



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

ESTUDIO DEL VUELO DE BALASTO EN VÍAS DE ALTA
VELOCIDAD. ANÁLISIS DE ESTUDIOS PREEXISTENTES
Y EVALUACIÓN VIBRATORIA DEL PROBLEMA

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

AUTOR/A: Monge Cañas, Fernando

Tutor/a: Real Herráiz, Julia Irene

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Trabajo Fin de Máster

ESTUDIO DEL VUELO DE BALASTO EN VÍAS DE ALTA VELOCIDAD. ANÁLISIS DE ESTUDIOS PREEXISTENTES Y EVALUACIÓN VIBRATORIA DEL PROBLEMA.

MÁSTER EN INGENIERÍA AERONÁUTICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

Universitat Politècnica de València



AUTOR: Fernando Monge Cañas

Tutora: Julia Irene Real Herraiz

Curso académico: 2022/2023

12 de julio de 2023

Abstract

In this Master's Thesis, the problem of ballast lifting on high-speed railway lines is placed in context. The possibility of finding a solution to the problem is considered, and for this purpose: a detailed qualitative analysis of pre-existing studies on the subject (with the intention of characterising the problem and starting from a solid base), synthesising six specialised studies on the subject and the conclusions they reach; and an analysis from the vibrational point of view of the problem (considering the origin, effects and possible modelling of the problem). Finally, possible future solutions are proposed as current challenges and future lines of action.

Resumen

CASTELLANO: En el presente Trabajo de Fin de Máster se coloca como contexto la problemática del levantamiento de balasto en líneas ferroviarias de alta velocidad. Se plantea la posibilidad de encontrar una solución al problema, y para ello se realiza: un análisis cualitativo detallado de estudios preexistentes sobre dicha temática (con la intención de caracterizar el problema y partir de una base sólida), sintetizando seis estudios especializados sobre la temática y las conclusiones que alcanzan; y un análisis desde el punto de vista vibratorio del problema (planteando origen, efectos y posibles modelizaciones del mismo). Por último, se plantean las conclusiones obtenidas y las posibles soluciones a futuro como desafíos actuales y futuras líneas de acción.

VALENCIÁ: En el present Treball de Fi de Màster es col·loca com a context la problemàtica de l'alçament de balast en línies ferroviàries d'alta velocitat. Es planteja la possibilitat de trobar una solució al problema, i per a això es realitza: una anàlisi qualitativa detallada d'estudis preexistents sobre aquesta temàtica (amb la intenció de caracteritzar el problema i partir d'una base sòlida), sintetitzant sis estudis especialitzats sobre la temàtica i les conclusions que aconsegueixen; i una anàlisi des del punt de vista vibratori del problema (plantejant origen, efectes i possibles modelitzacions del problema). Finalment, es plantegen possibles solucions a futur com a desafiaments actuals i futures línies d'acció.

Índice

I MEMORIA	2
1. Introducción	4
2. Análisis de estudios realizados en materia del vuelo de balasto	6
2.1. Introducción	6
2.2. Conceptos básicos y descripción del fenómeno	6
2.2.1. Estructura ferroviaria de alta velocidad	6
2.2.2. Vías ferroviarias de alta velocidad en balasto	6
2.2.3. Vías ferroviarias de alta velocidad en placa	9
2.2.4. Fenómeno del vuelo de balasto	10
2.2.5. Causas del fenómeno	11
2.3. Estudios IN-SITU. Ensayos experimentales presenciales	12
2.3.1. Estudio DEUFRAKO/AOA	12
2.3.2. Estudio en Italia en el marco del Proyecto DEUFRAKO/AOA	13
2.3.3. Estudio de la Universidad de Southampton - Eurotúnel (UK)	14
2.3.4. Estudio en Corea del Sur	19
2.3.5. Estudio en España - Proyectos AURÍGIDAS y AEROTRAIN	22
2.3.6. Estudio en Japón	25
2.4. Estudios en túnel aerodinámico	27
2.4.1. Aplicación sobre las características del balasto	28
2.4.2. Aplicación sobre la aerodinámica del tren	32
2.5. Estudios de elementos discretos	34
2.6. Estudios con CFD	43
2.6.1. CFD aplicado en vehículos ferroviarios	43
2.6.2. CFD aplicado al lecho de balasto y su entorno aerodinámico	47
3. Estudio de vibraciones sobre piedras de balasto	50
3.1. Introducción	50
3.2. Balasto como material granular y planteamiento de la problemática	50
3.3. Origen de las vibraciones sobre el balasto	52
3.3.1. Vibración del emparrillado	52
3.3.2. Vibraciones debidas al contacto de la rueda con el carril	56
3.3.3. Vibraciones por paso de carga cuasi-estática	57
3.3.4. Vibraciones debidas a danza de traviesas	59
3.3.5. Vibraciones debidas a las transiciones en vía	59

3.3.6. Efectos de propagación de ondas en alta velocidad	60
3.3.7. Efectos dinámicos en puentes	61
3.3.8. Efecto de las frecuencias	64
3.4. Consecuencias de las vibraciones sobre la capa de balasto	67
3.4.1. Licuefacción del balasto	68
3.4.2. Efecto de labores de mantenimiento. La importancia del concepto de Bateo	70
3.4.3. Caracterización de la magnitud vibratoria en la capa de balasto	78
4. Conclusiones y desafíos actuales	84
II ODS	88
ODS	90
1. Anexo al Trabajo de Fin de Máster: Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030	90
III PLIEGO DE CONDICIONES	92
Pliego de condiciones	94
1. Objetivo	94
2. Condiciones del Software	94
2.1. Software empleado	94
2.2. Hardware empleado	96
3. Condiciones de trabajo	97
IV PRESUPUESTO	100
Presupuesto	102
1. Consideraciones previas	102
2. Desglose y cálculo de costes unitarios	102
V REFERENCIAS	106

1. Referencias	106
Índice de figuras	110

Parte I

MEMORIA

1. Introducción

En la era actual de la tecnología y la movilidad, los trenes de alta velocidad han revolucionado el transporte terrestre, brindando una opción eficiente y sostenible para la conexión rápida entre ciudades de todo el mundo. Sin embargo, junto con los avances en la velocidad y la eficiencia de estos sistemas ferroviarios, han surgido desafíos asociados a la estabilidad y seguridad de las vías. Uno de estos desafíos es el fenómeno del vuelo de balasto, que puede tener un impacto significativo en el rendimiento y la comodidad de los pasajeros.

El balasto, una capa de material granular que se encuentra entre las traviesas y las vías, desempeña un papel esencial en cuanto a durabilidad y resistencia de las líneas ferroviarias se refiere. De hecho, con la aparición de la alta velocidad y los desarrollos tecnológicos dirigidos en esta dirección, se detectó que dicho material podía ser desplazado y arrojado al aire, generando vibraciones y desequilibrios importantes en el sistema que, a su vez, podían suponer consecuencias catastróficas.

En este Trabajo de Fin de Máster nos adentramos en el estudio del comentado vuelo de balasto en vías de alta velocidad, con el objetivo de explorar la viabilidad de desarrollar un balasto de mayor densidad que reduzca las posibilidades de este fenómeno. Debe tenerse en cuenta que el objetivo del ensayo no es el desarrollo en sí mismo de dicha alternativa al balasto ya existente, sino que busca servir como paso previo en la resolución de dicha problemática. Se llevarán a cabo dos enfoques distintos pero complementarios que proporcionarán contexto y estado del arte para el posible desarrollo futuro de un proyecto a mayor escala.



Figura 1: Balasto depositado en las vías. Fuente: Dominio público.

En la primera parte del estudio, se analizarán investigaciones previas de diferentes autores relacionadas con la problemática. Se analizan una amplia diversidad de estudios realizados hasta la fecha para comprender mejor los mecanismos involucrados, las causas subyacentes y las consecuencias del fenómeno. Antes de esto, se desarrollará un apartado dedicado a los conceptos básicos de las vías ferroviarias de alta velocidad en balasto, a fin de establecer un marco teórico sólido para nuestro análisis. También se tratan las vías en placa como una alternativa a las vías en balasto y compararemos sus características y desempeño. En cualquier caso, no se hace especial hincapié en ellas al no resultar de interés en los análisis.

En la segunda parte, nos sumergiremos en un estudio vibratorio de las vías de alta velocidad. A través de esta evaluación, investigaremos las posibles implicaciones de las vibraciones en la generación del vuelo de balasto, identificaremos las causas subyacentes y examinaremos los estudios previos realizados en relación con este problema. Nuestro objetivo es caracterizar el estado vibratorio actual de las vías de cara a modelizar y simular futuras alternativas al material granular.

Estos dos estudios en profundidad resultarán útiles para posicionar y contextualizar el problema de cara a desarrollar en adelante soluciones. Analizar estudios anteriores sobre el vuelo de balasto servirá para detectar las principales características del balasto actual que llevan a ello y caracterizar los estados vibratorios por los que se ve influida la vía.

Para finalizar este Trabajo, se agrupan las conclusiones obtenidas de los análisis, se sintetizan y se plantean algunas posibles líneas futuras de acción como materiales sustitutivos o tipos de simulaciones que podrían realizarse en pasos posteriores.

2. Análisis de estudios realizados en materia del vuelo de balasto

2.1. Introducción

El primer paso para el planteamiento de un proyecto que buscara eliminar el fenómeno del levante de balasto en líneas ferroviarias de alta velocidad, sería la recopilación de estudios e investigaciones científicas anteriormente realizadas a este respecto. El objetivo principal de esta práctica sería analizar y condensar las conclusiones obtenidas en anteriores acercamientos al problema para contar con un punto de partida sólido y unas bases y directrices claras. Además, tener una visión global de algunos de los estudios realizados hasta la fecha, da luz sobre incógnitas como los diferentes aspectos que influyen y el peso de cada uno en el fenómeno (un fenómeno que además no está determinado por completo en la actualidad y supone una interesante línea de estudio en lo tecnológico y en lo económico).

2.2. Conceptos básicos y descripción del fenómeno

Para contextualizar y dar empaque a los estudios que se analizarán en lo que sigue, es importante, en primer lugar, exponer y dar información sobre el ámbito de ocurrencia del levante de balasto (vías ferroviarias de alta velocidad) y, posteriormente, describir cualitativamente la problemática.

2.2.1. Estructura ferroviaria de alta velocidad

La mayoría de los casos en los que se produce el vuelo de balasto en el ámbito ferroviario se dan cuando las velocidades exceden los 300 km/h. Por tanto, se puede concluir que se trata de un problema ligado, sobre todo, a la infraestructura de alta velocidad sobre balasto.

Para destacar y poner en su lugar cada uno de los elementos que tienen un papel en esta problemática, se ha considerado fundamental aclarar en qué consiste una infraestructura ferroviaria de alta velocidad, qué elementos la componen y cuáles son sus principales tipologías. Con respecto a esto último, lo más importante a destacar es la existencia de las vías ferroviarias en placa (en contraposición de las de balasto) de las que también se dará información pormenorizada en lo que sigue para justificar por qué no son objeto de estos estudios.

En los subapartados siguientes se va a realizar una descripción básica de ambas tipologías de vía, dando una mayor profusión al caso de las vías de alta velocidad en balasto.

2.2.2. Vías ferroviarias de alta velocidad en balasto

La manera común de llevar a cabo una obra de infraestructura ferroviaria suele pasar por la utilización de balasto. Suele comenzar con una obra de tierra para conseguir la explanada o explanación. Sobre ella se coloca la capa de forma, el subbalasto y, posteriormente, el balasto, tras el cual se añaden emparrillados (formados por traviesas, placas de asiento, carriles) además de otros elementos que concederían rigidez

al conjunto. En la Figura 2 se muestra un esquema de la disposición de capas en una vía ferroviaria de alta velocidad con balasto.

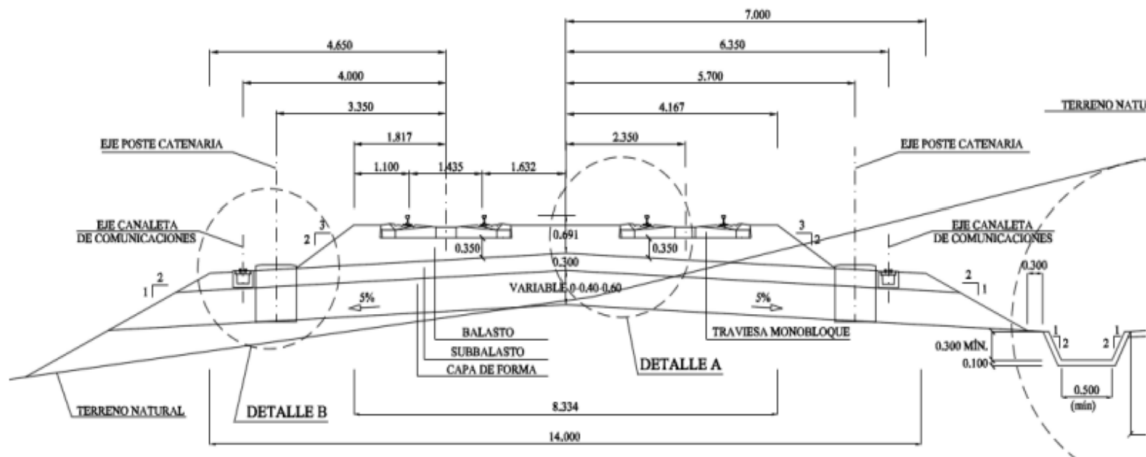


Figura 2: Esquema de disposición de capas en infraestructura ferroviaria con balasto. Fuente: Instrucción General para el Proyecto de Plataformas de ADIF (IGP-2008).

La selección del balasto como material de construcción para superestructuras como las ferroviarias de alta velocidad se debe principalmente a [1]:

- Proporciona elasticidad y amortiguamiento a la vía y reduce las acciones que llegan a las capas posteriores.
- Mejora el reparto de tensiones y esfuerzos generados por los trenes, aumentando la vida útil de la explanada.
- Resistencia a la abrasión que suele producirse por contacto túneles, puentes de hormigón, etc.
- Estabiliza la vía en todas direcciones, impidiendo el desplazamiento de la misma debido a las cargas generadas por el tráfico ferroviario.
- Con trabajos como el bateo, la nivelación o el rasanteo, permite la recuperación de la geometría de vía tras deformación de algún tipo.
- Puede actuar como material drenante y sirve, por tanto, para evitar inundaciones de vía.

Como ya se ha apuntado anteriormente, los principales elementos que forman la superestructura de una vía ferroviaria de alta velocidad son: el carril, las sujeciones de carril, las placas de asiento, las traviesas y la banqueta de balasto. A continuación, se exponen cada uno de estos elementos de forma más detallada.

Carril

El carril sirve de elemento guía y sustentador del rodante, soportando las acciones dinámicas que produce la velocidad de los vehículos. Principalmente constituido de acero y designado por su peso por metro lineal, siendo de aplicación en las líneas ferroviarias de alta velocidad españolas el modelo UIC 60 (60 kg/m), del tipo Vignole. Cuanto mayor sea la velocidad, mayor inercia del carril y, por ello, mayor peso por metro lineal necesario.

Traviesas y sujeciones

La traviesa actúa como elemento de unión entre carril y balasto. Como su propio nombre apunta, está colocado en la dirección transversal al movimiento del tren y sus principales funciones son repartir y transmitir cargas y soportar el carril, forzando su posición y corrigiendo inclinación y separación. Reducen las presiones transmitidas al balasto a través de las superficies de contacto entre ellas y estabilizan la vía.

En el desarrollo de una vía de alta velocidad, la determinación de distancia entre ejes de traviesas consecutivas es un parámetro primordial. Los valores oscilan entre 50 y 70 cm, siendo habitual en España la separación de 60 cm, ya que los valores extremos del intervalo pueden traducirse en problemas de bateo de la vía si se toma 50 o deformaciones exageradas si se toma 70.

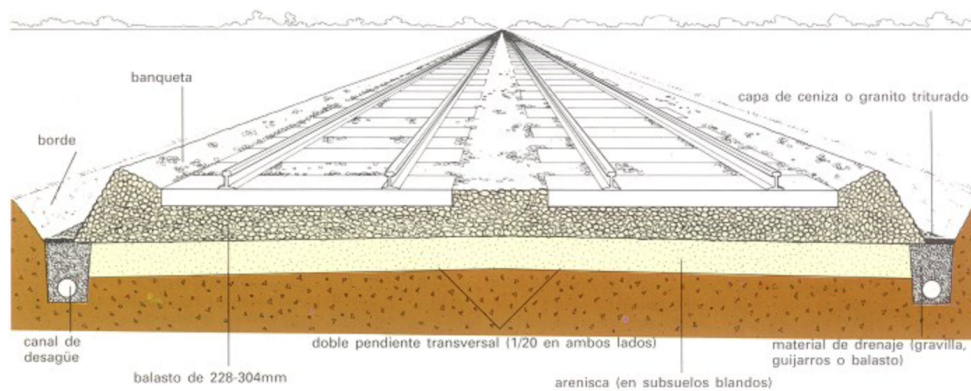


Figura 3: Detalle de vía con balasto. Fuente: Geotexan (Web).

En la actualidad, en nuestro país, el modelo de traviesa más empleado es el AI-04, consistente en una traviesa monobloque de hormigón. En cuanto a masa y longitud, según la Especificación Técnica de Interoperabilidad (E.T.I.) del sistema ferroviario de alta velocidad, las traviesas en vías de balasto deben pesar al menos 220 kg y medir, como mínimo, 2.25 m.

Las sujeciones, por su parte, son las encargadas de fijar carriles con traviesas. Además, al estar compuestas de materiales elásticos, sirven (junto con las placas de asiento, también elásticas) para compensar la rigidez debida a las traviesas de hormigón.

Placa de asiento

Las placas de asiento son componentes presentes entre la traviesa y el carril, que buscan:

- Proteger las traviesas de los posibles impactos procedentes del carril
- Reducir tensiones sobre traviesas, aumentando área de contacto entre los carriles y estas.
- Posicionar correctamente carril sobre traviesa.

Según la E.T.I., en vías destinadas a la Alta Velocidad, la rigidez de las placas de asiento cuando las traviesas son de hormigón no debe ser mayor de 600kN/mm (para asegurar la elasticidad necesaria del conjunto). La tendencia en la actualidad es la de utilizar placas de caucho o polietileno con mayores espesores, disminuyendo por su parte la rigidez.

2.2.3. Vías ferroviarias de alta velocidad en placa

A pesar de no entrar en el ámbito de estudio de este Trabajo de Fin de Máster (puesto que en esta tipología de líneas no está presente el balasto), se introduce el concepto de vías ferroviarias de alta velocidad en placa a modo de diferenciación con las anteriormente comentadas.

La principal diferencia que presenta con las líneas de balasto es que, en estas, la banqueta de balasto es sustituida por una losa de hormigón o mezcla bituminosa y los elementos de apoyo al carril son bloques colocados dentro de la losa (aunque también se dan casos donde son traviesas de hormigón adaptadas).

