, P. A.; Elkins, J. A.; Newton, S. G. (1982) An investigation into the dynamic effects of railway vehicles running on corrugated rails, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 24, pp. 65-76.

CORDIS-Community Research and Development Information Service (2013) Recycling Europe's three million tonnes of tyre waste. www.cordis.europa.eu [última visita 5-12-13]

Dahlberg, T. (2003) Railway track dynamics - a survey. Tech. Rep. LiTH-IKP-R, Linköping University, Sweden.

Dahlberg, T. (2006) Track Issues. In Iwnicki, S. (editor): Handbook of railway dynamics, CRC Press, London, United Kingdom.

Dahlberg, T. (2007) Railway track stiffness variations - a literature review for the REVA project. Mechanical Engineering, IEI, Linköping University, Linköping, Sweden.

Dahlberg, T. (2010) Railway Track Stiffness Variations-Consequences and Countermeasures. International Journal of Civil Engineering. Vol. 8(1), pp. 1-12.

D'Andrea, A.; Loprencipe, G.; Xhixha, E. (2012) Vibration induced by rail traffic: evaluation of attenuation properties in a bituminous sub-ballast layer. Social and Behavioral Sciences 53, pp. 245-255

Di Mino, G. y Di Liberto, C.M. (2012) Experimental survey on dry asphalt rubber concrete for sub-ballast layers. Journal of Civil Engineering and Architecture, Vol. 6 (12), pp. 1615-1626.

Di Mino, G.; Di Liberto, M.; Maggiore, C.; Noto, S. (2012) A dynamic model of ballasted rail track with bituminous sub-ballast layer. Social and Behavioral Sciences, Vol. 53, pp. 366-378. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.09.888

DBS 918 071-01 (2010) Condiciones técnicas de suministro, Acolchado de subbalasto para reducir la carga ejercida sobre el balasto. Ensayos mecánicos. Munich, Alemania.

Díaz Pardo, F. (2007) Materiales elastoméricos sostenibles de procedencia nacional para la atenuación de vibraciones en el ferrocarril. Sistema MLG. Publicado en www.geotren.es.

DIN 45673-5 (2010) Mechanical vibration. Resilient elements used in railway tracks. Part 5: Laboratory test procedures for under-ballast mat. Berlin, Germany.

DIN 45673-6 (2010) Mechanical vibration-Resilient elements used in railway tracks. Part 6: Laboratory tests procedures for under-sleeper pads of concrete sleepers. Berlin, Germany.

Dold, M. y Potocan, S. (2013) Long-term behaviour of Sylomer ballast mats. Rail technology review, vol. 13. ISSN 1869-7801.

Ebersöhn, W. y Selig, E.T. (1994) Teck modulus measurements on a heavy haul line. Transportation Research Record 1470, pp. 73-83.

Edilon Sedra. Trackelast products. www.edilonsedra.com. [última consulta 10-10-2013]

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

Eisenmann, J. (1969) Stress distribution in the permanent way due to heavy axle loads and high speeds. Proceedings of AREA, Vol. 71, pp. 24-59.

Esveld, C. (1980) Mesurage de la raideur de la voie en utilisant une bourreuse mecanique appropriée. Rail International, pp. 146-156.

Esveld, C. (2001) Modern Railway Track (2nd Edition). MRT-Productions. ISBN 90-800324-3-3.

Esveld, C. (2009) The significance of track resilience. European Railway Review News.

E.T. 03.324.005.2 (1998) Placas de caucho para asiento del carril. Especificaciones Técnicas para Vía. ADIF, Madrid.

E.T. 03.360.570.0 (2005) Placas elásticas de asiento para sujeción tipo VM. Especificaciones Técnicas para Vía. ADIF, Madrid.

E.T. 03.360.574.2 (2010) Suelas bajo traviesa para Alta Velocidad. Especificaciones Técnicas para Vía. ADIF, Madrid.

Ferreira, P. A. (2010) Modelling and prediction of the dynamic behaviour of railway infrastructures at very high speeds. Ph.D. dissertation. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico, Portugal.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Fortin, J. P. (1982). La déformée dynamique de la voie. Revue Générale des Chemins de Fer.

Folta, Z. (2011) Mechanical characteristics testing of the rubber elastic pads under rail. Department of Parts and mechanisms of machines, VSB-Technical University of Ostrava, Czech Republic.

Gallego, J. y De los Santos, L. (2003) Mezclas bituminosas fabricadas con betunes de alto contenido de caucho. Aplicación al recrecimiento de un pavimento rígido en la A-7. Revista de Obras Públicas. Nº 3.439, pp. 7-26.

Galvín Barrera, P. (2007) Análisis numérico y experimental de las vibraciones ocasionadas por el paso de trenes de alta velocidad en el suelo y en estructuras cercanas a la vía. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla, España.

Garburg, R. y Stiebel, D. (2007) Acoustics and vibration. Wok Package number 3 of UIC Project Under Sleeper Pads.

Getzner Werkstoffe www.getzner.com [última consulta 12-12-2013]

Getzner Werkstoffe (2006) Ballast Mats. Characteristics of Solutions in Service. UIC congress, Paris, France.

Giannakos, K. (2004) Actions on the railway track. Papazissis Publications. Athens, Greece

Giannakos, K. (2010) Influence of Rail Pad Stiffness on Track Stressing, Life-Cycle and Noise Emission. Proceeding of the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Ancona, Italy.

Gomavial Solutions, S.L. www.gomavial.com [última visita 5-03-2014]

Grassie, S.L.; Gregory, R.W.; Johnson, K.L. (1982) The dynamic response of railway track to high frequency vertical excitation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science; Vol. 24(2) pp. 77-90.

Grassie, S.L. y Cox, S.J. (1984) The dynamic response of railway track with flexible sleepers to high frequency vertical excitation. Proceedings of Institute of Mechanical Engineering, Part D 198, pp. 117-124.

Grassie, S.L. y Kalousek, J. (1993) Rail corrugation: characteristics, causes and treatments. Proceedings of Institute of Mechanical Engineering 207, pp. 57-68.

Hanson, C.E. y Singleton, H.L. (2006) Performance of ballast mats on passenger railroads: Measurement vs. projections. Journal of Sound and Vibration 293, pp. 873-877.

Hirano, M. (1972) Theoretical Analysis of Variation of Wheel Load. Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports . Vol 13, pp. 42-44.

Hunt, G. (1997) Use of advance computer models in permanent way life cycle cost reduction. 3rd World Congress on Railway Research, Florence, Italy.

Hyde, J.H. y Lintern, H.R. (1929) The vibrations of roads and structures. Proceedings of the institution of civil engineers, 227, pp. 187-243.

Ilias, H. (1999) The influence of railpad stiffness on wheelset/track interaction and corrugation growth, Journal of Sound and Vibration 227, pp. 935-948.

Iliev, D.L. (2012) Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohlenen Schwellen. PhD Technische Universität München, Germany.

Indraratna, B.; Khabbaz, H.; Salim, W.; Christie, D. (2006) Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics. Journal of Ground Improvement, Vol. 19, pp. 91-102

Insa, R.; Salvador, R.; Inarejos, J.; Roda, A. (2011) Analysis of the influence of under sleeper pads on the railway 391 vehicle/track dynamic interaction in transition zones. Journal of Rail and Rapid Transit, 392 doi:10.1177/0954409711430174

ISO 37 (2011) Elastómeros. Caucho vulcanizado o termoplástico. Determinación de las propiedades de esfuerzo-deformación en tracción. AENOR, Asociación española de Normalización y Certificación, Madrid.

ISO 868 (1998) Plásticos y ebonita. Determinación de la dureza de penetración mediante un durómetro (dureza Shore). AENOR, Asociación española de Normalización y Certificación, Madrid.

ISO 1183 (2005) Plásticos. Métodos para determinar la densidad de plásticos no celulares. Parte 2: Método de la columna por gradiente de densidades. AENOR, Asociación española de Normalización y Certificación, Madrid.

Isolgomma. Railway products. www.isolgomma.com [última consulta 25-09-2013]

Ito, M y Nagai, K. (2008) Degradation issues of polymer materials used in railway field. *Polymer Degradation and Stability* 93, pp. 1723–1735.

Jenkins, J.; Stephenson, S.; Clayton, G.; Morland, G.; Lyon, D.L. (1974) Incidences des paramètres caractéristiques de la voie et des véhicules sur les efforts dynamiques verticaux qui se développent entre rail et roue. *Rail International*, Vol 10.

Johansson, A. (2006) Under Sleeper Pads - Influence on Dynamic Train-Track Interaction. Research report 2006:02, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

Johansson, A.; Nielsen, J.C.O.; Bolmsvik, R.; Karlström, A. (2008) Under sleeper pads - Influence on dynamic train-track interaction. *Wear* 265, pp. 1479-1687

Kaewunruen, S. y Remennikov, A.M. (2005a) Determination of dynamic properties of rail pads using an instrumented hammer impact technique. *Acoustic Australia*, Vol 33(2), pp 63-67.

Kaewunruen, S. y Remennikov, A.M. (2005b) Monitoring structural degradation of rail pads in laboratory using impact excitation technique. 1st International Conference on Structural Condition, Assessment, Monitoring and Improvement, Perth, Australia.

Kaewunruen, S. y Remennikov, A.M. (2006a) Sensitivity analysis of free vibration characteristics of an in situ railway concrete sleeper to variations of rail pad parameters. *Journal of Sound and Vibration* 298, pp. 453–461.

Kaewunruen, S. y Remennikov, A.M. (2006b) Deterioration of dynamic rail pad characteristics. Proceedings of the Conference of Railway Engineering, Melbourne, Australia.

Kaewunruen, S. y Remennikov, A.M. (2008a) Dynamic Properties of railway track and its components: a state-of-the-art review. *Research on Acoustics*, Hauppauge, New York, Nova Science Publishers, pp. 197-220.

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.

Kaewunruen, S. y Remennikov, A.M. (2008c) An alternative rail pad tester for measuring dynamic properties of rail pads under large preloads. *Experimental Mechanics*, 48, pp. 55-64. DOI 10.1007/s11340-007-9059-3

Kaewunruen, S. y Remennikov, A.M. (2009) State dependent properties of rail pads. *Transport Engineering in Australia*, 12, pp. 17-24.

Kenney, J.T. (1954) Steady-state vibrations of beam on elastic foundation for moving load. *Journal of Applied Mechanics* Vol. 76, pp. 359-364.

Kennedy, J.; Woodward, P.K.; Medero, G.; Banimahd, M. (2013) Reducing railway track settlement using three-dimensional polyurethane polymer reinforcement of the ballast. *Journal of Construction and Building Materials* 44, pp. 615-625.

Kleinert, U.; Krüger, M.; Ripke, B. (2006) Applications and benefits of elastic elements in ballasted track. *DB AG Experiences of User*, Germany.

Knothe, K.; Grassie, S.L. (1993) Modelling of railway track and vehicle/track interaction at high frequencies. *Vehicle System Dynamics* 22, pp. 209-262.

Kraiburg relastec (2010) Serviceability test of sub-ballast mat according to draft of DIN 45673-5. *Technische Universität München*, Germany.

Krüger, M. (2007) Theoretical Investigations/Calculations. Work Package number 2a of UIC Project Under Sleeper Pads.

Krylov, V.V.; Dawson, A.R.; Heelis, M.E.; Collop, A.C. (2000) Rail Movement and Ground Waves Caused by High-Speed Trains Approaching Track -Soil Critical Velocities. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. Vol 214. Part F.

Kuroda, S. (1973) Dynamics Variation of Wheel Load. Attributed to Vertical Deformation of Rail End. Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, Vol. 14, pp. 143- 144.

Lakuši, S.; Ahac, M.; Haladin, I. (2010) Experimental investigation of railway track with under sleeper pad. Slovenski kongres o cestah in prometu, portoroz, pp. 20-22.

Lamb, H. (1904) On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid. Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, 203, pp. 1-42

Lapčík, L. ; Augustin, P.; Pístek, A.; Bujinoch, L. (2001) Measurement of the dynamic stiffness of recycled rubber based railway track mats according to the DB-TL 918.071 standard. Applied Acoustics 62, pp. 1123-1128

Lazaro, B.J.; González, E.; Rodríguez, M.; Rodríguez, M.; Osma, S.; Iglesias, J. (2011) Characterization and Modeling of Flying Ballast Phenomena in High-speed Train Lines. 9th World Congress on Railway Research. Paris, France.

Leykauf, G. (2004) Investigaciones y experiencias con traviesas provistas de almoadillas (Traducción española de la F. Ferrocarriles del origen alemán) Eisenbahn Ingenieur, 6.

Leykauf, G., Stahl, W. (2004) Untersuchungen und Erfahrungen mit besohlenen Schwellen. EI Der Eisenbahningenieur (55) 6/2004, S. pp. 8-16.

Lichtberger, B. (2005) Longer maintenance cycles achieved by DTS. Track Compendium, pp. 490-491.

Locati, L. (1952) Programmed fatigue test, variable amplitude rotat. Metallurgia Italiana 44(4), pp. 135-44.

López Pita, A. (1978) El diseño integral del sistema balasto-plataforma (catálogo de secciones estructurales). Revista A.I.T. Nº 23, pp. 8-24.

López Pita, A. (1982) La inclusión de un nuevo criterio en el proyecto de una vía. Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, España.

López Pita, A. (1983) La heterogeneidad resistente de una vía y su incidencia en la evolución de la nivelación longitudinal: una aproximación al problema. Revista de Obras Públicas, pp. 719-735.

López Pita, A. (1984) Posibilidades en la reducción de los costes de mantenimiento de la calidad geométrica de una vía, mediante la introducción de nuevos criterios en su diseño. XVI Pan American Railway Congress, Washington D.C. pp, 416-463.

López Pita, A. (2001) La rigidez vertical de la vía y el deterioro de las líneas de alta velocidad. Revista de obras públicas. Nº 3.415, pp. 7-26.

López Pita, A. (2006) Infraestructuras ferroviarias. Edicions UPC, Barcelona, España.

López Pita, A. (2010) Alta Velocidad en el Ferrocarril. Edicions UPC, Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

Loy, H. (2008) Under sleeper pads: improving track quality while reducing operational costs. Reprinted from European Railway Review, Issue 4.

Loy, H. (2009) Under Sleeper Pads in Turnouts. Getzner Werkstoffe GmbH. Herrenau 5, A-6706 Buers, Germany.

Madshus, C. (1997) Public Annoucement made at. Conference on Ground Dynamics and Man-made Processes: Prediction, Design, Measurement, ICE, 20, London, United Kingdom.

Madshus, C. y Kaynia, A.M. (2000) High-speed railway lines on soft ground: Dynamic behaviour at critical train speed. Journal of Sound and Vibration Vol. 231, 3, pp. 689-701.

Maes, J.; Sol, H.; Guillaume, P. (2006) Measurements of the dynamic rail pad properties. Journal of Sound and Vibration Vol.2 93, pp. 557-565.

Manescu, T.S.; Petre, C.C.; Zaharia, N.L.; Manesco, T.; Bayer, M. (2009) Dynamic tests for fastening rubber plates to determine attenuatin of impact loads. Materiale Plastice, Vol. 46(4), pp. 448-451.

Melis, M. (2006) Terraplens y Balasto en Alta Velocidad Ferroviaria [Primera parte]. Revista de Obras Públicas, Nº 3468, pp. 7-26.

Morgan, J.G.D. y Markalnd, E. (1981) The effect of vibration on ballast beds. Géotechnique 31, Nº3, pp. 367-386.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Müller-Boruttau, F.N.; Rosenthal, V.; Breitsamter, N. (2001) Innovative Ballasted Track: 359 Concrete Sleepers with Sole Pads. DB Systemtechnik. Procedente de World Congress Railway Research, Germany.

Müller-Boruttau, F.H. y Breitsamter, N (2004). Elastic elements reduce the loads exerted on the permanent way. imb-dynamik (www.imb-dynamik.de).

Müller-Boruttau, F., Kleinert, U. (2001) Betonschwellen mit elastischer Sohle, ETR 50. H3 S. pp. 90-98.