Estas vías en placa surgen para mejorar algunos aspectos con respecto a las vías ferroviarias de alta velocidad en balasto:

1. Reducir costes en mantenimiento, asegurando una geometría más sólida tras el paso del tiempo. Las mayores solicitaciones estáticas y dinámicas debidas a maquinaria más moderna y compleja, dificulta cada vez más que las vías de balasto puedan mantener una geometría concreta.
2. Solventar el problema del deterioro acelerado de las infraestructuras de balasto, debido al aumento del tráfico mixto.

Siendo efectivamente una solución más moderna y que mitiga fuertemente el problema del vuelo de balasto, encuentra su mayor inconveniente en el desembolso económico que supone su proyección y construcción. De hecho, es una solución apenas extendida hasta la fecha en España, no así en otras localizaciones como Alemania y Japón, aunque las pruebas realizadas (como la del Corredor Mediterráneo, con la prueba de los seis tipos de vía en placa más comunes) han sido satisfactorias.

Las funciones principales que debe cumplir la losa portante (el elemento que discierne de la tipología con balasto) son:

- Aportar apoyo rígido ante las cargas generadas por los trenes, sin renunciar a la elasticidad necesaria para el confort de los pasajeros.
- Transmitir homogéneamente las cargas al resto de capas.
- Mantener la geometría de la vía.
- Ser un elemento impermeable para evitar filtraciones a capas consecutivas de la estructura.

Por último, comentar, al respecto de las vías en placa, que existen infinidad de tipologías en función de la materialización de los apoyos del carril: apoyo puntual o continuo, con traviesas (empotradas o de apoyo libre), sin traviesas (prefabricado o monolítico), etc. Esta gran variedad de opciones la convierte en una opción más versátil y abierta a investigación que las vías ferroviarias en balasto.

2.2.4. Fenómeno del vuelo de balasto

El primero de los pasos a la hora de buscar soluciones a un problema concreto es la definición, identificación y caracterización del mismo. En este apartado se trata de explicar de forma resumida en qué consiste el fenómeno del vuelo de balasto, alrededor del que giran todos los estudios que se analizan a posteriori. Debido a que no es el objeto del Trabajo, la definición del fenómeno será cualitativa y no se ahonda ni en su definición teórica ni en las formas más comunes de modelizarlo.

Cuando las velocidades del tráfico ferroviario superan los 300 km/h, se genera un flujo turbulento en las inmediaciones de la maquinaria. Debido a este flujo turbulento pueden levantarse partículas de balasto por encima de la capa constituyente e incluso de las traviesas. Al iniciarse el movimiento de la partícula, en realidad esta no cuenta con mucha velocidad, pero, empujada por la carga aerodinámica del tren a alta velocidad, puede haberse movido lo suficiente para acercarse a los bajos de la máquina, donde el flujo es incluso de mayor intensidad. Esta primera partícula rebotada y contando ya con una energía cinética considerable, podría salir despedida lejos de la vía y terminar con la problemática pero, también podría colisionar con otras piedras de balasto que pueden rebotar entre sí y con el tren y producir las denominadas nubes de balasto. En esta nube, las piedras van rebotando continuamente entre vía y bajos del tren, produciendo el inevitable deterioro de ambos. Además, la relación entre el número de partículas proyectadas y la energía cinética del impacto entre ellas es lineal.

Entre las muchas casuísticas que pueden darse al tratarse de un fenómeno fuertemente aleatorio, está la posibilidad de que las partículas de la nube choquen con las traviesas. Esto resulta incluso más peligroso puesto que, al tratarse de un elemento elástico, las piedras impactarían con mayor energía en los bajos del tren.

Entre los efectos más perjudiciales del vuelo de balasto se encuentran:

- Mayor mantenimiento necesario en las vías por producirse daños en las ruedas del tren, los carriles e incluso en las pantallas acústicas laterales (si están presentes).
- Mayor mantenimiento necesario de las máquinas por daños en bogies, ejes, timonería de freno o elementos auxiliares.
- Afección a la circulación (en la seguridad).

Todos estos efectos empujan a la circulación por debajo de los 300 km/h, solución que no puede aceptarse ya que tanto la infraestructura como el material rodante permiten velocidades mayores. Así, se impulsan una infinidad de estudios sobre esta fenomenología para encontrar soluciones que no pasen por la disminución de velocidad en los viajes.

2.2.5. Causas del fenómeno

A continuación, se enumeran someramente las causas que derivan en la ocurrencia del fenómeno del vuelo de balasto:

1. Flujo inducido por la velocidad del tren. El paso del tren sobre las vías a altas velocidades genera un flujo turbulento con la energía cinética y la aleatoriedad de fenómenos que esto supone.
2. Efecto rebote. El levantamiento de algunas partículas por cualquiera del resto de razones puede llevar al rebote con otras partículas y a la generación de la ya comentada nube de balasto (más resistente y destructiva en el tiempo).
3. Acumulación de hielo y nieve en los bajos de la máquina. En zonas frías suele producirse en vuelo de balasto por estas razones, ya que la velocidad del tren empuja a los cristales de hielo a desprenderse y pueden producir choques con piedras de balasto.

Por lo tanto, vistas las razones que pueden llevar al vuelo de balasto, se concluye que la razón principal de la ocurrencia del fenómeno es la generación del flujo turbulento en la zona entre el tren y la vía, por las altas velocidades de tránsito. De ahí que el vuelo de balasto sea una problemática común en las líneas ferroviarias de alta velocidad.

2.3. Estudios IN-SITU. Ensayos experimentales presenciales

La primera tipología de estudios realizados que se van a analizar son los experimentales *in situ*. Aquellos estudios en los que se han realizado medidas de forma presencial en tramos experimentales de vías de alta velocidad.

Entre los seis estudios que se analizarán a continuación pueden encontrarse muchas diferencias como, por ejemplo, los dispositivos de instrumentación utilizados o los parámetros a determinar. Esta variedad de resultados y datos adquiridos resulta primordial para determinar la eficacia de cada solución y encontrar la vía más adecuada para abordar la problemática.

Los estudios que se contemplan en este análisis son los siguientes:

1. *Evaluación de las cargas aerodinámicas sobre la plataforma de la vía que provocan la proyección de balasto: resultados del proyecto DEUFRAKO/AOA (Aerodynamics in Open Air).* [2]
2. *Mediciones aerodinámicas a escala real bajo un tren de alta velocidad.* [3]
3. *Un estudio experimental sobre la relación entre el fenómeno de vuelo del balasto y el viento fuerte bajo el tren de alta velocidad.* [4]
4. *Comparación cruzada de técnicas de medición para la determinación de las cargas aerodinámicas inducidas por el tren en el lecho de la vía.* [5]
5. *Caracterización y modelización de fenómenos de balasto volante en líneas de tren de alta velocidad.* [6]
6. *Estudio sobre el flujo bajo el suelo para reducir los fenómenos de vuelo del balasto.* [7]

2.3.1. Estudio DEUFRAKO/AOA

El estudio *Assessment of the aerodynamic loads on the trackbed causing ballast projection: results from the DEUFRAKO project Aerodynamics in Open Air (AOA)* [2] es uno de los más importantes cuando se habla de trabajos previos al respecto de la problemática del vuelo de balasto. En dicho estudio, realizado por Kaltenbach et al., se midieron parámetros de velocidad en tramo de plena vía de diferentes alta velocidad europeos, en alturas relativas diferenciadas desde el lecho de balasto.

En la Figura 4 se muestran medidas de velocidad de diferentes aparatos colocados a 200 mm de altura del lecho de balasto, asociadas al flujo que produce un tren de alta velocidad. Cada pico de la gráfica corresponde con el paso de cada coche del tren, coincidiendo el último pico más pronunciado con el paso del último coche. Más adelante en el análisis se mostrarán en detalle parámetros medidos en el estudio y las conclusiones que se pueden sacar de él.

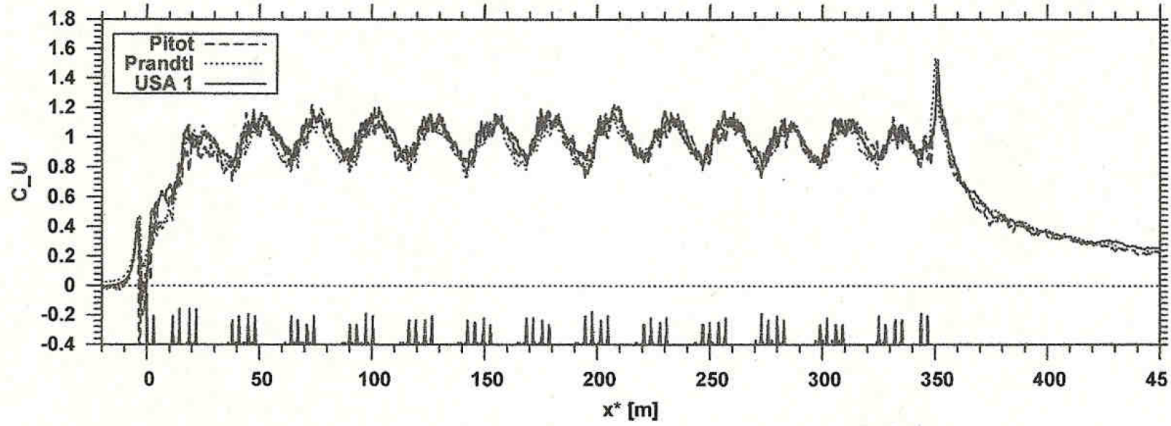


Figura 4: Velocidades medias al paso de un tren, con aparatos a 200 mm de centro de vía. Fuente: [2]

2.3.2. Estudio en Italia en el marco del Proyecto DEUFRAKO/AOA

Continuando con la propuesta de Kaltenback et al. [2], Deeg et al. llevaron a cabo unas mediciones experimentales en la línea de alta velocidad Roma-Florenia [5], con la utilización de sondas en las inmediaciones del túnel Terranuova-Le Ville. En el desarrollo de estas mediciones y de cara a conclusiones que puedan sacarse, independientemente del papel que pueda jugar la rugosidad de la capa de balasto, el hecho de realizarse las mediciones cerca de un túnel supone variaciones en la capa límite a lo largo del tren y es un hecho que no puede obviarse. Además, en el tramo de pruebas existía también una valla que podía afectar al flujo y, por tanto, a los resultados.

El estudio consistió en registrar datos tras el paso de 114 trenes de alta velocidad durante tres días y en ambas direcciones del trayecto, sin llevar a cabo labores de mantenimiento. Entre los aparatos de medida utilizados se contaba con tubos de Pitot y de Prandtl, medidores de presión estática y anemómetros ultrasónicos.

Tras las mediciones in situ y una normalización posterior, el factor de velocidad de fricción se establece en $\kappa_s = 80\text{mm}$, valor que puede usarse para determinar la velocidad de flujo que induce el paso de la máquina sobre la capa de balasto [8]:

$$U_{critical} = \frac{u_{t,thresh}}{c_t} = \frac{1}{A} \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_A}{\rho_s}} d_p g \quad (1)$$

donde d_p es el diámetro medio de la piedra de balasto y ρ_s y ρ_A representan las densidades de piedra y aire, respectivamente.

Supuestos valores de $c_t = \frac{u_t}{u_{train}} = 0,138$, $d_p = 0,04$ m, $\rho_s = 2600$ kg/m³, $\rho_A = 1,2$ kg/m³, parámetro $A = 0,1$ y analizando los datos de la rugosidad estimados en el estudio presentes en la Tabla

probe	z_{origin}	offset b	slope m	$c_t = \frac{u_t}{u_{train}}$	$\kappa_s [mm]$
slab track (121-124)	-202	0.1873	0.1588	0.064	9.9
slab track (121-124)	-220	0.1162	0.1855	0.076	17.4
ballast (221-224)	-192	-0.2105	0.3015	0.124	65.6
ballast (221-224)	-202	-0.2933	0.3356	0.138	78.2
ballast (221-224)	-220	-0.4439	0.3962	0.162	100.0

Cuadro 1: Estimación de la rugosidad tras mediciones de tubo de Pitot. Fuente: [5]

1, según la Ecuación 1, la velocidad de circulación crítica a partir de la cual se produciría levantamiento de balasto sería $U_{critical} = 75$ km/h.

Evidentemente, el resultado obtenido está muy por debajo de lo esperado. Las evidencias experimentales en el propio experimento apuntaban a un valor cercano a los 250 km/h. Una de las razones por las que puede darse esto es que, la aparición de movimiento en las partículas de balasto es condición necesaria pero no suficiente para que se produzca el fenómeno del levantamiento de balasto (ya que además de ello, las piedras deben alcanzar el nivel de energía cinética suficiente para llevar a un movimiento exitoso).

2.3.3. Estudio de la Universidad de Southampton - Eurotúnel (UK)

A raíz de los estudios previos ya comentados, varios estudios fueron llevados a cabo para contrastar resultados. El primero de ellos que se analiza en este Trabajo de Fin de Máster es el nombrado como *Full-Scale aerodynamic measurements underneath a high speed train* llevado a cabo por Quinn y Hayward [3].

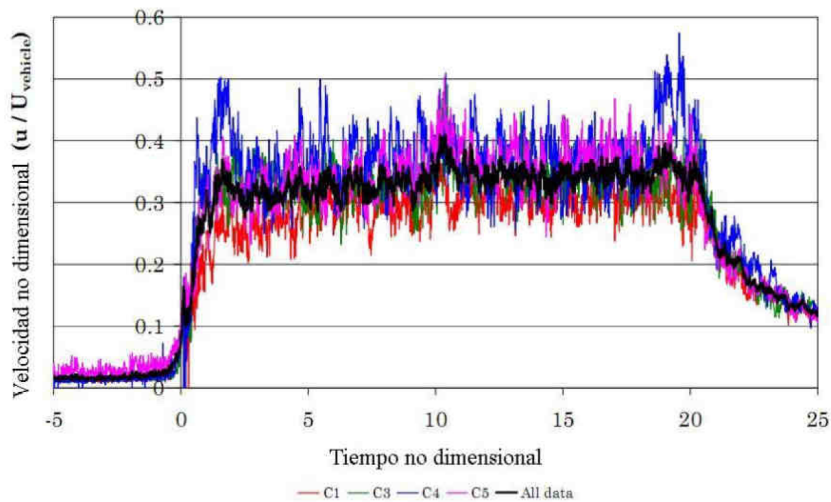


Figura 5: Velocidades adimensionales al paso de un tren. Fuente: [3]

En la Figura 5 se puede comprobar que los resultados obtenidos (en este caso adimensionalizados) son muy similares a los mostrados en la Figura 4. Los picos al inicio, medio y final se deben a la configuración específica del tren con el que se realizó este estudio en particular.

De los ensayos se puede concluir que la velocidad inducida al flujo entre tren y balasto es del orden de $0,4 \cdot V_{tren}$ con zonas cercanas a $0,5 \cdot V_{tren}$. Además, la clara oscilación del parámetro ejemplifica lo turbulento del fenómeno y, como ya se ha comentado, es la naturaleza turbulenta la que lleva a la alta energía cinética adquirida por las piedras de balasto.

Este estudio hizo patente una problemática no detectada hasta el momento: el *ballast pitting*. Se trata de un problema relativo a la proyección de piedras de balasto sobre la cabeza del carril (o superficie de rodadura), llevando a escarificaciones o roturas de material superficial. Un ejemplo del daño en la cabeza del carril se muestra en la Figura 6.



Figura 6: Daño en superficie de rodadura debido a *ballast pitting* en Eurotúnel. Fuente: [3]

Quinn y Hayward, interesados por este nuevo fenómeno y buscando determinar las características aerodinámicas y mecánicas, llevaron a cabo un estudio en el Eurotúnel, a su paso por Maidstone, Kent (Reino Unido). La razón de elegir este tramo en particular es que los trenes, al paso por este, se acercan a los valores máximos de velocidad de operación.

En la Fase 1 del estudio se instalaron dispositivos de grabación sobre el terraplén de balasto, tomándose imágenes a 25 fps. El análisis de dichas imágenes sirvió para determinar en detalle la dirección y velocidad

del flujo causado, además de la inducción (o no inducción) de vuelo de piedras de balasto. Esta Fase 1 también sirvió para determinar que el patrón de flujo generado (Figura 7), tan solo estaba relacionado con el movimiento relativo del tren sobre la vía sin importar si se trataba de un tramo curvo o recto. Así, en la Fase siguiente, todas las mediciones se tomaron en un tramo recto por simplicidad.

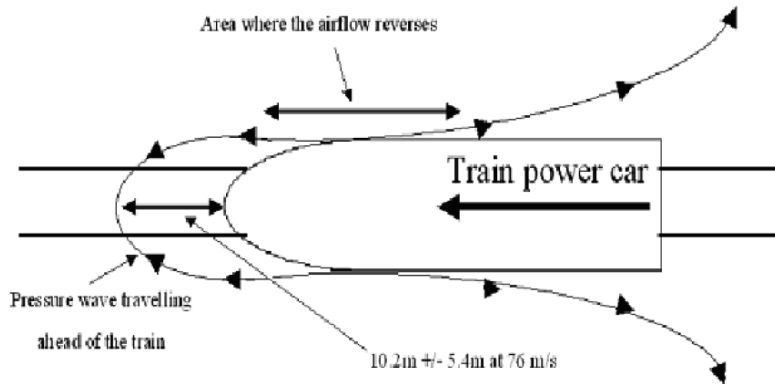


Figura 7: Patrón aproximado del flujo de viento generado por el paso del tren. Determinado en Fase 1. Fuente: [3]

Las mediciones correspondientes de presión y velocidad del flujo sobre la capa de balasto se dieron en la Fase posterior (Fase 2). Para su determinación se utilizaron 5 transductores de presión conectados a 4 sondas estáticas de presión y a una sonda cobra (Figura 8).



Figura 8: Instrumentación sobre capa de balasto, a excepción de sonda cobra. Fuente: [3]

La componente transversal a la trayectoria de flujo del tren (Figura 9) está asociada con las regiones de la cabeza y de la cola, donde la trayectoria del flujo se produce hacia el centro de la vía, siendo las velocidades más bajas generalmente a lo largo el resto del vehículo. En la región de la cabeza, el pico de

diferencial de presión que puede verse se debe al pulso de presión positiva generado por la propia cabeza de la máquina.