Nielsen, J.; Johansson, A.; Vernersson, T. (2003) Train-track interaction and mechanisms of irregular wear on wheel and rail surfaces. Vehicle System Dynamics, Vol. 40, 1-3, pp. 3-54.

Olsson, E.L. y Zackrisson, P. (2002) Longt-term measurement results, final report. Borlänge: Banverket (Technical report 2B/000120/T2/DA). Cited in Load impact on railway track due to unsupported sleepers. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 219, F2, pp. 67-77.

ORE (1968) Stresses in concrete sleepers. Stress in the rails, Report D71/RP/E, Utrecht, Netherlands.

ORE. Frage D117 (1974) Optimale Ampassung de Klassischen Oberbans an den Künstlichen Verkehr. Bericht N.4 Rheologisches Verhalten des Gleises, Utrecht, Netherlands.

Oscarsson, J. (2002) Dynamic Train-Track Interaction: Variability Attributable to Scatter in the Track Properties. Vehicle System Dynamics, Vol.37, pp. 59-79.

Pahisa Rouna, M. y López Pita, A. (2012) La influencia de la rigidez de las places de asiento en las sollicitaciones verticals de los vehículos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.

Pañero Huergo, J. A. (2006) Vía en placa: aplicación a entornos metropolitanos. I Congreso de Urbanismo y Ordenación del Territorio, Madrid.

Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso (PNNFU) 2001-2006. Ministerio de Medio Ambiente. Octubre de 2001.

Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2007-2015. Anexo 4. II Plan de Neumáticos Fuera de Uso. Febrero de 2009.

Plica, P. (2007) Sleeper Solicitation/Sleeper design. Work Package number 2b of UIC Project Under Sleeper Pads.

Potocan, S. (2010) Ballast mats within areas of reduced ballast depth. European railway review, issue 5.

Proyecto RECYTRACK. Material elastomérico respetuoso con el medio ambiente elaborado en base a una mezcla de neumático triturado fuera de uso y resina para aplicaciones ferroviarias. Financiación : LIFE+2010.

Prud'Homme, A. (1978a) Ligne à Grande Vitesse Paris-Sud-Est. Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics. Vol.366, pp. 70-96.

Prud'Homme, A. (1978b) Forces and behaviour of railroad tracks at very high train speeds. Standards adopted by SNCF for its future high speed lines (250 to 300 km/h). Proc. Symp. Rail Track Mech. Tech. pp.79-108. Princeton University, New Jersey.

Puebla, J. (1999) La vía sobre balasto y su comportamiento elástico. III Congreso Nacional de la Ingeniería Civil, Barcelona, pp. 811-817.

Raymond, G. y Bathurst, R. J. (1994) Estimate of static track modulus using elastic foundation models. Transportation Research Record 1470, pp. 65-72.

Remennikov A.M. y Kaewunruen, S. (2008) A review on loading conditions for railway track structures due to train and track vertical interaction. Journal: Structural Control and Health Monitoring. Vol 15(2), pp. 207-234.

Remington, P.J. (1988) Wheel/rail rolling noise. What do we know, What don't we know? Where do we go from here?. Journal of Sound and Vibrations 120, pp. 203-226.

Riessberger, K. (1978) Máquina de nueva concepción para la compactación del lecho de balasto. Revista A.I.T. n.23, pp.25-34

Riessberger, A. (2006) Ballast track for high speeds. Procedente del Congreso internacional de Tracks for High-Speed Railways, pp. 23-44, Porto, Portugal.

Ruano Gómez, A. (2007) Las líneas de alta velocidad frente a las líneas convencionales. Adaptación de las líneas convencionales a velocidad alta. Ingeniería de Camins, Canals i Ports. Tesina Fin de Master, Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Salán Ballesteros, M.N. (2005) Tecnología de proceso y transformación de materiales. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Sato, Y. (1995) Japanese studies on deterioration of ballasted track. Vehicle System Dynamics, Supplement 24, pp. 197-208.

Sato, Y.; Matsumoto, A.; Knothe, K. (2002) Review on rail corrugation studies. Wear Vol. 253 (1-2), pp. 130-139.

Sauvage, R. y Fortin, J.P. (1982) La trainée de roulement des véhicules de chemin de fer. Revue Generale des Chemins de Fer, Juiillet-Août, pp. 383-390.

Sauvage, R. y Larible, G. (1982) La modelization par elements finis des couches d'assise de la voie ferrée. Revue General des Chemins de Fer., pp. 475-484.

Schilder, R. (2004) USP Under Sleeper Pads –Schwellenbesohlungen – Ein Bericht über bisherige Erfahrungen, ÖVG Salzburg Congress, Band 65.

Schilder, R. (2006) UIC Project No. I/05/U/440 USP-Under Sleeper Pads. Applications and Benefits of Elastic Elements in Ballasted Tracks UIC, Paris 17.

Schneider, P. (2013) Standardisation of USP-materials. Work Package 4. UIC Under Sleeper Pads. Draft Document. Version 1.2.1.

Selig, E. T. y Waters, J. M. (1994) Track Geotechnology and Substructure Management. London: Thomas Telford.

Selig, E.T. y Li, D. (1994) Track Modulus: its meaning and factors influencing it. Transportation Research Record 1470, pp. 47-54.

Shenton, M. J. (1978) Deformation of railway ballast under repeated loading conditions. Railroad Track Mechanics and Technology. (P. Press, Eds.). Oxford, United Kingdom.

Sistema MLG-Metro Ligerio Granada www.sistemamlg.es. [última consulta 15-6-2014]

Soriano, S. (2013) Cómo reducir el ruido y las vibraciones en el transporte de mercancías por ferrocarril. 9ª Jornada del Ferrocarril. Salón Internacional de Logística, Barcelona, España.

South, J. (1863) Experiments, made at Watford, on the vibrations occasioned by railway trains passing through a tunnel. Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, 13, pp. 65-83.

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

Stewart, H.E. (1985) Measurements and prediction of vertical track modulus. Transportation Research Record 1022, pp. 65-71.

Suiker, A. (2002) The Mechanical Behaviour of Ballasted Railway Tracks. PhD Thesis, Technische Universiteit Delft, Netherlands.

Sussmann, T.R.; Ebersöhn, W.; Selig, E.T. (2001) Fundamental non-linear track load-deflection behaviour for condition evaluation. Transportation Research Record 1742, pp. 61-67.

Szurgott, P.; Gotowicki, P.; Niezgoda, T. (2012) Numerical analysis of a shaped rail pad under selected static load. Journal of KONES powertrain and transport, Vol 19, N° 1.

Teixeira, P. F. (2003) Contribución a la reducción de los costes de mantenimiento de vías de alta velocidad mediante la optimización de su rigidez vertical. Tesis Doctoral. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, de Barcelona.

Teixeira, P.F. (2007) Elasticidad de la vía con y sin balasto. Jornada de Reflexión y debate: Vía con balasto versus vía en placa. Criterios técnicos-económicos para una decisión. Madrid.

Teixeira, P. F.; Ferreira, P.A.; López Pita, A. (2008) Custos totais por ciclo de vida das futuras linhas de alta velocidade Lisboa-Elvas/Badajoz-Madrid e Lisboa-Porto Life-Cycle Cost Analysis of the Portuguese high-speed lines Lisbon-Madrid and Lisbon-OPorto. Confidential report. RAVE, Rede de Alta Velocidade Ferroviária, S.A.

Thom, N.H.; Brown, S.F.; McDowell, G.R.; Konietzky, H.; Harireche, O. (2006) Discrete element modeling of geogrid-reinforced aggregates. Proceedings of The Institution of Civil Engineers-geotechnical Engineering, 159, pp. 35-48.

Thompson, D.J. y Verheij, J.W. (1997) The dynamic behaviour of rail fasteners at high frequencies. *Applied Acustics*. Vol. 52, No. 1, pp. 1-17.

Thompson, D.; Jones, C.J.C.; Wu, T.X.; France, G. (1999) The influence of the non-linear stiffness behaviour of rail pads on the track component of rolling noise. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transitions* 213, pp. 233-241.

Thompson, D. (2009) *Railway Noise and Vibration: Mechanisms. Modeling and Means of Control*. ISBN-13: 978-0-08-045147-3.

Thompson, D.J. y Jones, C.J.C. (2006) Noise and vibration from railway vehicles. Iwnicki, S. (editor). *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*, CRC Press, Taylor & Francis, pp. 279-325

Thompson, D. J. y Vliet, W.v. (1996) Measurements of the High Frequency Dynamic Properties of Swedish Rail Pads. Technical Report TNO. TNO Institute of Applied Physics. Delft, Netherlands.

UIC - Railway International Union (2001) Design of New Lines for Speeds of 300-350Km/h- State of the Art. International Union of Railways High Speed Department.

UIC - Railway International Union (2006) Project: Under ballast mats. UIC Seminar, Application and benefits of elastic elements in ballasted track.

UIC - Railway International Union (2009) Project Under Sleeper Pads. Summarising 394 Report, pages 1-40. Project from 2005 to 2007. <http://www.uic.org/spip.php?article685395> [accessed 24-02-2014]

UIC (Railway International Union) Code 719-1 (2011) Recommendations for the use of Under Ballast Mats. 1st edition. VII Way and Works

UIC - Railway International Union (2013) Under Sleeper Pads- Recommendations for Use. Version 1.2.1

UNE-EN 13146-3 (2003) Aplicaciones ferroviarias. Vía. Métodos de ensayo de los sistemas de fijación. Parte 3: Determinación de la atenuación de las cargas de impacto. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid

UNE-EN 13146-4 (2003) Aplicaciones ferroviarias. Vía. Métodos de ensayo de los sistemas de fijación. Parte 4: Efecto de las cargas repetidas. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid

UNE-EN 13146-9 (2011) Aplicaciones ferroviarias. Métodos de ensayo de los sistemas de fijación. Parte 9: Determinación de la rigidez. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid

UNE-EN 13481-2, Anexo B. Aplicaciones ferroviarias. Requisitos de funcionamiento para los sistemas de sujeción. Parte 2: Sistemas de sujeción para las traviesas de hormigón. Anexo B: determinación de la rigidez dinámica de las almohadillas de carril. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid.

Van Krevelen, D.W. (1990) Properties of polymers: Their correlation with chemical structure, their numerical estimation and prediction from additive group contributions. Elsevier, ISBN 0444881603, xxii New York.

Van Staalduinen P. y Van Oosterhout C. (1997) Samenvatting en analyse metingen HSL, juni, september, oktober 1997. TNO-rapport 97-CONR1522TNO-rapport 97-CONR1522. NS -Railinfrabeheer. Utrecht, Nederlands.

Vincent, N.; Bouvet, P.; Thompson, D.J.; Gautier, P.E. (1996) Theoretical optimization of track components to reduce rolling noise. Journal of Sound and Vibration, 193, Vol. 1, pp. 161-171.

Witt, S. (2008) The Influence of Under Sleeper Pads on Railway Track Dynamics. LIU-IEI TEK-A- -08/00442- -SE, Linköping University, Sweden.

Woldringh, R. F. y New, B.M. (1999) Embankment design for high speed trains on soft soils. pp. 1703-1712. Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure, Vol 1-3 - Theory and Practice, Planning and Design, Construction and Maintenance. A BALKEMA. Rotterdam, Netherlands.

Wu, T.X. y Thompson, D.J. (2001) The effects on railway rolling noise of wave reflections in the rail and support stiffening due to the presence of multiple wheels. Applied Acoustics 62, pp. 1249-1266.

Wu, T. X. y Thompson, D. J. (2002) A hybrid model for the noise generation due to railway wheel flats, Journal of Sound and Vibration 251, pp. 115 - 139.

**Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso
para su Aplicación en Vías Ferroviarias**

Wu, T.X. (2008) On the railway track dynamics with rail vibration absorber for noise reduction. *Journal of Sound and Vibration* 309, pp. 739–755.

Zeng, X. (2005) Rubber-Modified Asphalt Concrete for High-Speed Railway Roadbeds. *Innovations Deserving Exploratory Analysis (IDEA) Programs*. Accession Number: PB2007-109643.

Zimmermann H. (1888) *Die Berechnung des Eisenbahnoberbaus*. 2. Berichtigte. Berlin.

ANEXO I

ANNEX I

ANEXO I. DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS

A.1 Ensayos para la caracterización de las capas de neumáticos

En esta parte del Anexo A se recoge una descripción de los ensayos de resistencia a la tracción, dureza, densidad, termoplaticidad y resistencia eléctrica, realizados para caracterizar el comportamiento de las capas elásticas que componen los neumáticos.

A.1.1 Ensayo de resistencia a la tracción (ISO 37)

Para este ensayo se fabrican probetas con forma de halerterio (Figura A1), según la norma ISO 37. Estas muestras son estiradas en un equipo de tracción con velocidad de desplazamiento de los rodillos de 500 mm/min. Las mordazas son situadas a una distancia de 75 mm, mientras que la distancia de referencia para la lectura de las deformaciones es de 25 mm. Los resultados obtenidos en este ensayo son resistencia a la rotura (MPa) y alargamiento (%).



Figura A 1: Probetas para el ensayo de resistencia a la tracción.

A.1.2 Ensayo de dureza (UNE-EN 868)

Para la determinación de la dureza de los neumáticos usados se emplea un durómetro Shore tipo A. Las probetas se colocan sobre una superficie dura, horizontal y plana. Se mantiene el durómetro en una posición vertical con la punta del penetrador a 9 mm de los bordes de las probetas. Posterior a esto, se aplica una presión suficiente para obtener un contacto firme entre el pie de apoyo y la probeta, realizando la lectura de la escala del dispositivo y anotando el valor de dureza Shore tipo A.

A.1.3 Determinación de la densidad (UNE-EN 1183)

La determinación de la densidad de los neumáticos fuera de uso se realiza mediante el método A (método de inmersión), establecido por la norma UNE-EN 1183. Para ello se pesa la muestra en seco, para posteriormente sumergir ésta en agua a una temperatura de 23°C. La densidad del material se obtiene de acuerdo a la siguiente expresión:

$$d_m = \frac{m_s * d_l}{m_s - m_l}$$

donde:

d_m = densidad de la muestra (g/cm³)

m_s = masa de la muestra seca (g)

m_l = masa de la muestra sumergida en agua (g)

d_l = densidad del agua (g/cm³)

A.1.4 Ensayo de termoplasticidad (E.T. 03.324.005.0)

La evaluación de la termoplasticidad de los materiales se desarrolla para esfuerzos a tracción y compresión, de acuerdo con las especificaciones (E.T. 03.324.005.0) de ADIF para placas de asiento de caucho.

Para el caso de termoplasticidad a tracción, se evalúa la deformación remanente de una probeta de tracción sometida a un alargamiento del 50% durante 24 horas en una estufa a 100°C. La longitud entre las marcas de referencia (marcas para la medida de la deformación) es de 20 mm, siendo esta distancia llevada hasta 30 mm, para posteriormente almacenar la probeta durante 24 horas en la estufa. Una vez transcurrido este tiempo, se retira la probeta del dispositivo de alargamiento y se deja en reposo a 23±2°C durante 24-48 horas. Transcurrido este periodo, se mide la distancia entre las marcas de referencia, evaluando así la deformación remanente.

Por otro lado, para el caso de termoplasticidad a compresión, se obtiene una pastilla circular de 37 mm de diámetro. Esta pastilla se sitúa entre las superficies de un dispositivo que permite obtener por compresión un adelgazamiento de la pastilla hasta el 50% del espesor inicial de la misma. Una vez hecho esto, se sitúa el dispositivo en una estufa a 100°C durante 24 horas. Pasado este tiempo se retira el dispositivo de la estufa y se deja reposar la

pastilla durante 24-48 horas a $23\pm 2^{\circ}\text{C}$, para posteriormente evaluar la deformación remanente experimentada por el material.