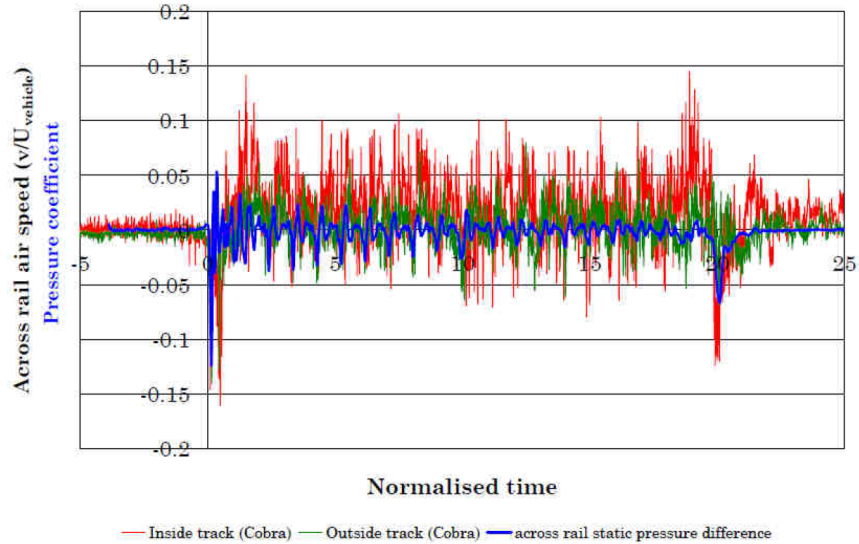


Figura 9: Componente transversal a la trayectoria de flujo generado. Fuente: [3]

Por su parte, la componente vertical de nuevo resulta consistente con la posición con respecto a la vía. Pueden comprobarse los picos esperados por cabeza y cola y los diferentes pulsos debidos al paso de cada coche (Figura 10).

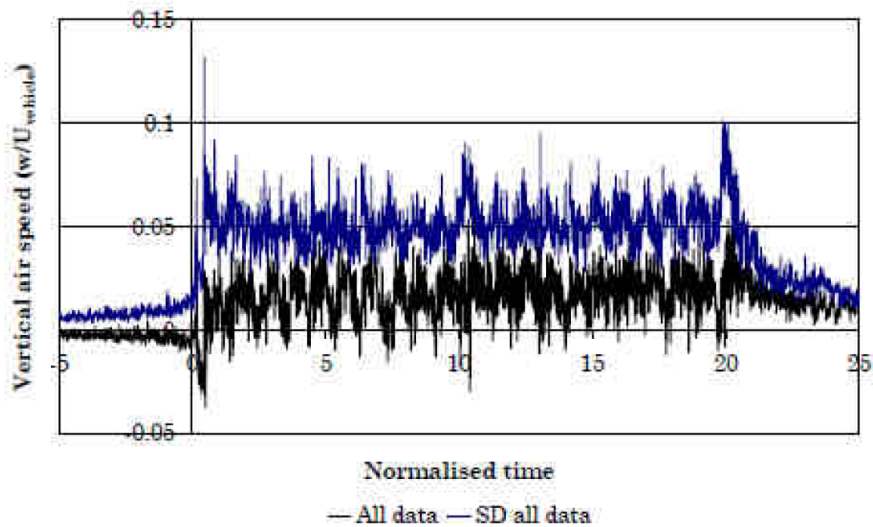


Figura 10: Componente vertical del flujo. Fuente: [3]

El flujo sobre vía junto con los picos debidos al paso de los coches lleva a fluctuaciones importantes de presión sobre la superficie del lecho de balasto, generando un mecanismo que propicia el transporte de partículas hacia la cabeza del carril y fuera. Con los resultados de presiones y componentes de velocidad se concluye que, para la producción del vuelo de balasto, son necesarias al menos las siguientes dos etapas:

1. Suspensión inicial de la piedra de balasto causada por movimiento inducido por las cargas aerodinámicas debidas al paso del tren.
2. Movimiento posterior hacia la cabeza del carril (en el caso del *ballast pitting*), hacia los bajos de la máquina o directamente sobre el lecho de balasto.

Los resultados de dichas mediciones experimentales, tras su paso por la Universidad de Southhampton y posterior análisis, sirvieron también para determinar el papel del ámbito vibratorio en la problemática. El denominado como efecto vibratorio de gravedad descompensada en las piedras de balasto hizo patente que las vibraciones del paso del tren también podían incrementar el vuelo. Las vibraciones registradas han mostrado la existencia de variables vibratorias significativas relacionadas con la probabilidad de mayor ocurrencia del levantamiento y, en algunos casos, principales causantes de la suspensión inicial.

En particular, este efecto se asocia a la cabeza, donde se generan las ya explicadas ráfagas verticales de flujo, capaces de barrer las piedras de balasto que se encuentran excitadas por la vibración (fase inicial del fenómeno) hacia las cabezas de los carriles (en el caso del *ballast pitting*) o hacia los bajos del tren o lecho del balasto.

Entre las principales conclusiones obtenidas de los trabajos de Quinn y Hayward destaca la necesidad de realizar mediciones adicionales para verificar algunas de las teorías propuestas, el apunte de la utilización de dichos datos para llevar a cabo un modelo del comportamiento de las partículas y el posible futuro análisis a través de esto del tamaño de piedra de balasto con una mayor disposición a experimentar el fenómeno de *ballast pitting* o vuelo de balasto genérico. [3]

2.3.4. Estudio en Corea del Sur

Tras el acercamiento al orden de las magnitudes de velocidad del flujo sobre el lecho de balasto tras el paso de trenes, resulta interesante detectar las zonas entre balasto y tren donde se dan los máximos de velocidad. Un estudio previo fundamental a este respecto es *An Experimental Study on the Relationship between Ballast-flying Phenomenon and Strong Wind under High-speed Train* de Kwon y Park [4]. En él se buscó medir la velocidad del flujo según altura (con respecto a lecho de balasto) y distancia respecto a eje de vía.

Los modelos de tren testados fueron los surcoreanos conocidos como KTX y las características del flujo generado se midieron a través de un sistema llamado Kiel-probe. El sistema de medición (Figura 11) se encontraba en un tramo del trayecto de una línea de alta velocidad Seúl-Busan, elegido por estar en campo abierto y no sufrir de las perturbaciones propias de túneles o puentes (efecto que sí se daba en estudios anteriores).

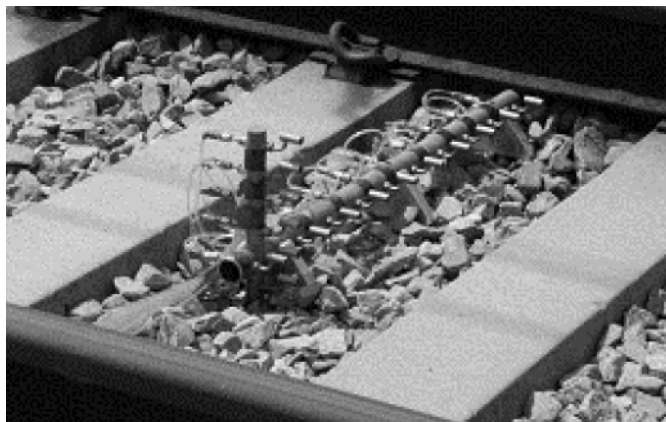


Figura 11: Sistema de medición de flujo Kiel-Probe en tramo de línea Seúl-Busan. Fuente: [4]

A continuación, en la Tabla 2 se resumen las características de los trenes tipo KTX que formaron parte del estudio:

CASO	Tipo de Tren	Longitud (m)	Velocidad de paso (km/h)	Duración de paso (s)
1	KTX	388.104	289.07	4.83
2			291.08	4.80
3			295.18	4.73
4			279.43	5.00
5			295.18	4.73

Cuadro 2: Características de los trenes a estudio. Fuente: [4]

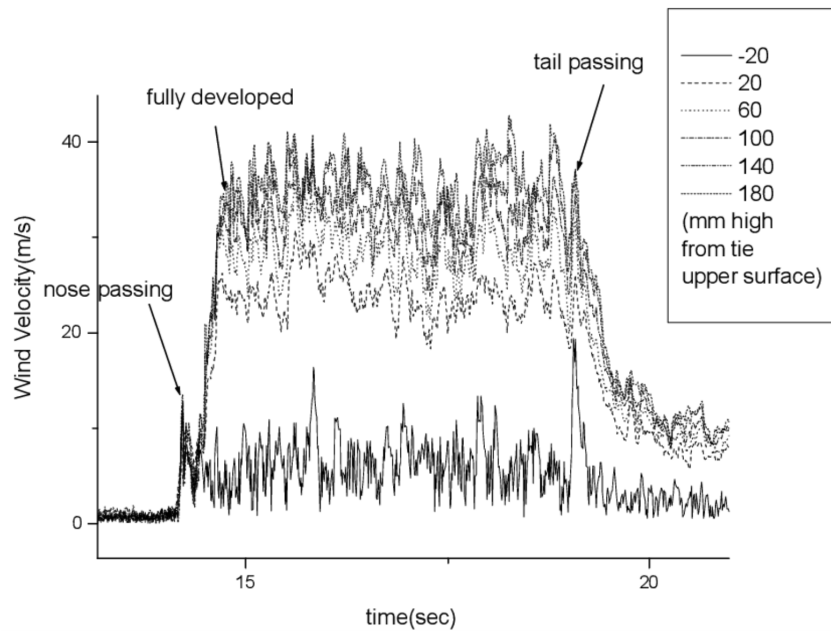


Figura 12: Fluctuación de velocidad del flujo generado a distintas alturas sobre el lecho de balasto. Fuente: [4]

En la Figura 12 se representan los resultados de fluctuación de velocidad para distintas alturas respecto del lecho de balasto en el Caso 2 (291.08 km/h). Para determinar la velocidad de flujo en cada punto de medición se utilizó la expresión:

$$U_i = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_s - P_i)} \quad (2)$$

donde U_i se corresponde con la velocidad del flujo en cada punto de medición, ρ con la densidad del aire, P_i con la presión total en cada punto y P_s con la presión estática total.

En la Figura 12 puede comprobarse que el paso de la cabeza genera un pico de velocidad del flujo y una posterior fluctuación continua hasta el paso de la cola. En el estudio se determinó que el obvio desfase que se produce desde el paso de la cabeza hasta este pico está relacionado con la naturaleza turbulenta del aire y con su viscosidad. El número de fluctuaciones apreciables coincide con el número de coches (en este caso 20) del tren a estudio, por lo que se puede afirmar que están originadas por los bogies y espacios entre coches.

Cuando un tren va a altas velocidades se genera una capa límite de tipo laminar en los bajos, que se mueve aguas abajo hasta desarrollarse por completo y alcanzar la categoría de turbulenta justo por encima de la capa de balasto. En el estudio también trató de determinarse la longitud del tren medida desde la cabeza, a la que este flujo se encontraba desarrollado por completo y los resultados oscilaron entre 29.52 y 49.02 m comparando todos los casos.

Del estudio también se pudo derivar una expresión para calcular la velocidad media de la ráfaga de viento sobre la capa de balasto en el momento del desarrollo completo \bar{U} :

$$\bar{U} = \int_{t_{fully-developed}}^{t_{tail}} \frac{U(t)}{t_{tail} - t_{fully-developed}} dt \frac{300}{U_{train}} \quad (3)$$

donde: t_{tail} es el instante del paso de cola del tren, $t_{fully-developed}$ es el instante en el que el flujo está completamente desarrollado y U_{train} es la velocidad con la que pasa el tren en el momento del estudio, medida en km/h.

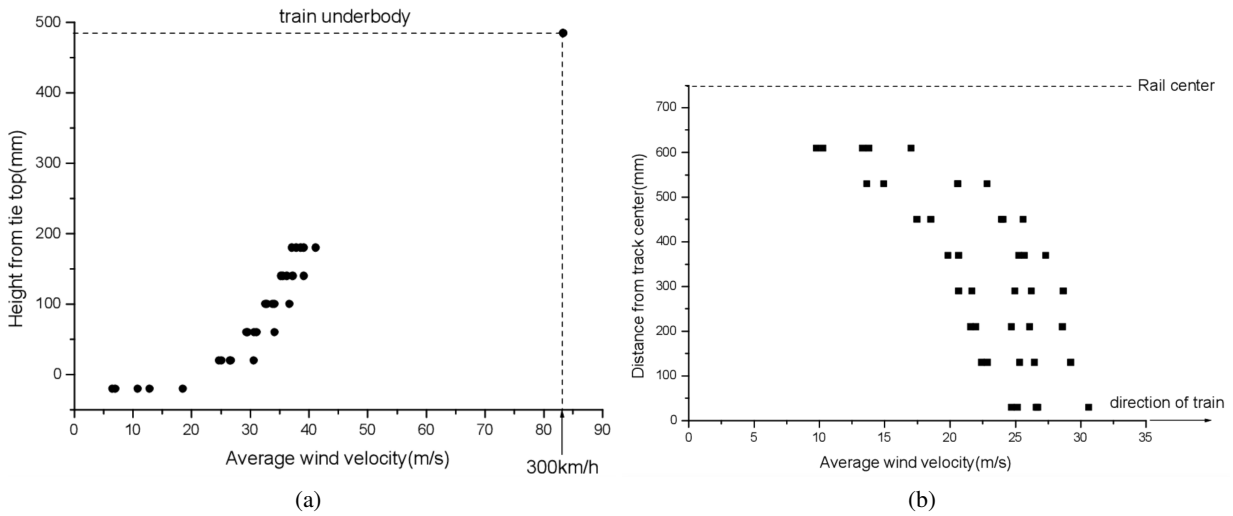


Figura 13: (a) Distribución vertical de velocidades medias en eje de simetría. (b) Distribución de velocidades en un plano horizontal, 20 mm sobre la cabeza del carril. Fuente: [4]

En la Figura 13 se muestran distintos resultados de velocidades medias normalizadas para una velocidad de paso de 300 km/h. Las conclusiones más importantes extraídas del estudio son que:

- La velocidad de flujo es menor cerca del balasto, aunque su naturaleza turbulenta puede producir picos capaces de generar levantamiento de piedras.
- La velocidad de flujo es mayor en el plano de simetría de la vía.

2.3.5. Estudio en España - Proyectos AURÍGIDAS y AEROTRAIN

Otro estudio interesante y útil como trabajo previo sobre la problemática del vuelo de balasto es el llamado *Characterization and Modeling of Flying Ballast Phenomena in Highspeed Train Lines*, llevado a cabo por Lázaro et al. [6] con líneas de alta velocidad de la red española ADIF. Esta publicación es una de las muchas fruto de los dos proyectos conocidos como AURÍGIDAS y AEROTRAIN, con el propio ADIF como socio del consorcio investigador. Este estudio es fundamental en el trabajo previo, puesto que en él se consiguió una caracterización experimental completa del fenómeno.

Para comenzar, se buscó la caracterización del flujo desarrollado tras el paso de un tren de alta velocidad, tomando medidas en un tramo de la línea Madrid-Barcelona (más concretamente, a la altura de Brihuega-Guadalajara).



Figura 14: Tramo de pruebas en Guadalajara. Fuente: [6]

El tramo utilizado para el estudio contaba con una separación entre traviesas de 0.6 m, piedras de balasto con una densidad media de 2700 kg/m^3 , un plano tangente horizontal a las partículas colocado a 233 mm por debajo del plano de la cabeza del carril (TOR) y la base de las traviesas a 203 mm por debajo.

La Figura 15 resulta de utilidad para comprender el sistema de coordenadas utilizado y la posición del TOR:

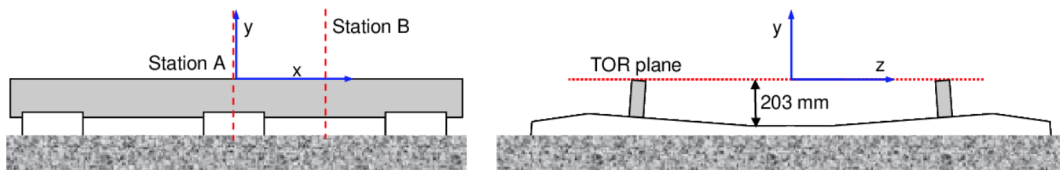


Figura 15: Aclaración: sistema de coordenadas. Fuente: [6]

Para la determinación del flujo a lo largo de la vía y las posibles variaciones generadas a lo largo de su desarrollo, en el estudio se consideró adecuado tener en cuenta dos estaciones distintas de medición (ilustradas con detalle en la Figura 15:

- **Estación A (x=0 m):** en plano medio de traviesa de referencia.
- **Estación B (x=0.3 m):** en el plano medio que separa dos traviesas consecutivas.

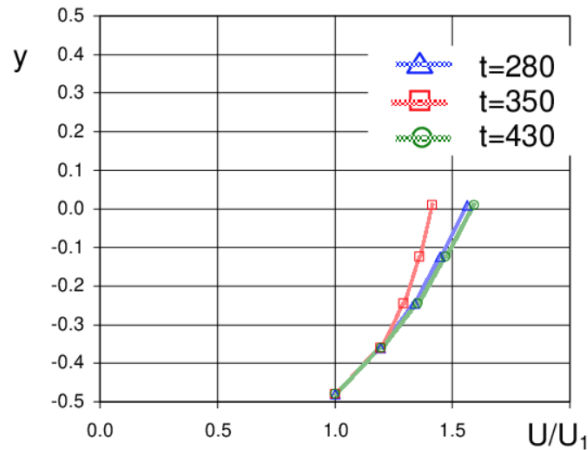


Figura 16: Perfil de velocidades medias en distintos momentos de paso del tren. Fuente: [6]

En la Figura 16 puede apreciarse la distribución vertical adimensional de velocidades en distintos pasos de tiempo de la máquina (más concretamente, $t=280$, $t=350$, $t=430$). Se comprueba que las fluctuaciones de velocidad en la coordenada y cuentan con un perfil casi uniforme (particularidad propia de un flujo turbulento de Couette).

El análisis de mediciones de velocidad de flujo generadas en el lecho de balasto apunta a los siguientes resultados: velocidad media cercana a $\frac{V_{tren}}{3}$ con desviación estándar del orden de $\frac{V_{tren}}{10}$. Además, juntando esto con el perfil casi uniforme que puede verse en la Figura 16, se concluye que la región de flujo cerca de la capa de balasto se asemeja a un flujo con perfil logarítmico con una velocidad de fricción de $\approx 0,06V_{tren}$ y una rugosidad equivalente dependiente de la posición relativa del tren.

Por otra parte, tras el análisis de grabaciones tomadas en la zona de ensayo, el estudio permitió también definir una serie de fases para caracterizar con mayor lujo de detalle el fenómeno del vuelo de balasto. Dichas fases son las siguientes:

1. **Fase de inducción:** Etapa en la que las fuerzas aerodinámicas contrarrestan las acciones gravitatorias e inician el movimiento de una piedra del lecho.
2. **Fase de transporte superficial:** Etapa en la que dichas cargas aerodinámicas llevan al movimiento exitoso de la partícula y a su posterior desplazamiento sobre lecho o traviesas.

3. **Fase de vuelo e impacto:** Etapa en la que la piedra alcanza tal nivel de energía cinética que puede abandonar el lecho e impactar en los bajos del tren, acelerada gracias a la propia carga aerodinámica de la máquina.
4. **Fase de post-impacto:** Momento en el que la partícula es empujada contra el lecho de balasto de nuevo, pudiendo generar efecto en cadena y movilizar un mayor número de ellas.

A través de las ecuaciones de continuidad del momento lineal y angular de una partícula en el lecho de balasto y sometida a la acción aerodinámica, Lázaro et al fueron capaces de modelizar matemática y estadísticamente la fase de transporte superficial. Así, a través de esta modelización, conociendo la población total de medio granular se puede estimar la probabilidad de impacto de una de las partículas.

En la misma línea de este estudio, Lázaro et al. publican *Test Procedure for Quantitative Ballast Projection Risk Evaluation* [9], donde determinan, basándose en la modelización anteriormente mencionada, un procedimiento para obtener la evaluación del riesgo de impacto contra un vehículo por el fenómeno del levante de balasto. Se determina un valor muy bajo como límite aceptable de impactos de balasto por cada 100 km de vía de alta velocidad y longitud del tren a estudio.

Para dicho procedimiento de evaluación de riesgos se desarrolla un algoritmo numérico que se adscribe a la descripción del fenómeno a través de las 4 fases anteriormente enumeradas. El algoritmo, por su parte, tiene en cuenta la función de probabilidad de densidad del tamaño de las piedras de balasto, además de su densidad característica. Con una división del medio en j partes (cada una de ellas con su función de probabilidad de densidad que describe qué fracción de partículas de tamaño i se encuentra en dicha posición j) se define un riesgo de proyección de partículas.

Según [9], la denominada como fase de transporte superficial puede describirse como un proceso estocástico expresado según la evolución del momento lineal de una partícula. Por otro lado, para la fase de vuelo, se marca un cierto umbral del momento lineal mencionado a sobrepasar. Si es superado, comienza la fase de vuelo en trayectoria parabólica, modelada también con un proceso estocástico.

2.3.6. Estudio en Japón

De varios de los estudios previos ya comentados, se puede extraer que los bajos del tren juegan un papel importante en el mecanismo de iniciación del vuelo de balasto. A este respecto, el último de los estudios previos con mediciones in situ que se presenta es la publicación de Ido et al., *Study on under-floor flow to reduce ballast flying phenomena* [7], donde se plantea la línea de trabajo de suavizar formas (tanto en bajos como en cola, cabeza del tren y resto de la máquina), buscando perfiles más aerodinámicos y la disminución de la ocurrencia del problema.

Debido a la idea de que los bogies podían ser el principal causante de variaciones en los resultados, para el estudio se tomaron dos modelos de tren con diferentes tipologías de bajos y diferentes equipamientos en la zona de bogies. En la Figura 17 se muestran los dos tipos de tren presentes en el estudio. El Tipo 1 constaba de unas placas planas cubriendo todo el equipo inferior del tren, mientras que en el Tipo 2, estas cubiertas están montadas envolviendo todo el equipo inferior, con laterales curvos.

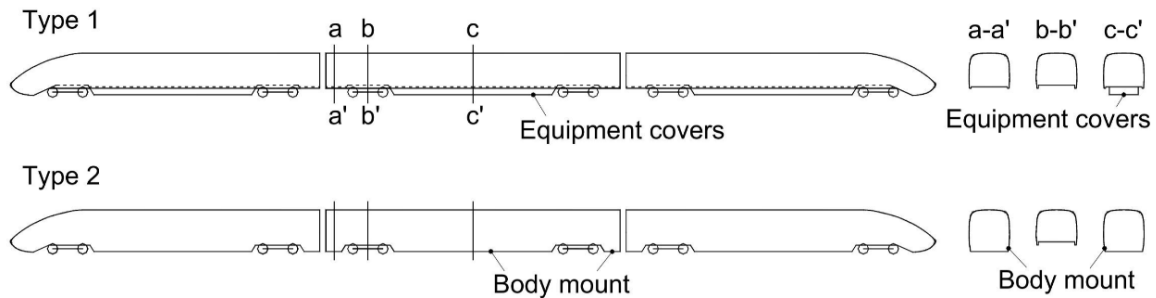


Figura 17: Tipos de trenes presentes en el estudio, según bajos de la máquina. Fuente: [7]

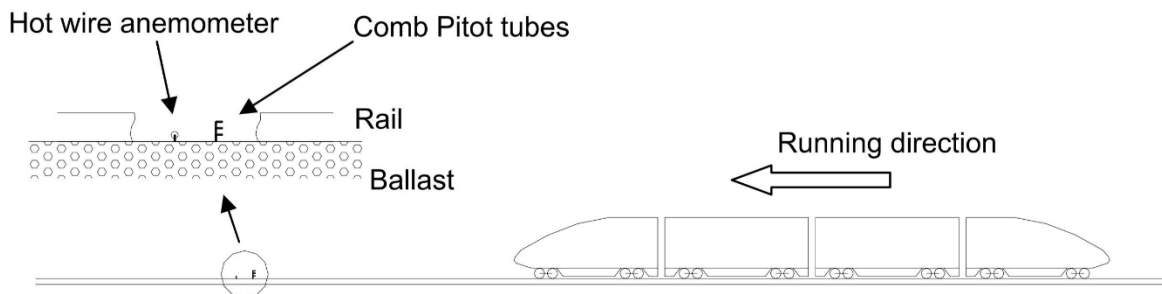


Figura 18: Medida del flujo sobre el balasto. Fuente: [7]

En la Figura 19 se muestran las velocidades de flujo medidas por los tubos de Pitot tras el paso de los trenes. Se puede comprobar la fuerte turbulencia del flujo para ambas tipologías:

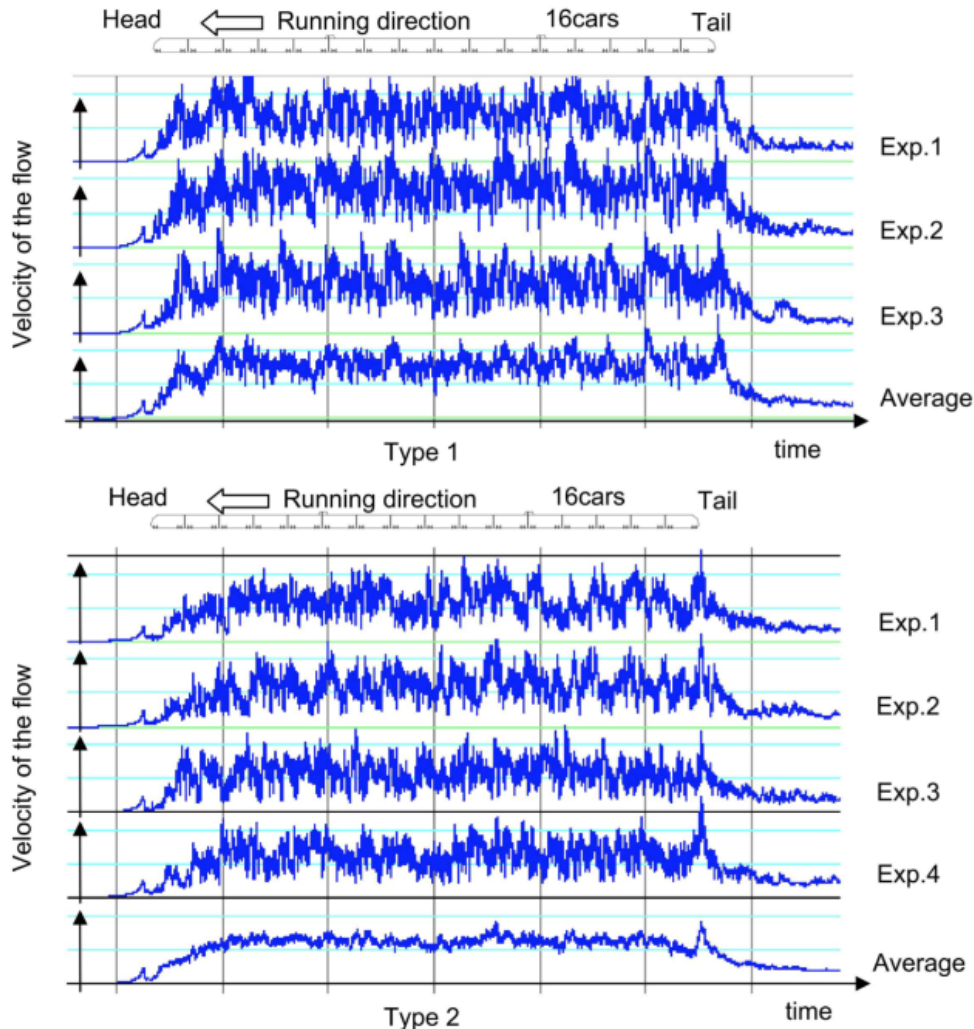


Figura 19: Velocidades del flujo para los dos tipos de trenes a estudio. Fuente: [7]

Para analizar dicho flujo se realizó un promediado de la siguiente manera:

- Con el fin de reducir el ruido de la señal y marcar más la diferencia entre bogies y otros elementos del tren, se tomaron paquetes de datos con velocidades similares y se realizó su promedio para normalizar la velocidad de cada tren y, finalmente, añadir los datos de series de tiempo por el número de datos de series de tiempo.
- Cuando el tren cruza una determinada sección, aproximadamente a partir del paso del tercer coche del tren, la velocidad del flujo sobre el lecho aumenta gradualmente hasta el paso de cola.

En la Figura 20 se muestran los perfiles de velocidad del flujo (adimensional) promediando los tramos desde el tercer hasta el quinceavo coche, sobre el lecho de balasto a diferentes alturas. Se hace patente que los trenes del Tipo 2 inducían menores velocidades al flujo que los de Tipo 1, es decir: suavizar las formas en la parte baja del tren produjo disminución de la velocidad del flujo sobre la capa de balasto.

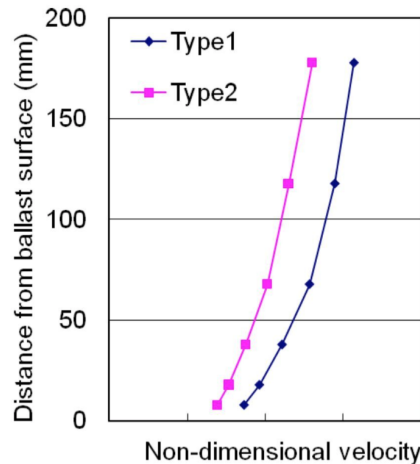


Figura 20: Perfiles de velocidad de flujo para diferentes alturas sobre el lecho de balasto. Fuente: [7]

2.4. Estudios en túnel aerodinámico

Tras la exposición de varios estudios realizados in-situ, se hace un análisis detallado sobre trabajos previos realizados en túnel aerodinámico. La mayoría forman parte de los estudios anteriores, como pasos posteriores a las mediciones y conclusiones sacadas experimentalmente en campo.

De entre las principales ideas que se podían extraer de los estudios previos in-situ destacaba el papel que jugaba la aerodinámica del tren y de las piedras del lecho en la generación de flujo y el levantamiento de balasto. Factores como la distancia de los bajos hasta el lecho o su rugosidad, las formas geométricas de la cabeza y la cola, los bogies, la continuidad entre coches o características de las piedras como su peso, forma o tamaño, han resultado ser clave en el estudio de esta problemática y a continuación se analizan estudios que tratan de caracterizar y cuantificar su implicación en el fenómeno.

Las dos vertientes que se plantean y analizan son:

1. Estudios centrados en geometría, densidad, forma o peso de las piedras que forman el lecho de balasto.
2. Estudios centrados en la mejora aerodinámica del tren.

2.4.1. Aplicación sobre las características del balasto

La primera vertiente de estudio que se plantea es la centrada en el estudio aerodinámico del medio (el lecho de balasto). Para ello, se continúa el análisis del trabajo de Kwon y Park, *An experimental study on the relationship between ballast flying phenomenon and strong wind under high speed train* [4], que planteaban el fenómeno de manera estadística desde el punto de vista de la masa y la forma de las piedras de balasto. El comportamiento de las piedras de balasto frente al viento fue analizado aumentando gradualmente la velocidad del fluido en un túnel aerodinámico. Además, se sacaron conclusiones sobre las características individuales del balasto.

Para el estudio, se tomó una muestra de 1000 piedras que habían sufrido levantamiento en los estudios in-situ. Según su aerodinámica y su forma se clasificaron en los grupos A, B y C. (Figura 21)

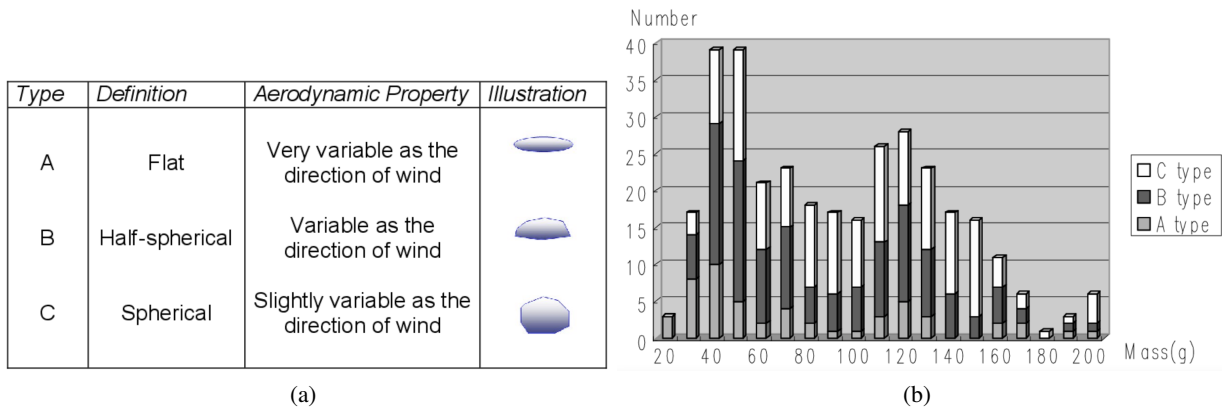


Figura 21: (a) Tipología de piedras de balasto. (b) Frecuencia de cada tipo de piedra de balasto. Fuente: [4]

Puede comprobarse en la Figura 21 (b) que las categorías B y C representan el 40% y el 44% del total de la muestra, respectivamente, y que la masa de las piedras de balasto se distribuye entre 17 y 200 g, siendo la media de la masa de las piedras de la categoría A, la menor.

Para la caracterización aerodinámica de las piedras se utilizó el túnel de viento de la Universidad Nacional de Seúl. Buscando prevenir riesgos por posibles levantamientos de balasto, en el túnel se instaló una pantalla protectora de 40 cm y la velocidad del flujo se restringió a 35 m/s.

En la Figura 22 se muestra la posición de las piedras de balasto antes y después del ensayo. Por otro lado, los resultados de velocidad crítica a la que se levanta la piedra en función de su tipología están representados en la gráfica de la Figura 23.



Figura 22: (a) Antes de ensayo. (b) Después de ensayo. Fuente: [4]

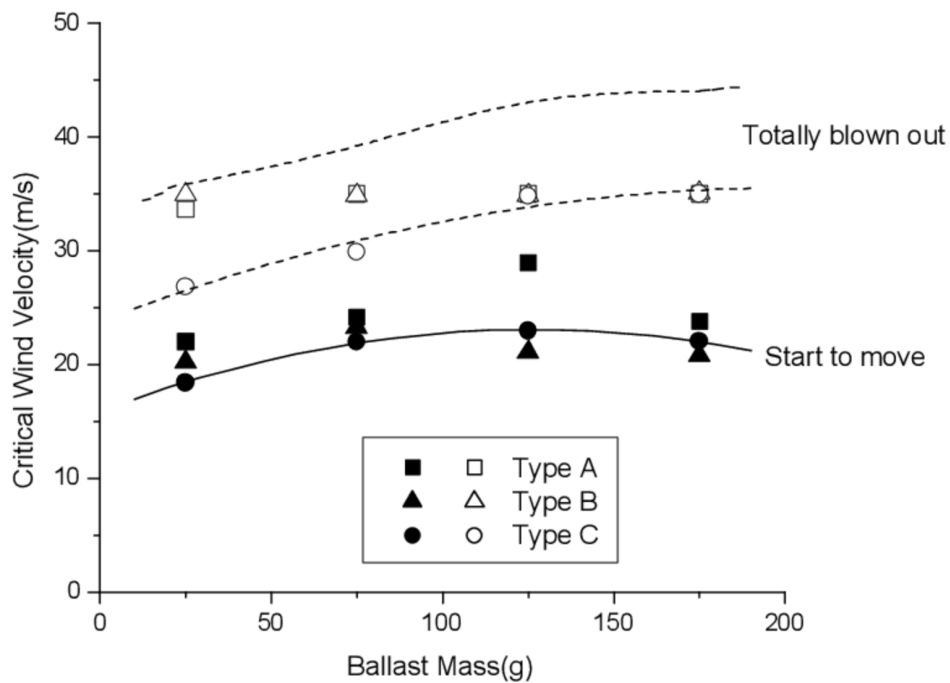


Figura 23: Velocidad crítica de viento que inicia levantamiento según tipología de piedra de balasto. Fuente: [4]

Puede comprobarse que, en todos los casos, las piedras comienzan el movimiento con velocidades del viento cercanas a 20 m/s. No se obtuvieron trayectorias completas de las piedras debido a la restricción de velocidad por seguridad. Un detalle interesante es que, las piedras con formas más cercanas a la esfera y con masas por debajo de los 50g tienen velocidades críticas menores (es decir, son más propensas al vuelo

de balasto). A esta conclusión también llegan Jing et al. en *Ballast Flying DEM Microscopic Analysis and Counteracting Measures* [10]. Se concluye, como por otra parte cabía esperar, que las piedras con masas más importantes tienden menos al levantamiento.

Para simular de la forma más acertada posible el fenómeno a estudiar, se construyó en el interior del túnel un escenario similar a la sección de vía en Seúl-Busan. Para realizar el ensayo, la velocidad del viento fue incrementándose de forma gradual. A partir de los 20 m/s las piedras comenzaron a sufrir movimientos (como adelantaba el análisis individual anterior) y a los 33 m/s se produce el primer vuelo de balasto (marcado con un círculo blanco en la Figura 24 para diferentes instantes de tiempo).