A.1.5 Ensayo de resistencia eléctrica transversal (E.T. 03.324.005.0)

Para medir la resistencia eléctrica transversal del material, éste se acondiciona durante 24 horas en una atmósfera de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa del 50%, a la vez que se sumerge otra placa de dicho material en un baño con agua durante 48 horas. La medida de la resistencia eléctrica se mide mediante el método voltímetro-amperímetro (UNE 21303), colocando la placa a ensayar sobre un electrodo metálico. Sobre la superficie superior de la placa de neumáticos se dispone un disco metálico, el cual es sometido a 500 N de carga, y un anillo metálico de 72 mm de diámetro interior y 92 mm de diámetro exterior.

La medición se realiza bajo una tensión de 100V, después de 60 segundos de sometimiento a dicha tensión.

A.2 Ensayos para placas de asiento

A.2.1 Ensayo de rigidez a 80 kN para placas de asiento (UNE-EN 13146-9)

La elasticidad vertical de las placas de asiento para un esfuerzo de 80 kN permite caracterizar este elemento elástico de acuerdo con su capacidad de amortiguación de vibraciones y protección del balasto, para un nivel de carga que se corresponde con el habitual para líneas de alta velocidad.

En este ensayo, la placa de asiento se somete a 6 ciclos de carga comprendidos entre 0,5 kN y 80 kN, manteniendo ambos valores de carga durante un minuto, y una velocidad de carga y descarga de 50 kN/min. En el ciclo sexto se miden los desplazamientos verticales de la placa elástica para los valores de carga de 5 kN y 80 kN. El parámetro registrado en este ensayo es la Rigidez Vertical a 80kN, $K = \frac{80-5}{d_{80}-d_5}$ (Unidades de K: kN/mm). d_{80} y d_5 son los desplazamientos, en milímetros, medidos para la fuerza 80kN y 5kN (respectivamente) en el sexto ciclo de carga.

La Figura A2 muestra el equipo utilizado para la evaluación de la rigidez estática de placas de asiento.



Figura A 2: Equipo utilizado para determinar la rigidez de las placas de asiento.

A.2.2 Ensayo de rigidez vertical secante 20-95 kN para placas de asiento (UNE-EN 13146-9)

Este ensayo tiene como finalidad determinar la rigidez estática de las placas de asiento comprendida entre 20 kN y 95 kN, correspondiendo estos valores a las cargas de servicio esperadas para estos elementos elásticos.

Para el desarrollo de este ensayo, la placa de asiento se ubica entre una placa metálica de soporte con dimensiones de 300 x 300 mm y una placa de distribución de carga de 140 x 210 mm (Figura A2, derecha). El elemento elástico se somete a 3 ciclos de carga comprendidos entre 0,5 kN y 95 kN, manteniendo la carga máxima durante un minuto, y la mínima 5 minutos, con una velocidad de carga de 15 kN/min (para los dos primeros ciclos) y la descarga a 50 kN/min. En el tercer ciclo de carga (velocidad de carga a 5 kN/min), se registran los desplazamientos verticales de la placa de asiento entre la carga de 20 kN y 95 kN. El parámetro obtenido es el de rigidez secante (kN/mm), establecido como el cociente entre 75 kN y la diferencia de los desplazamientos medidos para los valores de esfuerzo citados anteriormente. Además, para este último ciclo de carga se registraron los desplazamientos verticales medidos en las 4 esquinas de las distintas placas de asiento. La Figura A3 muestra una curva tipo de carga-deformación vertical, registrada en el ensayo de rigidez 20-95 kN.

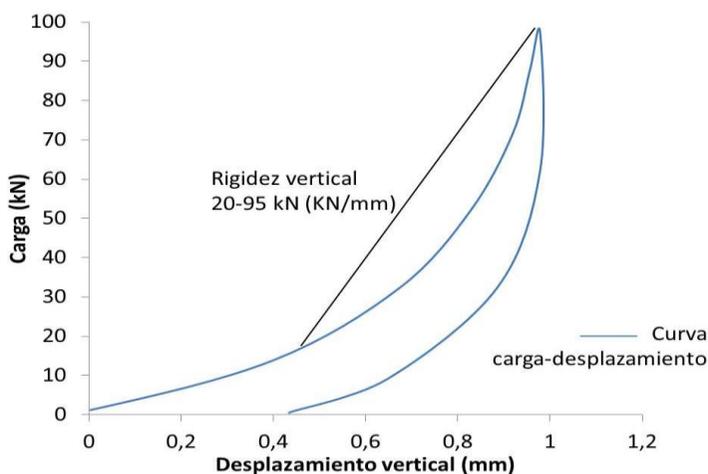


Figura A 3: Curvas tipo de carga-desplazamiento registradas en el ensayo rigidez vertical 20-95 kN

A.2.3 Ensayo de rigidez vertical secante 100-200 kN (UNE-EN 13146-9)

El estudio de la rigidez secante de las placas de asiento entre las cargas 100 y 200 kN permite analizar la protección que proporciona la placa elástica a la traviesa y al balasto en el caso de cargas excepcionales que tienen lugar como consecuencia de defectos en el carril, en las ruedas de los trenes, o en el asiento de la traviesa en el balasto.

Para la realización de este ensayo, se aplican 3 ciclos de carga entre 3 kN y 200 kN, a una velocidad de carga de 15 kN/min para los dos primeros ciclos, y de 5 kN/min para el último ciclo de carga, en el cual se miden los desplazamientos verticales de las placas de neumáticos para los esfuerzos de 100 kN y 200 kN. El valor de rigidez secante (kN/mm) se obtiene como el cociente entre la diferencia de las cargas de medida (100 y 200 kN), y la diferencia de los desplazamientos medios evaluados en estas cargas.

A.2.4 Ensayo de rigidez dinámica para placas de asiento (UNE-EN 13146-9 Anexo B)

Con el desarrollo de este ensayo se pretende evaluar el comportamiento de las placas de asiento ante las acciones dinámicas del paso de trenes.

La frecuencia de aplicación de las cargas se establece en 4 Hz, con un total de 1.000 ciclos entre 20 kN y 95 kN. El parámetro obtenido es la rigidez dinámica (kN/mm) del elemento, la cual se calcula como el cociente entre 75 kN de carga y la diferencia de los desplazamientos medios evaluados para la carga de 20 y

95 kN. Además, para cada ciclo se registra la curva de carga-desplazamiento, pudiendo así obtener otros parámetros como energía disipada o deformación máxima del material.

A.2.5 Ensayo de fatiga según método Locati

Con el objeto de evaluar la durabilidad de los materiales, se realiza un ensayo de fatiga acelerada, mediante el método de Locati (1952). Se emplea este procedimiento puesto que otros autores (Carrascal et al., 2007) indican que este ensayo puede llevar a mayores exigencias mecánicas que el ensayo de fatiga convencional.

Para el desarrollo del ensayo, se aplican cuatro niveles de carga (20/75, 20/90, 20/105 y 20/120 kN) de 50.000 ciclos cada uno, a una frecuencia de 4 Hz (Figura A4). En los distintos ciclos de carga se evalúa el desplazamiento vertical de las distintas esquinas de las placas elásticas, pudiendo así analizar la evolución de la rigidez dinámica y energía disipada. Además, antes y después del ensayo de fatiga, se realiza un ensayo estático y dinámico de las diferentes placas, con el objeto de analizar la pérdida de prestaciones mecánicas de las mismas, en referencia a la rigidez y la energía disipada.

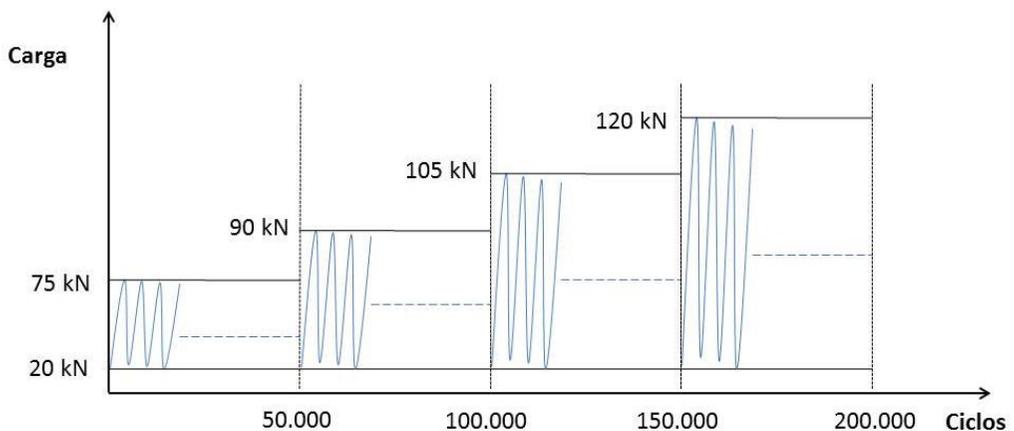


Figura A 4: Esquema de las condiciones de carga aplicadas en el ensayo Locati.