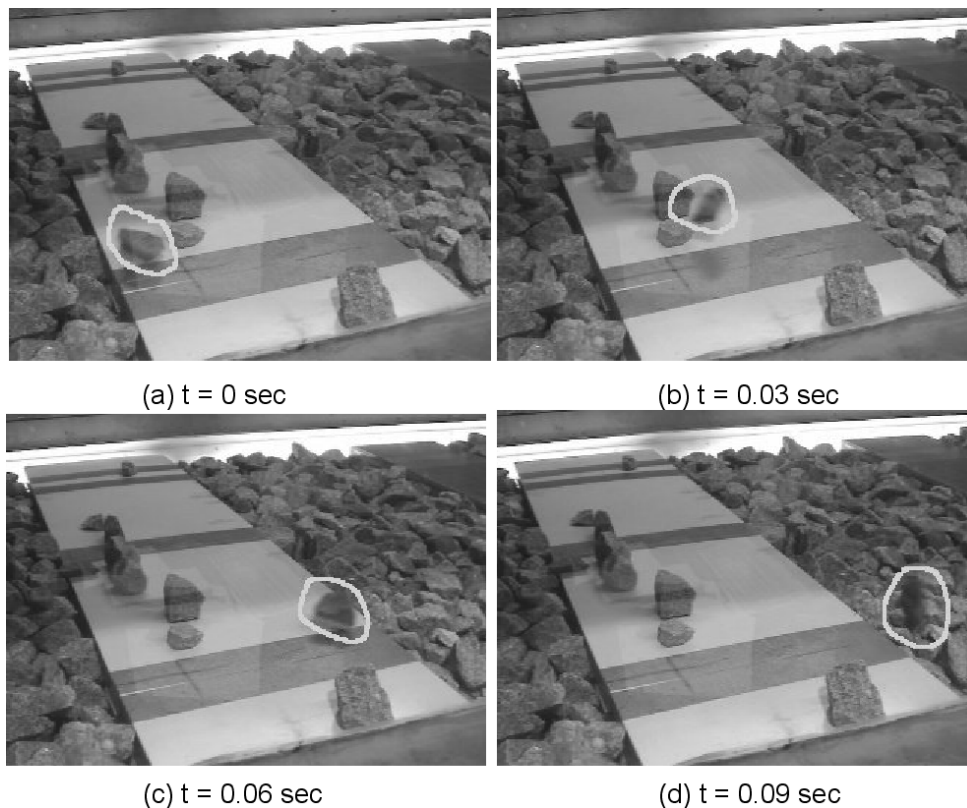


Figura 24: Estudio de vuelo de balasto con velocidad del viento de 33 m/s para diferentes instantes de tiempo. Fuente: [7]

Del estudio se puede concluir que la tipología, peso, forma y coeficiente de fricción de las piedras que forman el lecho de balasto son una interesante línea de estudio para solventar el problema del levantamiento.

Otro trabajo interesante cuya línea se centrare en las piedras de balasto en túnel de viento fue *Ballast Projection* [11], enmarcado en el proyecto de DEUFRAKO/AOA ya mencionado. Para su realización se generó un entorno imitando la superficie del lecho y se aplicaron diferentes velocidades de flujo, pesos

y tamaños de piedra e incluso vibraciones para acercarlo lo más posible a las consecuencias del paso de un tren de alta velocidad. Se llevó a cabo una relación empírica y estadística para los valores de desplazamiento de las partículas de balasto en función del número de Froude, la forma y las propiedades aerodinámicas de las partículas.

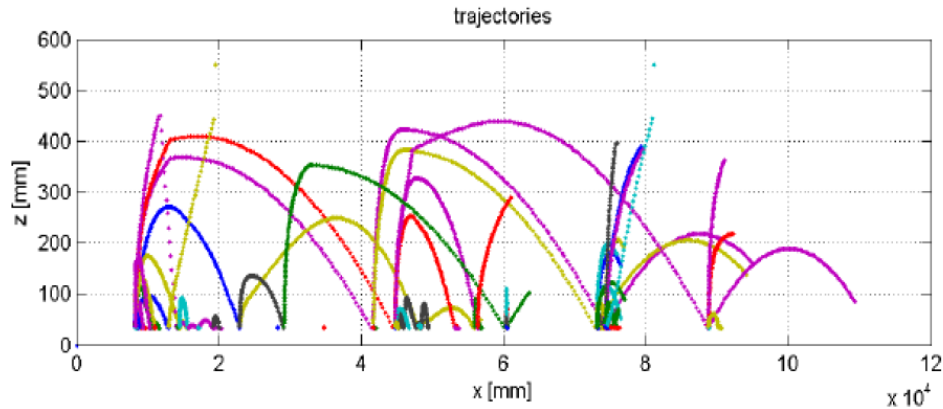


Figura 25: Trayectorias definidas para los desplazamientos de las partículas determinados en el túnel de viento. Fuente: [11]

El estudio apunta a que, a partir de un cierto umbral A relacionado con las fuerzas gravitatorias o la velocidad del flujo, una partícula experimenta un desprendimiento del conjunto si está sometida a fuerzas de flujo tangencial. Los valores de A generan una posibilidad de categorizar:

- $A=0.01$, comienza el desprendimiento de partículas.
- $A=0.02$, desprendimiento continuo de las partículas.

Con el fin de contrastar estos valores con los que se observan en una configuración de balasto y traviesas, se examina en el túnel de viento mencionado previamente el rebaje del balasto en relación con la superficie superior horizontal de las traviesas. En el túnel se logra obtener un perfil de flujo de Couette completamente desarrollado después de recorrer una longitud de 3 metros. Estos perfiles de velocidad obtenidos son similares a los que se caracterizan in situ, tal como se describe en *Investigation of particle dislodgement from a ballasted trackbed in scale 1:10* [12] (estudio también en el marco de DEUFRAKO/AOA).

Por consiguiente, mediante diversos experimentos con diferentes valores de descenso del balasto, de hasta 4 centímetros en relación con la traviesa, y empleando distintas tipologías de traviesas (monobloque, bibloque, etc.), así como velocidades aproximadas en el túnel de viento a $0.316 V_{flujo-real}$, se ha determinado que el descenso de 4 centímetros reduce la liberación de partículas del lecho. Además, también se concluye en [12] que el parámetro aerodinámico más crítico para el vuelo de balasto es la velocidad media en dirección longitudinal del flujo.

Para terminar, dentro del propio proyecto DEUFRAKO/AOA se analiza el estudio *Ballast Projection. Full-scale tests on track model* [13] en el que se han visualizado trayectorias de piedras de balasto en túnel de viento (ubicadas sobre traviesa) en función de velocidad máxima y vibraciones. Se colocaron piedras sobre traviesas y se les hizo pasar por las sollicitaciones comunes tras el paso de un alta velocidad: vibraciones entre los 3-5 Hz con amplitudes desde 3 hasta 6 mm. De las más de 100 pasadas de tren simuladas, se pudo extraer:

1. 25 % de partículas sin movimiento
2. 50 % de partículas con desplazamientos cortos, desde su caja de vía a la prácticamente inmediata.
3. 15 % de partículas desplazadas y despegadas del lecho

Se pudo comprobar el papel fundamental de la velocidad del tren ya que, pasando de 210 km/h a 240 km/h, las partículas sin movimiento pasaron a contar únicamente con un 5 %. También se hizo patente que con el aumento de la vibración y la amplitud de esta aumentaba también el porcentaje de partículas levantadas.

2.4.2. Aplicación sobre la aerodinámica del tren

El trabajo de Ido et al. (comentado en el apartado 2.3.6.), tras corroborar con experimentos in situ la importancia de los bajos de la máquina, continuó la investigación en túnel de viento. Para ello, utilizaron una sección de ensayo tipo de 5x3x20 m y velocidad de viento de 50 m/s en el Railway Technical Research Institute de Tokio, simulando el efecto de la vía a través de un sistema de correa móvil y otro de aspiración. La correa móvil se movía a la misma velocidad que el viento.

En la Figura 27 están reflejados tanto los puntos de medida (m_i con $i=1,5$) como la colocación de los modelos a escala 1/7 de cabeza, intermedio y cola.

En el ensayo se utilizaron tres tipologías de tren con diferentes bajos: Tipos A, B y C. El Tipo A era similar al Tipo 2 ya explicado en los casos in situ, en el Tipo B se añadieron cubiertas para los bogies y el Tipo C correspondería con una tipología sin bogies.

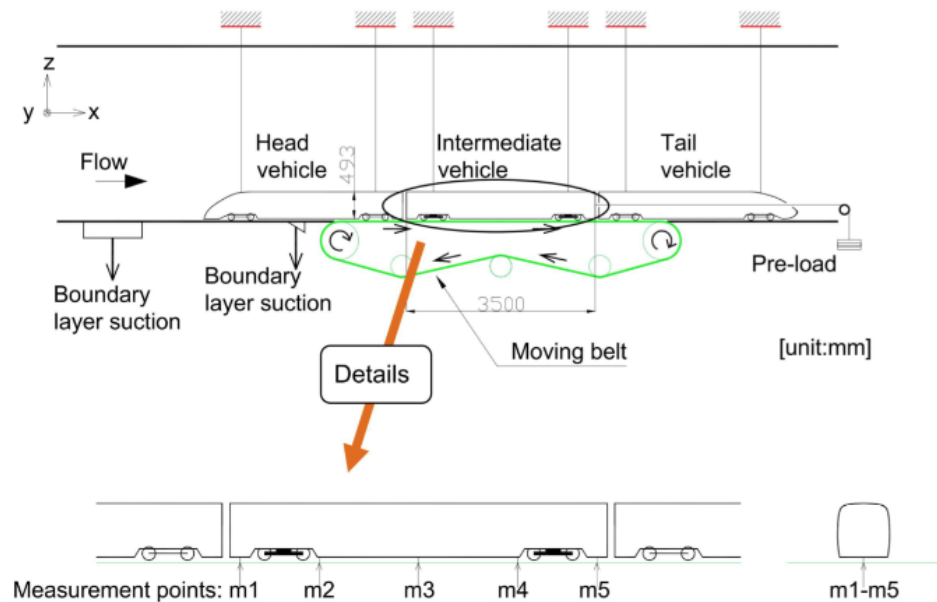


Figura 26: Vuelo de balasto con viento a 33 m/s. Fuente: [7]

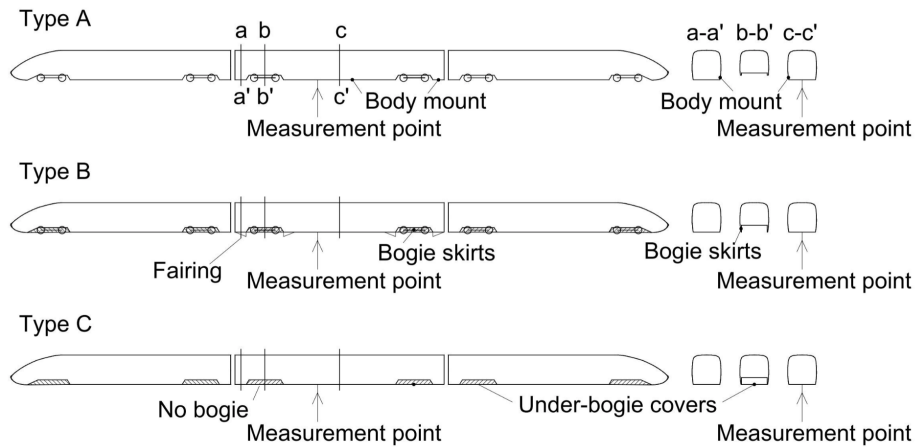


Figura 27: Tipos de modelos de tren a estudio. Fuente: [7]

El primer detalle significativo tras las pruebas en túnel de viento estaba relacionado con el Número de Reynolds del problema. Mientras que en los casos in situ el Re rondaba 2×10^7 , en este caso, $Re = 2 \times 10^6$. Los resultados de velocidad, por su parte, se muestran adimensionalizados con una velocidad de flujo generado en túnel de viento de referencia (Figura 28).

Estos resultados corroboran las conclusiones de los estudios in situ. Abogar por formas más aerodinámicas lleva a menor perturbación de flujo y, por tanto, menor probabilidad de que se produzca el fenómeno del levantamiento. La forma de la cabeza y cola del tren está relacionada con el coeficiente de

arrastre, es decir, la resistencia que éstos oponen al viento.

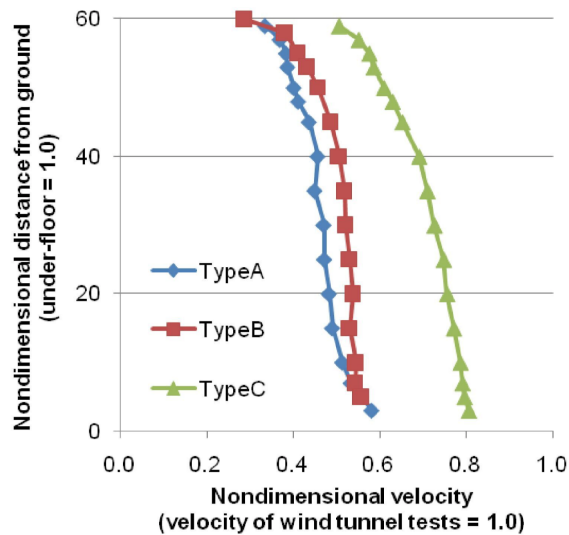


Figura 28: Perfiles de velocidad según tipo de tren. Fuente: [7]

Ya anteriormente, en otro estudio llamado *Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques* [14] realizado por Kwon et al. se adelantaba que la modificación de la geometría del morro delantero suponía disminuciones cercanas al 14'4 %.

2.5. Estudios de elementos discretos

El análisis de resultados de estudios como los llevados a cabo por DEUFRAKO o las pruebas en Corea y Japón ya hicieron patente la relación directa del vuelo de balasto con la generación de flujo por el paso de trenes a altas velocidades (fenómeno que se pudo, por tanto, calificar de esporádico).

El siguiente paso a dar desde el proyecto internacional AOA-DEUFRAKO, como pionero en el estudio de la problemática, fue el de realizar una serie de estudios basados en modelos de elementos discretos, los cuales están recogidos en la anteriormente mencionada *WP1.2 - Ballast Projection*. [11]

La idea principal fue la de modelar el balasto a través de un sistema de elementos discretos para poder categorizar las acciones que se daban entre las partículas que formaban el lecho y qué consecuencias producía el choque de una de ellas contra el mismo. Se trató de cuantificar el número de partículas empujadas al movimiento y sus respectivas trayectorias, utilizando como parámetros el ángulo de impacto de las partículas proyectadas, su velocidad inicial y la masa de la partícula que iniciaba el efecto en cadena. Además de los resultados con DEM, buscando corroborar a través de experimentos reales, se realizaron también estudios de proyección utilizando una pistola de aire comprimido.

Uno de los objetivos del tratamiento con DEM era la determinación de alguna ley o expresión matemática que pudiese utilizarse para modelizar o predecir tanto la trayectoria de las piedras que iniciaban el fenómeno como el posterior movimiento tras el choque con el lecho. Todo lo referente a esta búsqueda quedó reflejado en *WP1.2.5 – Numerical investigations on ballast collision process*. [15]

El modelo propuesto consistía en un volumen de 0.7mx0.7mx0.4m con partículas con tamaños entre 25 y 50 mm. La densidad coincidía con la del balasto natural (es decir, 2600 kg/m³) y el coeficiente de fricción entre partículas era de 0.7 m.

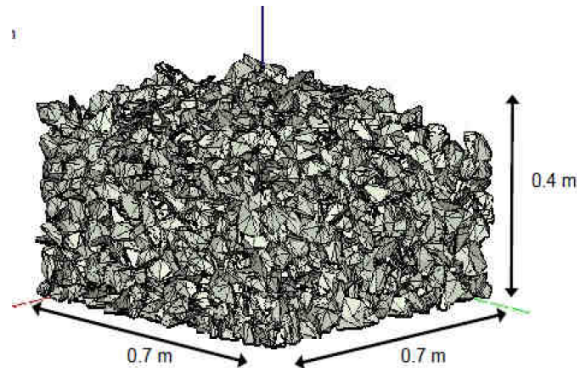


Figura 29: Modelo DEM. Fuente: [15]

En [15] se plantean 11 partículas con masas entre 40 y 200g, velocidades de inicio del movimiento entre 100 y 350 km/h y ángulos de choque contra el lecho que van desde los 10 hasta los 80°. Los hallazgos de ese estudio han revelado una conexión casi lineal entre la cantidad de partículas de balasto desplazadas después del impacto y la energía cinética inicial de la partícula lanzada.

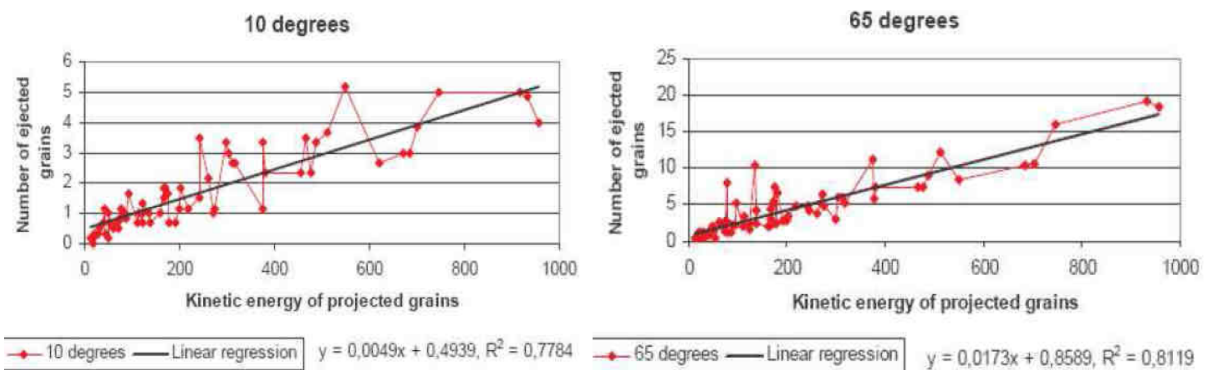


Figura 30: Registros y regresiones para el número de partículas movilizadas con la energía cinética de cada impacto y ángulo variable. Fuente: [15]

Todo esto llevó a la presentación de una expresión empírica para la relación entre el número de partículas en movimiento, la energía cinética de la partícula y el ángulo:

$$N_{ej}(\alpha_i, E_{ci}) = F(\alpha_i) \cdot E_{ci} + N_{cst}(\alpha_i) \quad (4)$$

donde F es una función lineal del ángulo de impacto y N es una función polinómica de dicho ángulo.

Utilizando las velocidades determinadas para las partículas lanzadas en ambas direcciones (horizontal y vertical), dado que se trata de un análisis en dos dimensiones, es posible determinar el coeficiente de restitución del impacto contra el balasto, tanto antes como después del choque. Estos valores se han comparado con los obtenidos en un ensayo previo utilizando una pistola de impacto, y se ha encontrado una correlación adecuada entre la simulación con elementos discretos y los resultados reales del ensayo, en lo que respecta al coeficiente de restitución tanto en la dirección normal como en la tangencial.

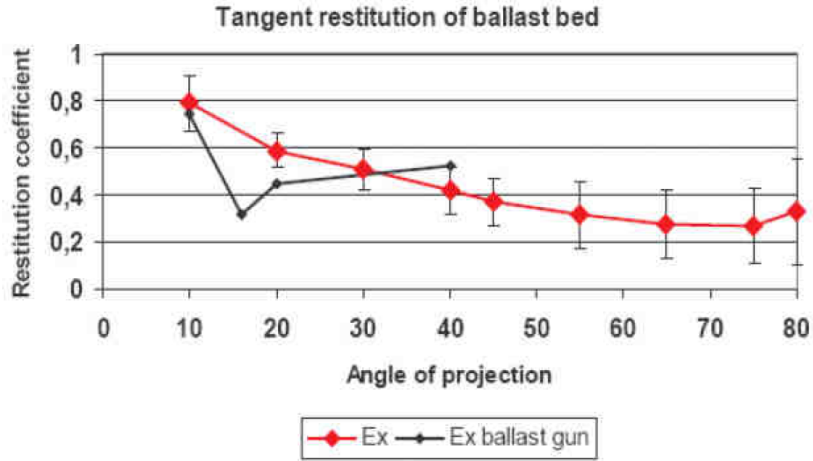


Figura 31: Relación de coeficientes de restitución tangencial entre experimento y simulación DEM. Fuente: [15]

Otra conclusión interesante del estudio es que el ángulo o la velocidad del impacto no parecen tener mucha influencia sobre las velocidades de las partículas movilizadas, pero sí parece fundamental la dirección de impacto.

Por último, del estudio [15] se obtiene una expresión para la Función Probabilidad de Densidad (PDF) de las distribuciones de velocidad de las partículas tras el impacto:

$$PDF(V_x) = \frac{1}{5 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-(V_x - \mu)^2} \quad (5)$$

$$PDF(V_y) = \frac{1}{7 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-(V_y - \mu)^2} \quad (6)$$

$$PDF(V_z) = V_z \cdot e^{-(V_z - \mu)^2} \quad (7)$$

Otro importante estudio a abordar en la utilización de DEM (Discrete Element Model) para caracterizar la problemática del levantamiento de balasto, es el llevado a cabo por Saussine et al. *Ballast Flying Risk Assessment Method for High Speed Line* [16]. El marco de estudio propuesto se basa en la búsqueda de un parámetro que relacione las propiedades aerodinámicas del tren y el movimiento del balasto, teniendo en cuenta que la presencia de piedras de balasto sobre las traviesas unido a las propiedades del flujo, influye significativamente en el riesgo de vuelo de balasto.

Por ello, busca proponer un método que tenga en consideración la variabilidad introducida por la posición espacial de las piedras, las características aerodinámicas del tren y las propiedades del flujo, y se elige el conocido como *Stress Strength Interference Analysis* que permite determinar un nivel de riesgo según esos parámetros.

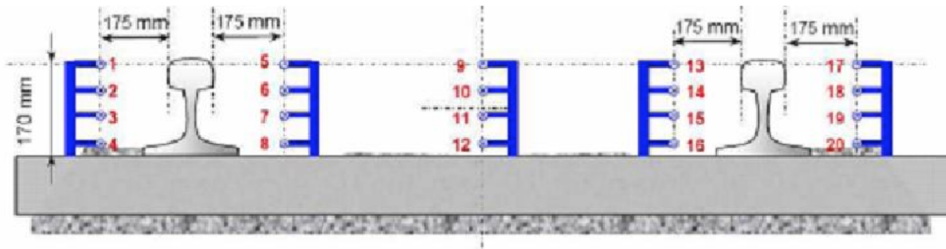


Figura 32: Mediciones experimentales con tubos de Pitot. Fuente: [16]

El enfoque planteado para abordar el problema, teniendo en cuenta la complejidad de las fuerzas implicadas, fue el de modelar gravedad y cargas aerodinámicas como dos cargas externas aplicadas sobre las piedras. Además, en [17], Saussine presenta también el modelo de vía que va a utilizar a lo largo del estudio, modelizado con DEM (Figura 33). Se planteó una malla dinámica que contenía la velocidad del campo extraída de las mediciones experimentales, para así, poder presentar al flujo como un campo de vectores de velocidad cuya representación fuera una matriz de tres dimensiones definida por una resolución espacial correspondiente al diámetro medio de los granos de balasto.

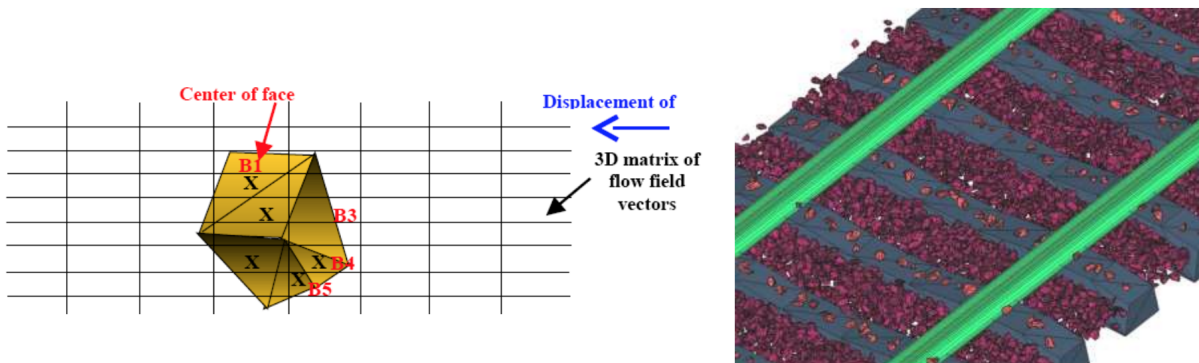


Figura 33: Modelo de vía DEM. Fuente: [17]

Si se considera la malla como una malla móvil que contiene la velocidad del campo aerodinámico, para cada cara de los granos considerados (poliedros irregulares cuya geometría puede entenderse con mayor claridad en Figura 33, el esfuerzo se calcula considerando los correspondientes vectores de velocidad, el área de la cara y su orientación. La carga aerodinámica se considera como una carga externa para la resolución del problema mecánico: para cada paso de tiempo, la malla se mueve, y la contribución de la carga externa se calcula para cada grano. Llevando a cabo estos experimentos con modelos DEM pudo comprobarse que los movimientos de las piedras de balasto bajo influjo de distintas solicitaciones aerodinámica se circunscribían a lo esperado según los estudios in situ [17].

Con los resultados obtenidos, se propuso definir un parámetro a través de la suma de la potencia de la señal para todo el conjunto de tubos Pitot instalados en el tramo de estudio. Este parámetro sirve para evaluar el levantamiento del lecho de balasto según las características del campo fluido y según cada medición de su correlación con el porcentaje de piedras que hayan sufrido un desplazamiento mayor a 10 cm:

$$P_{Tot} = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \sum_{i=1}^N \int_1^2 \|V(t)\|^2 dt \quad (8)$$

De las simulaciones de acoplamiento entre enfoque granular e interacción con campo fluido, se extrae la existencia de una relación lineal/polinómica entre el porcentaje de granos desplazados y el de granos expulsados, con una correlación del 82 %:

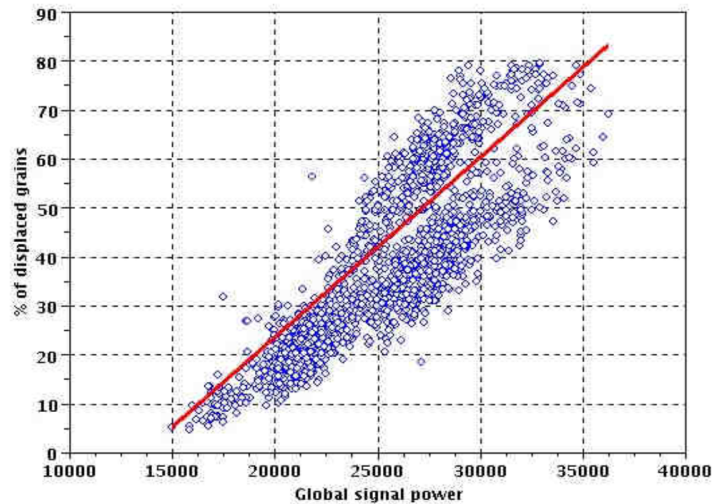


Figura 34: Correlación entre el porcentaje de piedras de balasto que se han desplazado y P_{Tot} . Fuente: [16]

En otro orden de cosas, entender la importancia de la posición inicial de los granos para la ocurrencia o no del fenómeno, llevó a determinar que la posición más desfavorable era sobre las traviesas. Para

tenerlo en cuenta en el estudio, se introdujo una PDF de balasto sobre traviesas de carácter exponencial (Figura 35):

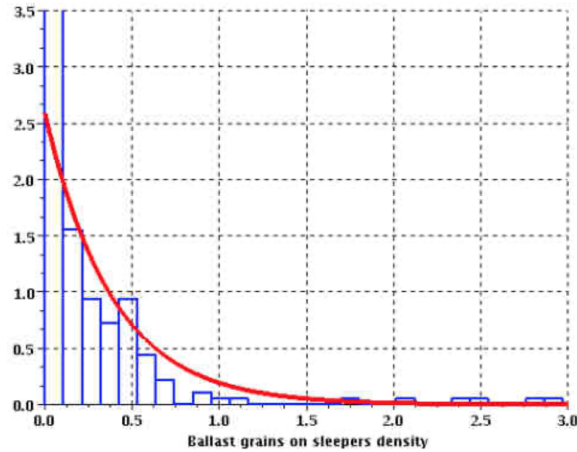


Figura 35: Función Densidad de Probabilidad de balasto sobre traviesa. Fuente: [16]

Podemos determinar la relación entre la cantidad de partículas que se mueven y el porcentaje de esas partículas que se desplazan más de 10 cm en una dirección longitudinal. Esto se logra estableciendo un límite para la cantidad de partículas desplazadas y calculando el porcentaje correspondiente utilizando la relación indicada en la figura que se muestra a continuación.

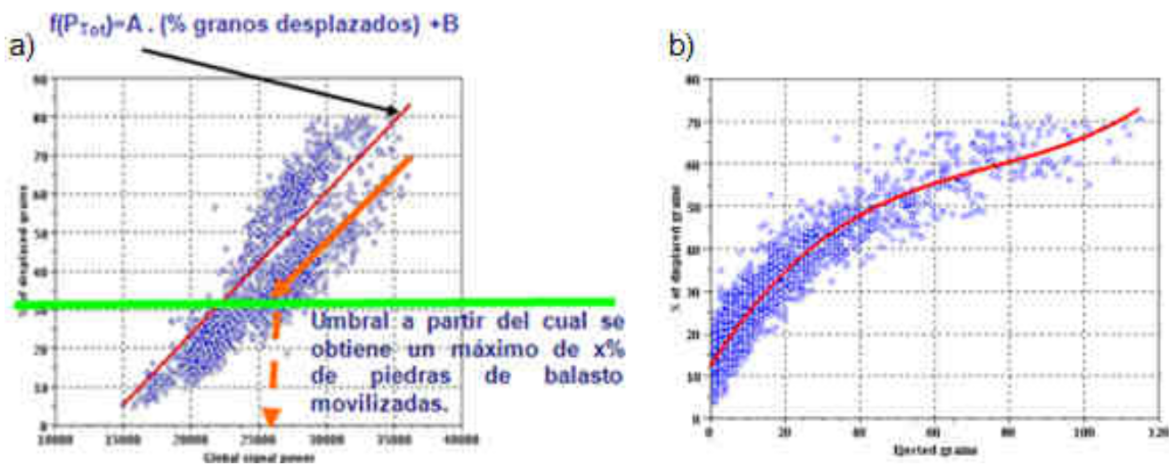


Figura 36: a) Explicación de procedimiento a seguir. b) Relación entre número de partículas expulsadas y porcentajes de partículas desplazados. Fuente: [16]

Con la pareja que forman la Figura 37 y el Cuadro 3 se pueden ver los resultados de dos experimentos (paso del mismo tren a 300 y 320 km/h).

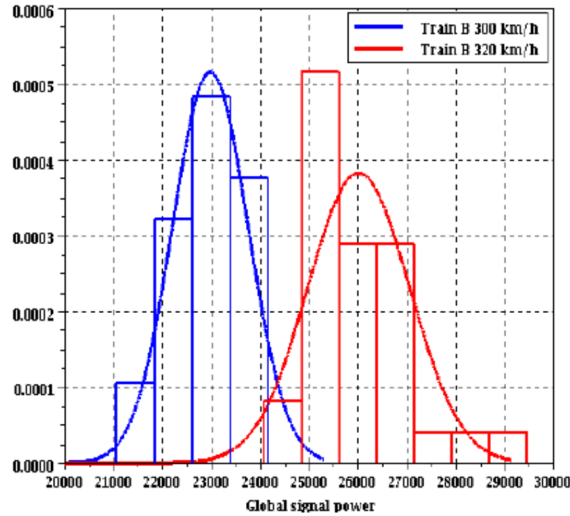


Figura 37: % de partículas movidas frente a P_{Tot} . Distribución Gaussiana. Fuente: [16]

Stress	300 km/h 22967 / 772	320 km/h 26000 / 1041	Strength	Ejected Grains
Risk	5.46E-05 1.38E-08	1.44E-02 8.02E-05	30544 / 1800 33848 / 1800	5 15

Cuadro 3: Resultados STRESS/STRENGTH para dos velocidades distintas Fuente: [16]

El Cuadro 3 muestra datos relativos al STRESS y STRENGTH (del método Stress Strength Interference Analysis, comentado con anterioridad), siendo éstos la señal correspondiente al número de partículas expulsadas y las fuerzas sobre la vía obtenidas al considerar que cada pareja de datos (formada por P_{Tot} y el % de partículas movidas) siguen una ley gaussiana, respectivamente. Se aprecia que, evidentemente, mayores rangos de velocidad llevan al levantamiento de un mayor número de granos, pero como ya se ha comentado en otra ocasión a lo largo del Trabajo de Fin de Máster, disminuir la velocidad de la maquinaria no se contempla como posible solución de la problemática.

Una de las conclusiones a extraer de este estudio es que la velocidad de circulación de los trenes, aunque tiene una relación directa significativa con el levantamiento de balasto en condiciones normales de operación ferroviaria, no va a ser importante en la búsqueda de soluciones. Sin embargo, se observa que en situaciones donde hay nieve, y por tanto el levantamiento de balasto y hielo aumenta, sí resultará práctica y de utilidad la relación encontrada entre la velocidad del tren y el fenómeno del levantamiento. A este respecto, se van a analizar las conclusiones sacadas por Saussine et al. en *High speed in extreme*

conditions: ballast projection phenomenon [18].

El enfoque del estudio pasaba por determinar la velocidad de circulación de los trenes que minimizase el impacto en el mantenimiento del material rodante durante los eventos de nieve. En este caso también se utilizaron simulaciones DEM, que tenían en cuenta el acoplamiento de flujo creado por paso de trenes, condiciones meteorológicas y el método de seguridad buscando, como ya se ha comentado, determinar una regulación de velocidad.

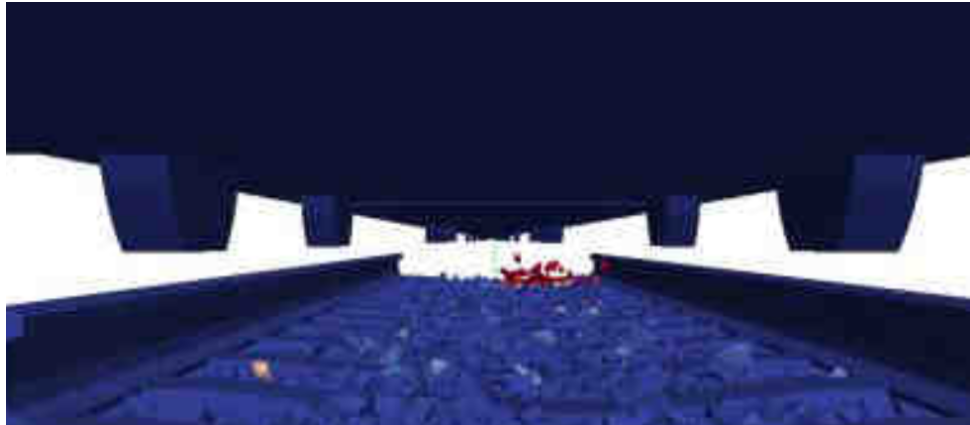


Figura 38: Simulación de proyección de balasto bajo condiciones de nieve. Fuente: [18]

El análisis de resultados del estudio, ya que se observa que el número de partículas proyectadas presenta una relación lineal con la energía cinética del impacto producido por la caída de bloques de hielo, lleva a proponer la siguiente expresión: Número de granos eyectados = $\alpha \cdot E_k \cdot \beta$. El estudio expone que esta ley puede ser utilizada para simular el cálculo de la interacción de la capa con el flujo de viento generado al paso de la maquinaria en condiciones meteorológicas extremas. Como en casos anteriormente estudiados, se determina el indicador de riesgo, se compara con el umbral y se determina la velocidad óptima de funcionamiento compatible con los menores daños posibles generados en el material rodante. Este sistema, podía ser utilizado para determinar, por ejemplo, el tiempo de retraso de llegada a una estación debido a las inclemencias del tiempo.

Lo comentado de [18] resulta especialmente útil buscando aplicaciones prácticas, pero al respecto de la modelización como tal del comportamiento del balasto (búsqueda de una metodología), es primordial *Ballast Flying Mechanism and Sensitivity Factors Analysis* de Jing et al. [19], donde se caracteriza el mecanismo de levantamiento de balasto a partir del análisis de equilibrio de fuerzas en cada una de las partículas.

En [19] se plantea el problema partiendo de las etapas del fenómeno ya demostradas con anterioridad. Primero, la piedra de balasto empieza a moverse como consecuencia de la vibración, para terminar siendo arrastrada sobre el lecho de balasto por el flujo que genera el tren. Así, cuando la piedra tiene suficiente

impulso longitudinal, o en ella se produce un desequilibrio de fuerzas, las fuerzas transmitidas por al contacto entre piedras de balasto pueden proporcionar el suficiente impulso vertical a la piedra analizada para iniciar su levantamiento. En la Figura 39 pueden verse las fuerzas implicadas en el vuelo de balasto.