A.2.6 Ensayo de resistencia a la fatiga sobre traviesa inclinada (UNE-EN 13146-4). Método convencional

La realización de este ensayo permite predecir el comportamiento en vía a largo plazo de las placas de asiento, dado que éstas están sometidas a unos esfuerzos cíclicos que simulan lo que ocurre en condiciones normales de explotación en vía.

Para la realización del ensayo se debe disponer la placa elástica entre un cupón de carril y una traviesa (o media traviesa) inclinada para simular el contacto rueda-carril, de acuerdo con el esquema de montaje mostrado en la Figura A5.



Figura A 5: Disposición del equipo y los distintos dispositivos para el ensayo de fatiga a carga inclinada.

La inclinación de la traviesa, así como la carga máxima que solicita al conjunto, quedan fijadas según la rigidez dinámica de la placa de asiento a ensayar. Para este estudio, se emplea un ángulo de 33° y una carga máxima de 83 kN, dado que la rigidez dinámica de la placa es superior a 200 kN/mm. La Tabla A1 muestra los valores de estos parámetros.

Tabla A 1: Parámetros de carga y ángulo de aplicación de la carga, en función de la rigidez dinámica de las placas.

Rigidez dinámica (kN/mm)	<100	100-200	>200
Carga máxima P (kN)	70	75	83
Ángulo de carga (°)	26	33	33

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

La carga se aplica a una distancia de 15 mm desde el centro de curvatura de la cabeza del carril, según lo mostrado en la Figura A6.

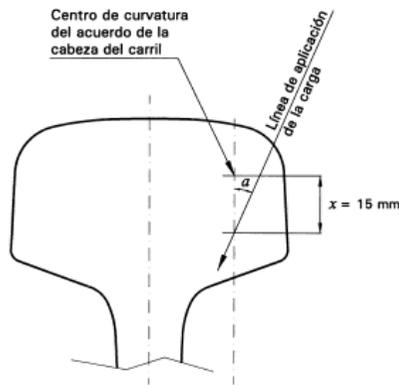


Figura A 6: Esquema de la posición y dirección de la carga durante el ensayo de fatiga con traviesa inclinada.

Una vez dispuesto el conjunto en la prensa de acuerdo con lo especificado, se lleva a cabo un proceso preparatorio consistente en aplicar una carga máxima P , y descargarlo a un ritmo no superior a 100 kN/min, repitiendo este proceso diez veces. En los ciclos 9 y 10 se mide el desplazamiento relativo del carril a la traviesa en los seis puntos del cupón del carril, según muestra la Figura A7.

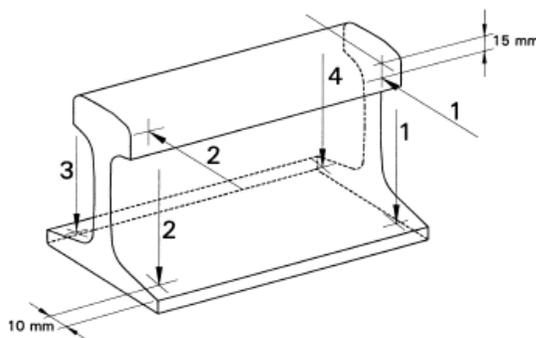


Figura A 7: Posición de los medidores de deformación durante el ensayo de fatiga.

El proceso de ensayo consiste en reproducir una carga periódica a 4 Hz, de amplitud constante entre 5 kN y P máxima, en una posición e inclinación determinadas sobre la cabeza del carril durante tres millones de ciclos.

Después del proceso de ensayo, se repite de nuevo la carga y descarga en 10 ciclos, igual que en el proceso preparatorio, midiendo desplazamientos relativos en los mismos puntos antes mencionados, en los ciclos 9 y 10.

Al final del ensayo se calculan los movimientos relativos del carril en cabeza y patín, de la siguiente forma:

- Desplazamientos horizontales:

$d_{1\text{cabeza}}$ = diferencia en valor absoluto entre las medias de los desplazamientos antes y después de los tres millones de ciclos, en el punto 1 (ver Figura A 7) de la cabeza del carril (mm). Se obtiene para la carga máxima P y para la carga mínima de 5 kN.

$d_1^{\text{máx}} = \left| \left(\frac{d_9^a + d_{10}^a}{2} \right) - \left(\frac{d_9^b + d_{10}^b}{2} \right) \right|$, siendo d_9^a y d_{10}^a los desplazamientos medidos en la cabeza antes de los 3 millones de ciclos y d_9^b y d_{10}^b los desplazamientos medidos en la cabeza después de los 3 millones de ciclos, para la carga máxima P.

$d_1^{\text{min}} = \left| \left(\frac{d_9^a + d_{10}^a}{2} \right) - \left(\frac{d_9^b + d_{10}^b}{2} \right) \right|$, siendo d_9^a y d_{10}^a los desplazamientos medidos en la cabeza antes de los 3 millones de ciclos y d_9^b y d_{10}^b los desplazamientos medidos en la cabeza después de los 3 millones de ciclos, para la carga de 5kN.

$d_{2\text{cabeza}}$ = diferencia en valor absoluto entre las medias de los desplazamientos antes y después de los tres millones de ciclos, en el punto 2 de la cabeza del carril (mm). Se obtiene para la carga máxima P y para la carga mínima de 5 kN.

- Desplazamientos verticales

$d_{1\text{patín}}$ = diferencia en valor absoluto entre las medias de los desplazamientos antes y después de los tres millones de ciclos, en el punto 1 del patín del carril (mm). Se obtiene para la carga máxima P y para la carga mínima de 5 kN.

$d_{2\text{patín}}$ = diferencia en valor absoluto entre las medias de los desplazamientos antes y después de los tres millones de ciclos, en el punto 2 del patín del carril (mm). Se obtiene para la carga máxima P y para la carga mínima de 5 kN.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

$d_{3\text{patín}}$ = diferencia en valor absoluto entre las medias de los desplazamientos antes y después de los tres millones de ciclos, en el punto 3 del patín del carril (mm). Se obtiene para la carga máxima P y para la carga mínima de 5 kN.

$d_{4\text{patín}}$ = diferencia en valor absoluto entre las medias de los desplazamientos antes y después de los tres millones de ciclos, en el punto 4 del patín del carril (mm). Se obtiene para la carga máxima P y para la carga mínima de 5 kN.

Obteniendo a partir de estos valores los movimientos en cabeza y patín, según se indica a continuación.

D^c = media de los valores $d_{i\text{cabeza}}$ ($i=1,2$), obtenida para la carga máxima P y para la carga mínima de 5 kN (mm)

$$D_{max}^c = \frac{d_1^{m\acute{a}x} + d_2^{m\acute{a}x}}{2}$$

$$D_{min}^c = \frac{d_1^{min} + d_2^{min}}{2}$$

D^p = media de los valores $d_{i\text{patín}}$ ($i=1,2,3,4$), obtenida para la carga máxima P y para la carga mínima de 5 kN (mm)

$$D_{max}^p = \frac{d_1^{m\acute{a}x} + d_2^{m\acute{a}x} + d_3^{m\acute{a}x} + d_4^{m\acute{a}x}}{4}$$

$$D_{min}^p = \frac{d_1^{min} + d_2^{min} + d_3^{min} + d_4^{min}}{4}$$

Además, al finalizar el proceso de fatiga se evalúa la rigidez estática y dinámica (4 Hz) entre 20-95 kN de la placa de asiento, analizando de esta forma la rigidización del material durante la aplicación repetida de cargas dinámicas.