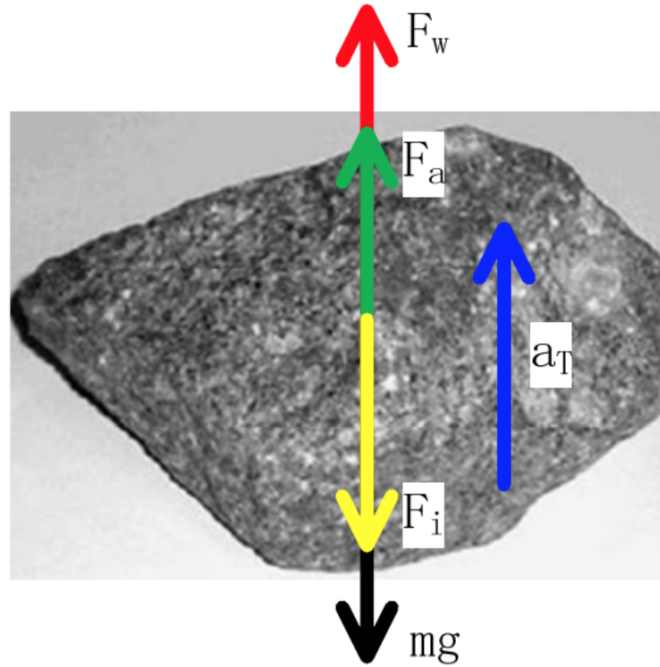


Figura 39: Fuerzas presentes en el levantamiento de balasto. Fuente: [19]

Según la ecuación de d'Alembert, para el equilibrio en la piedra:

$$F_w + F_a = mg + ma_T + F_i \quad (9)$$

donde F_w representa la fuerza del viento, F_a representa la aceleración de la piedra debida a la vibración de la capa, mg es el peso, F_i representa la fuerza de bloqueo de la partícula y a_T la aceleración vertical del balasto debida a las vibraciones inducidas por las respuestas dinámicas de los carriles y las traviesas. Para estar del lado de la seguridad ($F_i=0$), se simplifica a:

$$ma_T = F_w - m(g - a) \quad (10)$$

Siendo A el área efectiva de la piedra sobre la que actúa la fuerza aerodinámica inducida por el tren y V_i las velocidades inicial y final del viento en el vuelo, la fuerza de viento efectiva que actúa sobre el lecho se puede calcular como:

$$F_w = \int_0^A \int_{V_1}^{V_2} f(A)f(v)dAdv \quad (11)$$

Sin embargo, la complejidad de este cálculo lleva a la siguiente simplificación (utilizando un coeficiente de corrección de presión α):

$$F_w = \alpha \int_0^A f(A) dA \quad (12)$$

Llevando la expresión 12 a la expresión 10, se llega a:

$$ma_T = F_w - mg + ma = \alpha \int_0^A f(A) dA - m(g - a) \rightarrow a_T = \frac{\alpha \int_0^A f(A) dA}{m} - (g - a) \quad (13)$$

De la expresión obtenida se pueden identificar con claridad los parámetros más influyentes en el vuelo: el término $(g - a)$, por su parte, depende de las características del tren y de la vía; mientras que de $\alpha \int_0^A f(A) dA$ puede extraerse la influencia en el balance de fuerzas de la forma, el tamaño y la densidad del balasto.

2.6. Estudios con CFD

Para finalizar, antes de aunar todas las conclusiones extraídas de los respectivos análisis, se va a mostrar un último enfoque de estudio: los que buscaban caracterizar el flujo entre tren y capa de balasto a través de herramientas CFD (Computational Fluid Dynamics). Al igual que en el resto de casos comentados a lo largo de este escrito, dichas herramientas fueron utilizadas para modelizar y analizar resultados respecto al fluido generado entre tren y lecho por el paso de la máquina a altas velocidades. De nuevo se plantean dos vías de estudio: CFD aplicado a vehículos y CFD aplicado al lecho de balasto.

2.6.1. CFD aplicado en vehículos ferroviarios

Las técnicas CFD permiten caracterizar de forma mucho más concisa el flujo que genera el paso de un tren, en comparación con análisis in situ o trabajos en túnel de viento. Sin olvidar que para su aplicación se deben aplicar simplificaciones tanto en geometría como en condiciones de contorno, estas técnicas son verdaderamente útiles para entrar en detalle de algunas regiones y punto específicos del tren.

El primero de los estudios que se comenta es el mencionado en un inicio, *Assessment of the aerodynamic loads on the trackbed causing ballast projection* [2], que tras realizar las mediciones in situ, plantea la simulación de un alta velocidad alemán (ICE3) a 280 km/h, comprobando las secciones de dos coches en puntos intermedios del tren, así como la sección del último coche. Como cabe esperar, para facilitar el estudio se tuvieron en cuenta algunas simplificaciones en la geometría del ICE3.

En la Figura 40 se muestran resultados en la sección transversal. Se aprecia que la velocidad de flujo es fuertemente variable según zona y que la turbulencia aumenta en la zona de los bogies.

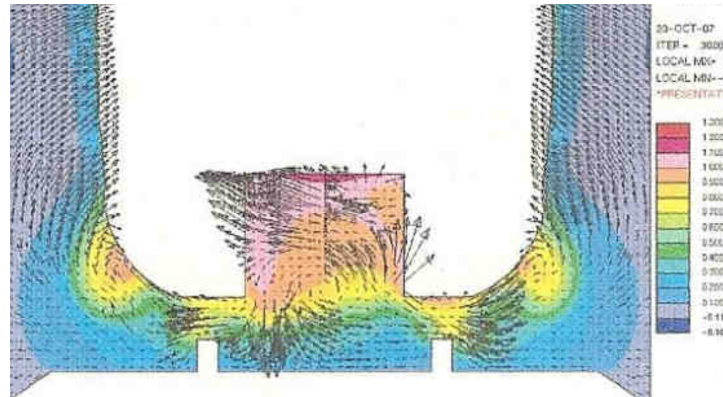


Figura 40: Resultados de simulación CFD en ICE3. Fuente: [2]

En la Figura siguiente, también pertenecientes a las simulaciones de [2], se representan las velocidades axiales de viento enfrentadas a los niveles de turbulencia registrados a 100 mm del centro de la vía. Las líneas verticales, por su parte, marcan el final de las paredes de los bogies y puede observarse de nuevo que las velocidades y rangos mayores de turbulencia se encuentran justo detrás de estos. CU representa la velocidad axial, TI la intensidad de la turbulencia y c_f el coeficiente de fricción.

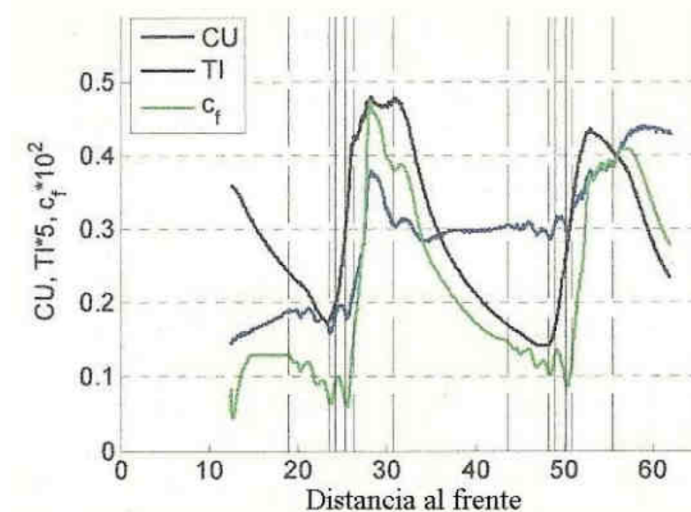


Figura 41: Velocidad axial, intensidad de turbulencia y coeficiente de fricción con la distancia al frente. Fuente: [2]

Otro estudio a tener en cuenta es *CFD Analysis of the under carbody flow of an ETR500 High Speed Train* de Cheli et al. [20]. En él se obtuvieron los patrones de flujo bajo el tren, utilizando una geometría

para los bogies y un dominio de cálculo para la simulación como el mostrado en las Figuras 42 y 43, respectivamente. Las limitaciones que los recursos computacionales introducen en las técnicas CFD, llevó a la necesidad de dividir el dominio computacional a lo largo de la dirección axial del tren en esos tres módulos, con el fin de realizar simulaciones secuenciales, utilizando el flujo de salida de la simulación anterior como entrada para la siguiente.

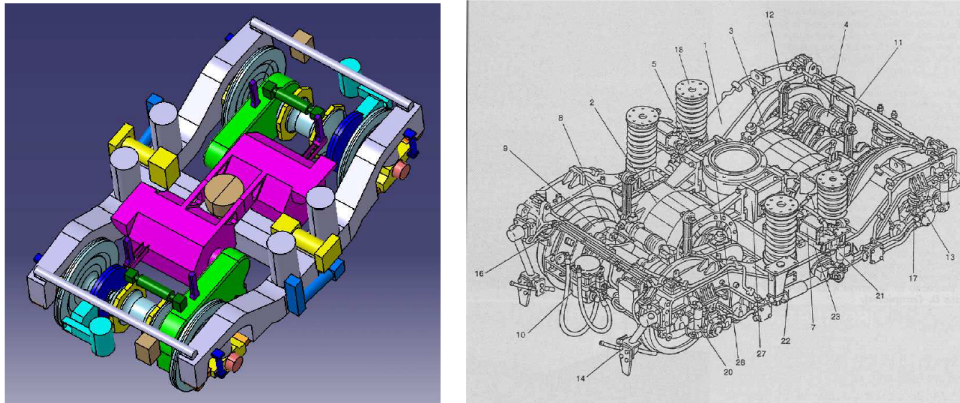


Figura 42: Simplificación de geometría de bogies. Fuente: [20]

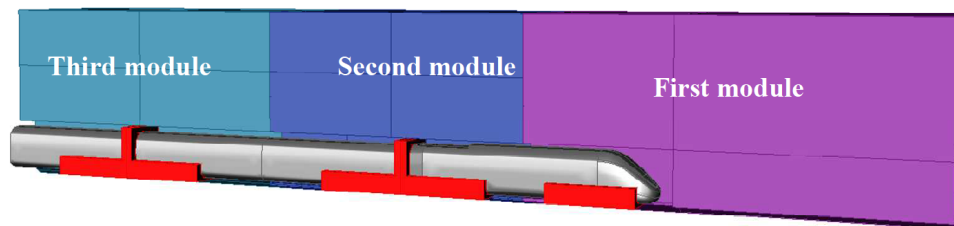


Figura 43: Módulos que componen el dominio simplificado de cálculo. Fuente: [20]

En la Figura 44 se puede ver el desarrollo de flujo bajo el tren, que recoge los contornos de velocidad adimensional CU, en el eje x. El análisis de la presión y de los gradientes de velocidad en el campo de flujo permite estimar el efecto sobre el lecho de balasto.

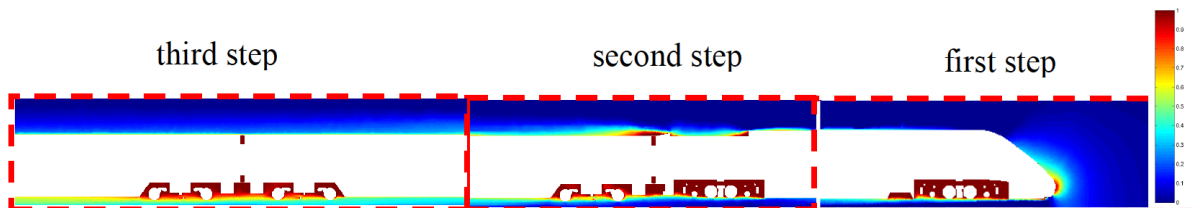


Figura 44: Contornos de velocidad x no dimensional. Fuente: [20]

Por su parte, Jönsson en *Numerical Investigation of the Flow Underneath a Train and the Effect of Design Changes. Mechanical Engineering. Department of Applied Physics and Mechanical Engineering* [21] plantea una comparativa de resultados entre los mostrados del ICE3 [2] y los de un ICE3 modificado [21], buscando demostrar mejoras en el fenómeno del vuelo de balasto. El enfoque consistía en establecer la condición de simetría y simular el paso de tres trenes con los tres campos fluidos correspondientes.

Esta variante del ICE3 modificada contaba en su simulación con tan solo dos mitades de dos coches (Figura 45, ya que los recursos computacionales imposibilitaban un análisis modelizando la geometría al completo).

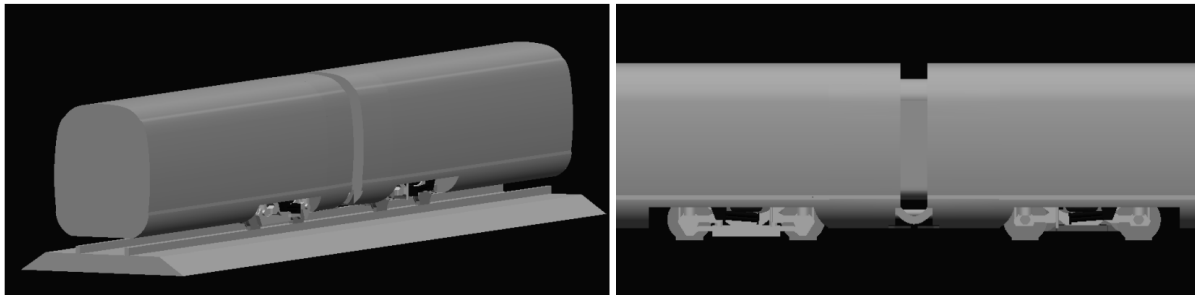


Figura 45: Modelo ICE3. Fuente: [21]

La modificación, consistente en el añadido de placas en la zona de bogies para evitar la fuerte turbulencia del flujo en dicha zona, resulta surtir efecto (como puede apreciarse en los resultados de la Figura 46).

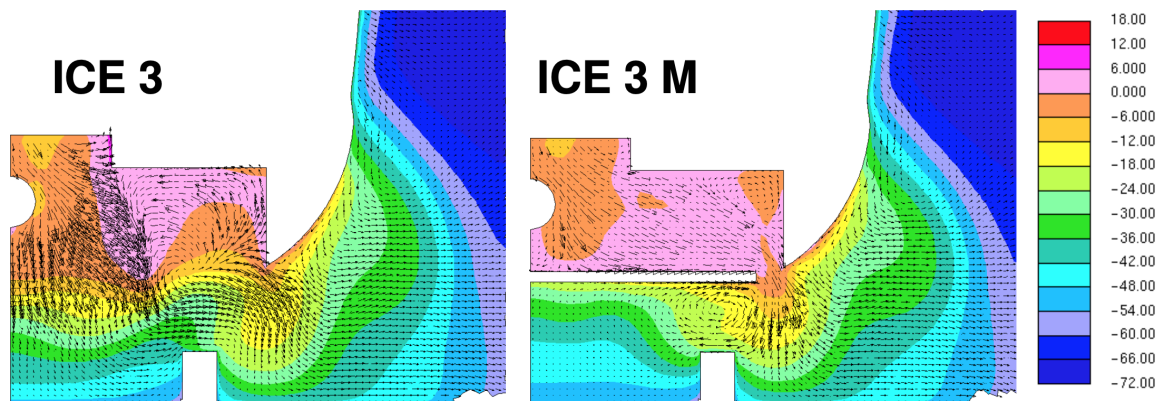


Figura 46: Contornos de velocidad para ICE3 original (izquierda) y el ICE3 modificado (derecha). Fuente: [21]

Las altas turbulencias que se producen en los bogies, también han sido modelizadas por Sima et al. en el estudio *Validation of CFD for the flow under a train with 1:7 scale wind tunnel measurements* [22].

Utilizó diferentes modelos de turbulencia en la modelización del problema, pero los resultados en general llevaron a conclusiones similares: el desprendimiento del flujo que producen los bogies importante, lleva a un aumento de la turbulencia destacable y esto, a su vez, a una mayor probabilidad de vuelo de balasto.

2.6.2. CFD aplicado al lecho de balasto y su entorno aerodinámico

La otra vía de estudio en el ámbito del CFD para tratar el vuelo de balasto es la de analizar la aerodinámica del lecho y su entorno. Continuando con los estudios del proyecto AOA-DEUFRAKO, resulta interesante consultar el trabajo de García et al., *Results for the estimation of an equivalent roughness for the wall made up of the Ballast and sleepers* [23]. La particularidad de este estudio sobre otros comentados con anterioridad es que plantea la utilización de técnicas CFD para caracterizar los perfiles de velocidad generados en las inmediaciones del lecho y trata de determinar la influencia de la disposición de las traviesas en todo esto. Como objetivo último, busca estimar una rugosidad equivalente para la configuración de lecho junto con traviesas.

Tras las medidas in situ comentadas con anterioridad, se plantea un análisis CFD estacionario con modelo bidimensional de suficiente longitud para que el flujo se desarrolle en su totalidad. En los estudios, se ha analizado la zona de balasto y se ha determinado que su rugosidad equivalente es de 0.04 m. Los primeros resultados obtenidos en este trabajo indican que la rugosidad del balasto puede considerarse insignificante en términos de la rugosidad equivalente definida, al igual que la rugosidad debajo del tren. El factor más importante en la definición de la rugosidad equivalente es el modelo de turbulencia utilizado, habiendo utilizado varios modelos, como son $k - \omega$, $k - \epsilon$ y $k - \omega$ (sst).

Además, este estudio demuestra que un modelo computacional bidimensional basado en CFD produce resultados muy similares a los obtenidos en experimentos en campo, en el caso de un flujo de Couette completamente desarrollado. Estos resultados también se han comparado con modelos matemáticos analíticos existentes y han sido satisfactorios (Figura 47).

Por último, comentar la aportación de Mascaraque et al. en el marco del proyecto AURÍGIDAS (*Aerosleeper - A novel sleeper design to reduce aerodynamics loads on track: Reduction in the aerodynamic load averaged over the train passage measured close to the ballast bed*). [24]. En base a las modelizaciones CFD bidimensionales de la sección central, plantea la optimización de la geometría de las traviesas para reducir la velocidad del flujo sobre la superficie del balasto. Este planteamiento de posible modificación (al que se bautiza como *Aerotravesa*) se traduce en una reducción de aproximadamente el 20 % en la carga aerodinámica sobre el balasto, si se compara con las traviesas comunes en la alta velocidad española a día de hoy.

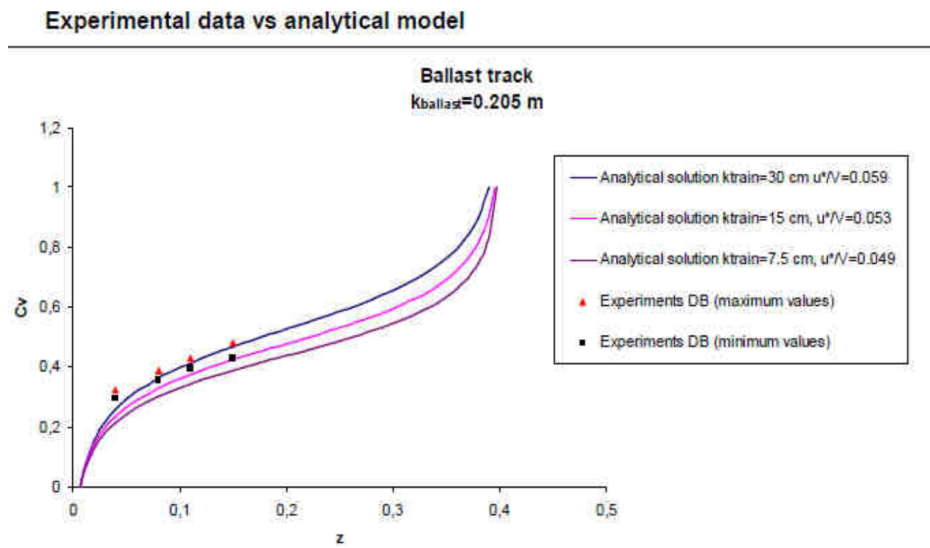


Figura 47: Resultados de los perfiles de velocidad comparando modelos analíticos, computacionales y ensayos de campo. Fuente: [23]

3. Estudio de vibraciones sobre piedras de balasto

3.1. Introducción

Un concepto clave a la hora de presentar alternativas a un material consagrado y testado como el balasto natural es entender su importancia y su comportamiento ante acciones externas. El balasto natural es un medio granular heterogéneo constituido por partículas producto del machaqueo de rocas; y cuya utilización en vías ferroviarias está relacionada tanto con su flexibilidad en construcción y mantenimiento como con su capacidad de amortiguar vibraciones y disipar energía.