A.2.7 Atenuación de impactos (UNE-EN 13146-3)

Este ensayo permite evaluar la respuesta de las placas de neumáticos ante la aplicación de una carga de impacto que simula la originada por el tráfico sobre la vía, midiendo las deformaciones inducidas en la traviesa. Para ello, se aplica

una carga de impacto dejando caer una masa sobre la cabeza de un carril fijado a una traviesa de hormigón. La atenuación del impacto se valora comparando las deformaciones registradas en la traviesa al disponer placas de neumáticos, con los resultados medidos al utilizar una placa de asiento de referencia (rigidez superior a 2.500 kN/mm).

La masa de caída, así como la altura de ésta, son establecidas de tal forma que no se exceda el 80% de la deformación nominal de fisuración calculada a partir del momento resistente de la traviesa en la sección bajo carril (UNE-EN 13230-1). Así, la masa es fijada en 20 kg, mientras que la altura es establecida en aproximadamente 1 metro (un brazo de 1,5 metros, con un ángulo superior a 45°), según la Figura 20. Para la medida de las deformaciones se usan dos LVDT que miden los desplazamientos horizontales (paralelos a la base de la traviesa) en la zona superior de la traviesa, bajo el asiento del carril, y en la zona inferior de la traviesa, entre 10 mm y 25 mm por encima de la base de la misma (Figura A8).



Figura A 8: Equipo utilizado para el ensayo de atenuación de impactos.

Para la preparación del ensayo, se llevan a cabo 10 impactos sobre la placa de referencia, comprobando que cinco mediciones consecutivas de la deformación registran unos intervalos de magnitud y tiempo de la deformación máxima dentro del 10% de la media del total de los impactos. Una vez puesto a punto el ensayo, se procede a evaluar la respuesta a impactos de las placas de

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

neumáticos, registrando para ello la deformación de tres impactos consecutivos sobre el sistema de fijación que incluye la placa objeto de ensayo.

Para el cálculo de la atenuación en la parte superior e inferior de la traviesa para la placa de asiento de ensayo, en relación a la placa de asiento de referencia, se establece la siguiente expresión matemática:

$$a_t = 100 \left(1 - \frac{\epsilon_{pct}}{\epsilon_{pcrt}} \right) \%$$

$$a_b = 100 \left(1 - \frac{\epsilon_{pcb}}{\epsilon_{pcb}} \right) \%$$

siendo a_t y a_b la atenuación (en tanto por cien en referencia a la atenuación de la placa referencia) en la parte superior e inferior de la traviesa, respectivamente. ϵ_{pct} y ϵ_{pcb} son las deformaciones en mm medidas en la parte superior e inferior de la traviesa, ante el impacto aplicado al sistema de fijación con la placa de neumático, mientras que ϵ_{pcrt} y ϵ_{pcb} son las deformaciones en mm medidas para la placa de referencia.

Así, el valor medio, obtenido a partir de los valores de atenuación medidos en la parte superior e inferior de la traviesa, es calculado de la siguiente forma:

$$a = \frac{(a_t + a_b)}{2} \%$$

A.2.8 Ensayo de deformación bajo carga de compresión (E.T. 03.324.005.2)

Con el desarrollo de este ensayo se pretende evaluar el comportamiento de las placas de asiento compuestas por caucho (principal componente de los neumáticos usados) ante cargas de compresión. La placa de asiento se somete a tres ciclos de compresión hasta una carga de 200 kN a una velocidad de 150 kN/min, registrando en el tercer ciclo la curva carga-deformación entre las cargas de 0,1 kN y 200 kN. En la Figura A9 se muestra el equipo utilizado para desarrollar este ensayo de compresión (E.T. 03.324.005.2).



Figura A 9: Equipo utilizado en el ensayo de compresión.

A.2.9 Resistencia al deterioro climático

Para evaluar la resistencia al deterioro climático de las propiedades mecánicas de las placas de neumáticos, se desarrollan los procesos de envejecimiento térmico, ciclos de frío-calor, y resistencia al hielo-deshielo, según la E.T. 03.360.574.2 de ADIF.

Envejecimiento térmico

El proceso de envejecimiento artificial consiste en almacenar durante 7 días a 70°C las muestras.

Ciclos frío-calor

Consistente en 40 ciclos de congelación (5 horas a -20°C y 1 hora a 10°C) y 40 ciclos de calor (5 horas a 50°C y 1 hora a 10°C), realizados de forma consecutiva.

Resistencia hielo-deshielo

Para la realización de este ensayo, las muestras se sometieron a 50 ciclos consistentes en almacenar el material durante 3 horas a -20°C seguido de 3 horas en un baño con agua a 12°C.

Anteriormente y posteriormente a la realización de estos procesos de deterioro artificial, se evalúa la rigidez vertical estática (entre 20-95 kN) y dinámica (a 4

Hz) de las placas de neumáticos, analizando de esta forma su cambio de propiedades ante los agentes climáticos.

A.3 Ensayos para suelas bajo traviesa

A.3.1 Ensayo módulo estático (DIN 45673-6)

La respuesta estática de las suelas de neumáticos es medida, de acuerdo con la DIN 45673-6 para distintos niveles de carga: (i) 0,01-0,10 N/mm²; (ii) 0,01-0,20 N/mm². En ambos ensayos, las muestras elásticas (adheridas a cubos de hormigón) son sometidas a 3 ciclos de carga entre 0,00 N/mm² y 0,25 N/mm², bajo una velocidad de la sollicitación de 0,01 N/mm²/s. Durante el último ciclo de carga se registran las curvas carga-desplazamiento, a partir de las cuales se calcula el módulo estático como la relación entre la diferencia de las tensiones de medida y la diferencia de los desplazamientos asociados a dichos niveles de presión.



Figura A 10: Disposición del ensayo para evaluar la rigidez de suelas.

A.3.2 Ensayo módulo dinámico (DIN 45673-6)

El ensayo dinámico es realizado a dos frecuencias de carga distintas, 5 Hz y 10 Hz, de acuerdo a la DIN 45673-6. La amplitud de carga es establecida entre 0,01-0,10 N/mm², aplicando ciclos de carga durante 10 segundos (para cada valor de frecuencia), tras los cuales se aplican 10 ciclos más en los que se determina el módulo dinámico como la media de los valores obtenidos en los citados 10 últimos ciclos. Además, para cada ciclo se registra la curva tensión-deformación, con el fin de profundizar en el estudio del comportamiento de las suelas elásticas.

A.3.3 Ensayo resistencia a la fatiga (DIN 45673-6)

El ensayo de fatiga también es desarrollado de acuerdo con la DIN 45673-6, la cual establece la aplicación de un millón de ciclos (entre las tensiones $0,05 \text{ N/mm}^2$ y $0,33 \text{ N/mm}^2$) a 4Hz de frecuencia, sobre un bloque de hormigón con suela elástica adherida, dispuesto sobre un cajón de balasto (Figura A11). Los valores de tensión son fijados para reproducir las cargas transmitidas por trenes con carga por eje próxima a 250 kN. Durante el ensayo se miden los desplazamientos verticales presentados por el conjunto.



Figura A 11: Configuración del ensayo de fatiga para suelas sobre cajón de balasto.

Además, posterior al proceso de fatiga se realizan ensayos estáticos y dinámicos, para evaluar el cambio de propiedades del material elástico, pudiendo de esta forma determinar la durabilidad del mismo.

A.3.4 Resistencia al deterioro climático

Para evaluar la resistencia al deterioro climático del material constituyente de las suelas de neumáticos, se desarrollan, los procesos de envejecimiento térmico, ciclos de frío-calor, y resistencia al hielo-deshielo, según la E.T. 03.360.574.2 de ADIF. Para analizar el cambio de propiedades del material se

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

obtiene su resistencia a tracción y su elongación antes y después de los procesos de deterioro artificial.

Envejecimiento térmico

El proceso de envejecimiento artificial consiste en almacenar durante 7 días a 70°C las muestras.

Ciclos frío-calor

Consistente en 40 ciclos de congelación (5 horas a -20°C y 1 hora a 10°C) y 40 ciclos de calor (5 horas a 50°C y 1 hora a 10°C), realizados de forma consecutiva.

Resistencia hielo-deshielo

Para la realización de este ensayo, las muestras se sometieron a 50 ciclos consistentes en almacenar el material durante 3 horas a -20°C seguido de 3 horas en un baño con agua a 12°C.

A.3.5 Ensayo de resistencia lateral

Para evaluar la resistencia lateral del sistema sobre capa de balasto, se aplica un esfuerzo mediante carga inclinada (15°), a los bloques de hormigón (con y sin suela) que simulan las traviesas. Los bloques se disponen sobre una capa de balasto, ubicada dentro de un cajón (Figura A12). De esta forma, se tratan de reproducir las condiciones de trabajo de las suelas elásticas en un sistema de vía sobre balasto. La carga es aplicada a una velocidad capaz de producir un desplazamiento horizontal del conjunto (bloque de hormigón con o sin suela) igual a 0,1 mm/s, midiendo la fuerza horizontal necesaria para provocar un desplazamiento lateral del sistema igual a 2 mm.

Los valores de esfuerzo máximo aplicado para cada muestra con suelas de neumáticos, son comparados con los registrados para bloques de hormigón sin suela elástico, pudiendo de esta forma analizar la influencia de estos materiales. Además, se evalúa la respuesta dinámica de las distintas muestras mediante la aplicación de 1.000 ciclos de carga, con una frecuencia de 5 Hz y una amplitud de carga horizontal igual a 1 kN.



Figura A 12: Configuración del ensayo realizado para evaluar la resistencia lateral del conjunto.

A.3.6 Medida del área de contacto entre el balasto y las traviesas

Para analizar la influencia de las suelas de neumáticos en el contacto traviesas-balasto, se mide el área de contacto entre las partículas granulares y los bloques de hormigón (con o sin suela) que simulan las traviesas de la vía de ferrocarril. Para ello, se aplica una capa de pintura sobre las partículas de balasto (aquellas que estarían en contacto con las muestras, Figura A13), de manera que sean capaces de marcar el área de contacto entre el balasto y los bloques de hormigón (o la suela adherida a éstos). Las muestras son dispuestas sobre la capa de balasto con las partículas pintadas (antes de que comience el proceso de secado de la pintura), y se lleva a cabo un proceso de cargas similares a las del ensayo estático, pudiendo de esta forma garantizar el contacto entre los materiales. Una vez cesado el proceso de carga, se mide el área de pintura marcado en las muestras.



Figura A 13: Aplicación de pintura sobre las partículas de balasto, con el fin de medir el área de contacto entre suelas/traviesas y balasto.

A.3.7 Ensayo de arrancamiento

Para la evaluación de la resistencia a la tracción entre la unión suelas de neumáticos-hormigón, se aplica un esfuerzo de tracción sobre un dispositivo con un diámetro de 120 mm, pegado previamente (mediante resina epoxy) a la muestra de suela de neumático. Para evitar el desplazamiento del conjunto (suela adherida a un bloque de hormigón), el soporte rígido es fijado mediante barras transversales a la base del equipo de ensayo (Figura A14). La velocidad de carga (tracción) es fijada en 1 kN/minuto, registrando el valor máximo de esfuerzo necesario para separar la suela elástica del bloque de hormigón.



Figura A 14: Configuración del ensayo desarrollado para medir la resistencia al arrancamiento de suelas.

A.4 Ensayos para mantas bajo balasto

A.4.1 Ensayo módulo estático (DBS 918 071-01 y DIN 45673-5)

Para caracterizar el comportamiento de las mantas elásticas, se lleva a cabo un ensayo estático consistente en la aplicación de 3 ciclos de carga de compresión a una velocidad de carga y descarga igual a 1mm de deformación vertical por minuto, entre los valores de tensión igual a 0,01 N/mm² y 0,11 N/mm². La medida del módulo de rigidez se calcula en el tercer ciclo de carga, entre los valores de 0,02 N/mm² y 0,10 N/mm², registrando también la curva de tensión-

deformación vertical. Para el caso de la norma DBS 918 071-01, se emplean como actuadores placas de acero de superficie plana (Figura A15 izquierda), mientras que para el caso de la norma DIN 45673-5, una de las placas de carga cuenta con una superficie que trata de simular el contacto con la capa de balasto (Figura A15 derecha).



Figura A 15: Placas planas (izquierda) utilizadas en la norma DBS 918 071-1 para solicitar mantas elásticas, y placas normalizada de balasto (derecha) empleada de acuerdo a la norma DIN 45673-5.

A.4.2 Ensayo módulo dinámico (DBS 918 071-01 y DIN 45673-5)

Con el fin de evaluar la respuesta de las mantas ante las sollicitaciones dinámicas provocadas por el paso de los vehículos, se realizan distintos ensayos dinámicos a frecuencias iguales a 1Hz, 5Hz y 10 Hz. En estos ensayos se aplican 1000 ciclos de carga entre una tensión mínima de 0,02 N/mm² y 0,10 N/mm², registrando para cada ciclo la curva de tensión-deformación vertical, a partir de la cual se calculan parámetros como el módulo de rigidez o la energía disipada por el material. Al igual que en el ensayo estático, se utilizan placas de carga planas para la norma DBS 918 071-01, mientras que para la norma DIN 45673-5 se emplea una placa de balasto normalizada.



Figura A 16: Configuración del equipo utilizado para evaluar la respuesta dinámica de mantas.

A.4.3 Ensayo de resistencia a la fatiga (DBS 918 071-01)

El ensayo de resistencia a la fatiga mecánica es realizado mediante el uso de un cajón de balasto (Figura A17) con el fin de simular las condiciones de trabajo de las mantas en vías ferroviarias tradicionales. Así, se dispone una manta con dimensiones horizontales iguales a 1000 mm x 1000 mm en el fondo del cajón de balasto, bajo un espesor de 35 cm de material granular. Para simular la fatiga del material, se aplican 12,5 millones de ciclos de carga. La carga mínima es de 10 kN, mientras que la carga superior depende del módulo estático de la manta. La carga se aplica en dos series, una de 10 millones de ciclos, y la segunda (de mayor amplitud de carga) de 2,5 millones. La sollicitación del conjunto se realiza mediante un disco metálico de 600 mm de diámetro. La frecuencia de carga es establecida en 5 Hz.



Figura A 17: Detalle del sistema de aplicación de cargas sobre un cajón de balasto para la fatiga de mantas.

A.4.4 Resistencia al deterioro climático

Se realizan 3 procesos de deterioro artificial para evaluar la resistencia de las mantas ante los condicionantes climáticos. Los procesos consisten en resistencia al agua, heladicidad y envejecimiento térmico.

Resistencia al agua (DIN 45673-5, DBS 918 071-01)

Las muestras (de dimensiones horizontales iguales a 300 mm x 300 mm) de manta elástica son acondicionadas en un baño con agua a 50°C durante 7 días.

Resistencia a la heladicidad (DIN 45673-5)

En primer lugar las muestras se almacenan 24 horas en agua a 23±5°C, aplicando en las primeras 2 horas 60 ciclos de carga de compresión entre 0,05 N/mm² y 0,15 N/mm². Una vez transcurrido el tiempo de almacenamiento en agua, las muestras se congelan mojadas a -16°C durante 11 horas. Posteriormente, se descongelan las muestras y se sube la temperatura hasta 30°C, manteniendo este valor durante 11 horas. Este proceso es repetido 50 veces.

Desarrollo de Elementos Elásticos a partir de Capas de Neumáticos Fuera de Uso para su Aplicación en Vías Ferroviarias

Envejecimiento térmico (DIN 45673-5)

Las muestras son almacenadas durante 7 días en una estufa a 70°C.

En una etapa previa y posterior a estos procesos de acondicionamiento, se determina el módulo de rigidez estático y dinámico (a 1Hz, 5Hz y 10Hz) de las distintas muestras, pudiendo de esta forma evaluar el cambio de propiedades provocado por los métodos de deterioro artificial.