El propósito de este estudio es analizar y describir los movimientos de los materiales granulares cuando se ven sometidos a vibraciones, específicamente centrándonos en las partículas de balasto, y también caracterizar las vibraciones que acaban llegando al lecho.

El objetivo principal es comprender cómo se mueven y comportan las partículas de balasto bajo la influencia de vibraciones, así como determinar las magnitudes de las vibraciones experimentadas en diferentes situaciones, como el mantenimiento y el paso de vehículos. Este conocimiento servirá como base para futuros desarrollos de modelos que permitan simular los movimientos de las piedras de balasto a lo largo de su vida útil y plantear posibles alternativas que rivalicen con las soluciones hasta ahora más comunes.

3.2. Balasto como material granular y planteamiento de la problemática

Los materiales granulares están formados por una fase sólida compuesta por los granos y una fase porosa, compuesta por los gases o líquidos que ocupan los espacios existentes entre huecos de partículas. En el caso del balasto, como dichos huecos contienen aire, se circunscribe a la categoría de medio granular seco no cohesivo.

Cuando el tamaño de las partículas aumenta, se producen variaciones en el comportamiento de este tipo de materiales en presencia de tensión. En el área de contacto entre partículas, al ser de tan reducido tamaño, aparecen tensiones muy elevadas que pueden llevar a la rotura de estas y, con ello, a cambios en las propiedades del material granular. Si aumenta el número de contactos, como cabe esperar, se produce una disminución en la magnitud de las fuerzas de contacto. En una placa con una superficie unitaria que se encuentra en contacto con una masa de material granular, el número de contactos con la placa se incrementa al disminuir el diámetro de las partículas. Debe tenerse en cuenta que, si las deformaciones a las que se somete a un medio granular no son elevadas, el comportamiento tiende a ser elástico.

Deformaciones por encima de los 5-10 μm sobre materiales granulares se traducen en comportamientos plásticos del mismo, rozando el límite de rotura en algunos casos y pudiendo llevar a rotura localizada (plano único) o difusa (varios planos). Este comportamiento plástico se debe, sobre todo, al rozamiento entre granos y a la reordenación estructural.

Cuando se trata de categorizar el comportamiento de un medio granular seco no cohesivo como es el caso del balasto, los dos grupos más comunes a tener en cuenta son:

- **Comportamiento cuasi-estático:** Las fuerzas entre partículas son estáticas y estas forman contactos durables entre sí durante las deformaciones.
- **Comportamiento colisional:** Las fuerzas entre partículas son de origen cinético y es la colisión entre ellas la que domina el comportamiento. Los sistemas granulares sometidos a vibraciones (como el balasto) son un ejemplo de este tipo de comportamiento. De hecho, bajo efecto de vibraciones o al superar cierto umbral de plasticidad, un material sólido puede llegar a comportarse como líquido o incluso gas.

El paso entre ambos regímenes es tremendamente complejo y difícilmente caracterizable. En régimen estático o cuasi-estático son despreciables los efectos inerciales frente al equilibrio estático y se da cuando la presión estática es mayor que la cinética generada por colisiones entre granos.

En cuanto al contacto entre partículas, en un medio granular seco, se consideran dos tipos de interacciones: el rozamiento y las colisiones inelásticas.

El rozamiento seco se rige por las siguientes leyes esenciales:

1. La fuerza de rozamiento es independiente del área de contacto
2. La fuerza de rozamiento es proporcional a la fuerza normal de contacto
3. El coeficiente de rozamiento μ (una propiedad del contacto) es independiente de la velocidad de deslizamiento

Mientras que, en el caso del contacto, se pueden distinguir dos tipos:

- **Contactos persistentes:** Contacto con una duración por encima del tiempo característico de observación Δt . Las fuerzas son de carácter persistente en el tiempo.
- **Contactos colisionales:** Contacto de menor duración y que implica intercambio de energía entre granos. Las fuerzas se pueden entender como impulsos.

Cuando el balasto ya se encuentra en la vía ferroviaria se ve afectado por infinidad de acciones externas, tanto mecánicas (principalmente cargas dinámicas y bateo) como químicas (inclemencias del clima), que producen variaciones en su composición. Las partículas experimentan cambios en forma, dimensiones y ordenación pudiendo llegar a roturas y afectando directamente al comportamiento global de la capa de asiento.

La variación de las características del medio granular es una de las causas más importantes de la degradación de la calidad de vía, pero desafortunadamente, aún a día de hoy, resulta difícil identificar correlaciones entre las propiedades de las partículas de balasto en la capa y el estado preciso de la vía de la que forman parte. De hecho, aunque exista una fuerte relación, la evolución en el tiempo de las características del material granular no se puede inferir de la evolución de la capa de balasto.

Puesto que la intención de este Trabajo de Fin de Máster es la de caracterizar en detalle los estados vibratorios por los que se puede ver afectado el balasto actualmente (con intenciones de proporcionar posibles variaciones de su composición a futuro), a continuación se trata de analizar las vibraciones a las que se ven sometidas las partículas a lo largo de su vida útil y cómo estas van a afectar a su comportamiento. Dichas vibraciones pueden tener su origen en el paso continuo de trenes sobre las vías ferroviarias o en el paso de equipos en labores de mantenimiento.

Si nos centramos en el paso de trenes, este provoca vibraciones que se propagan desde el sistema de rieles y durmientes hacia el resto de la plataforma y el terreno circundante. Cuando los trenes circulan a baja velocidad, las vibraciones generadas suelen ser de baja intensidad y no suelen causar problemas. Sin embargo, a medida que aumenta la velocidad de circulación, las vibraciones generadas por el paso de los trenes también aumentan, lo que puede ocasionar inestabilidades en el lecho de balasto o vibraciones no deseadas en elementos cercanos.

En el peor escenario, se puede alcanzar lo que se conoce como velocidad crítica, que es la velocidad en la cual las vibraciones alcanzan su máxima intensidad. Esto puede resultar en una pérdida significativa de capacidad de soporte e incluso en el descarrilamiento del tren si no se controla a tiempo. Incluso a velocidades más bajas, cuando la velocidad del tren se acerca a la velocidad de propagación de las ondas a través del terreno, también se produce un aumento considerable en el nivel de vibraciones.

3.3. Origen de las vibraciones sobre el balasto

En este subapartado, se pretenden enunciar las principales causas de aparición de vibraciones en el balasto. Todas ellas presentan orígenes dinámicos ya que se producen debidas a las cargas del tren sobre la vía ferroviaria.

3.3.1. Vibración del emparrillado

De entre los muchos estudios a este respecto, destaca el enfoque planteado por Thompson en *Railway Noise and Vibration. Mechanisms, Modelling and Means of Control*. [25] centrado en la respuesta en frecuencia al movimiento de una vía con traviesas bibloque con dos tipos de placa de asiento con diferente rigidez.

Obviando el hecho de que los resultados mostrados en la Figura 48 (a) están muy ligados a su caso de estudio en particular, resultan verdaderamente útiles para detectar los diferentes picos de vibración

que pueden darse y a que se deben. Tanto midiendo sobre traviesas como entre ellas, se aprecia un pico de respuesta entorno a los 1000 Hz, relacionado con la distancia de separación entre traviesas. Es un fenómeno conocido que recibe el nombre de *onda de levante* y se da cuando la longitud de la onda vibratoria en el carril corresponde a dos veces la longitud entre dos traviesas. En el escenario donde se mide entre las traviesas, se observa un aumento en la respuesta vertical en el registro. Por otro lado, al realizar la medición directamente sobre la traviesa, se evidencia una disminución repentina.

Además, puede comprobarse que se da un elevado aumento del movimiento vertical en este caso. En casos reales, donde el espaciamiento entre traviesas difícilmente se conserva a lo largo de la vía, este aumento no sería tan pronunciado, pero se daría de igual forma.

En el caso de contar con una placa de asiento de menor rigidez, la respuesta también está directamente relacionada con la separación entre traviesas, pero el movimiento es menor y el pico más difícil de apreciar (Figura 48 (b)). El pico se sitúa en este caso alrededor de los 450 Hz y se da al entrar en resonancia la masa del carril con la placa de asiento.

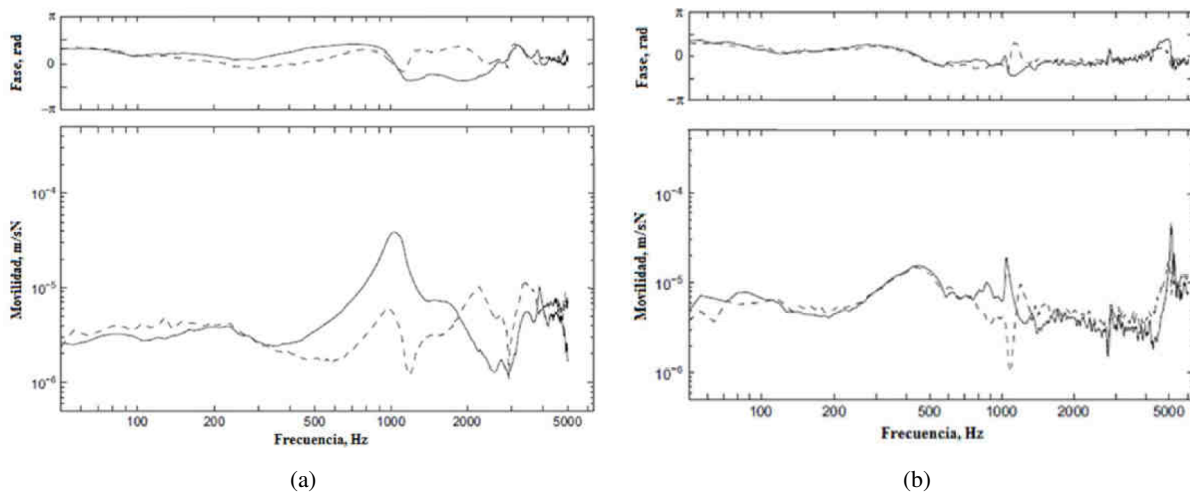


Figura 48: Movilidad vertical vía con traviesas bloqueadas. Trazo continuo representa la medición entre traviesas y trazo discontinuo la medición sobre una traviesa. (a) Placa de asiento rígida. (b) Placa de asiento flexible. Fuente: [25]

Tanto en el caso de placas rígidas como en el de placas flexibles, entorno a los 100 Hz, se produce un aumento de la movilidad vertical correspondiente al instante en el que toda la masa de la vía entra en resonancia con la capa de balasto. De todo esto se puede extraer el papel que tiene la rigidez de la placa de asiento en la transmisión de vibraciones. Placas de asiento de baja rigidez llevan a traviesas bien aisladas del carril y, por tanto, a baja transmisión de vibraciones al terreno mientras que, cuanto mayor es la rigidez menor zona de actuación de vibraciones, pero mayor vibración transmitida al terreno.

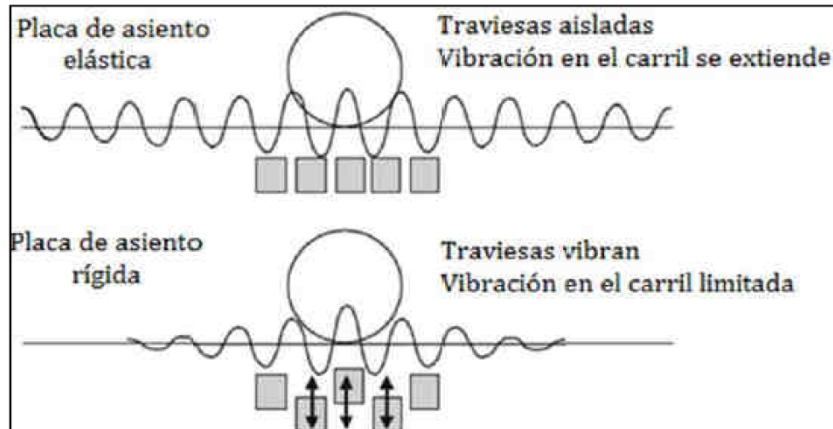


Figura 49: Relación entre rigidez de placa de asiento e interacción vía-travesía (con el amortiguamiento en el carril). Fuente: [25]

En cuanto al amortiguamiento, el carril puede amortiguar vibraciones por sí mismo, pero no es efectivo ante los rangos de frecuencia con mayor capacidad de generar vibraciones. La situación es diferente cuando se trata de la amortiguación de componentes de soporte de la vía. La disminución de las vibraciones ocurre principalmente debido a la pérdida de energía en los elementos que sujetan y soportan el carril, así como a la energía que se transfiere al suelo a través de las traviesas.

A continuación, en la Figura 50, se muestra un ejemplo real donde mayor rigidez lleva a alto amortiguamiento en vía a diferentes frecuencias, pero también a mayores vibraciones transmitidas a las traviesas.

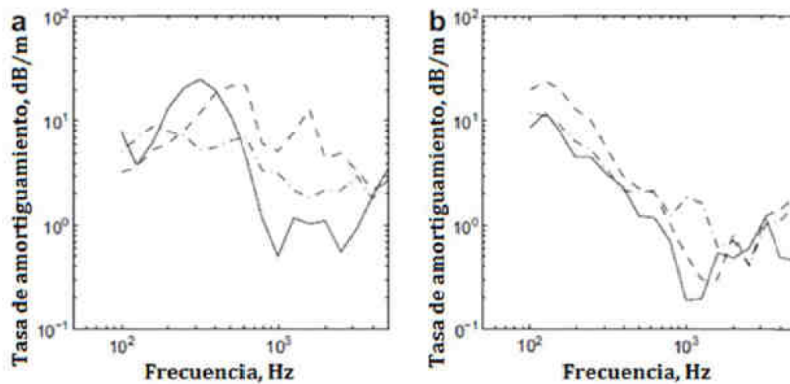


Figura 50: Tasa de amortiguamiento/ m de vía. El trazo continuo, traviesas bloque/placas de asiento poco rígidas; el trazo discontinuo, traviesas bloque/placas de asiento rígidas; y trazo discontinuo punteado, traviesas de madera. (a) Movimiento vertical. (b) Movimiento lateral. Fuente: [25]

Las placas de escasa rigidez absorben mejor vibraciones de baja frecuencia, pero a partir de los 500 Hz, la tasa de amortiguamiento disminuye mucho, llevando a las ondas a prácticamente propagarse libremente

sin apenas disipación. Las placas más rígidas, por su parte, presentan buenas tasas de amortiguamiento para prácticamente cualquier frecuencia de vibración. En ambos casos se aprecia que la amortiguación lateral es menor que la vertical (lo que lleva a ruidos), pero no es un dato relevante para el estudio de las vibraciones.

El caso de traviesas de madera (trazo discontinuo punteado en Figura 50) presenta buenos niveles de amortiguamiento para cualquier frecuencia, sin el pico de amortiguamiento presente en los casos con traviesas bibloque. La razón detrás de esto es que, a esas frecuencias específicas, la combinación de hormigón en las traviesas bibloque y las placas de asiento forma un sistema de masa/resorte que disipa efectivamente las vibraciones. Esto da lugar a lo que se conoce como efecto de amortiguador dinámico. Sin embargo, en el caso de las traviesas de madera, debido a su masa considerablemente menor en comparación con las de hormigón, este efecto no se produce con la misma fuerza o intensidad.

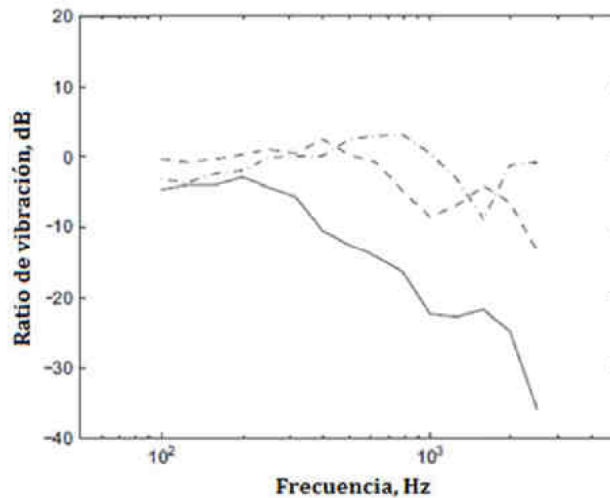


Figura 51: Ratio de vibración traviesa-carril cuando pasa un tren. El trazo continuo, traviesas bibloque/placas de asiento poco rígidas; el trazo discontinuo, traviesas bibloque/placas de asiento rígidas; y trazo discontinuo punteado, traviesas de madera. Fuente: [25]

Por último, comentar que las traviesas se encuentran desacopladas del movimiento del carril cuando las frecuencias son altas. Cerca de los 250 Hz, la masa de la traviesa entra en resonancia con la placa de asiento, absorbe la energía del carril y genera un pequeño pico en el desplazamiento vertical (anti-resonancia) que lleva a su vez a la disminución del movimiento.

Zonas mal soldadas, con mala alineación o con fuertes variaciones de rigidez en poca longitud pueden llevar a mayores movimientos verticales en vía. La falta de control a este respecto, además de suponer mayores vibraciones con el paso de los trenes, puede empeorar con mayor velocidad las condiciones de la vía y, por tanto, aumentar considerablemente el riesgo de accidentes.

3.3.2. Vibraciones debidas al contacto de la rueda con el carril

Para entender las vibraciones que puede suponer la interacción entre la rueda y el carril del vehículo, se va a estudiar cómo vibra la rueda por sí misma.

La rueda de un ferrocarril es un elemento resonante de poco amortiguamiento con frecuencias propias de resonancia, además de contar con distintos modos de resonancia dependiendo de la geometría que presente. Sin embargo, al encontrarse en continua rotación, estos efectos se diluyen y la rugosidad pasa a ser la principal causa de excitación. Por ello, la vibración del elemento en solitario no resulta relevante para entender las vibraciones en alta velocidad, siendo la interacción entre este y el carril lo que genera mayores inconvenientes.

Situaciones de contacto entre dos objetos y las fuerzas que surgen de esa interacción se consideran un problema clásico de la mecánica que fue resuelto en el siglo XIX por Heinrich Rudolf Hertz. Por esta razón, se utiliza el término *contacto hertziano* para describir este tipo de interacciones, como el contacto entre la rueda y el carril, que ocurren en una superficie muy pequeña. En lo que respecta a las vibraciones, se acepta generalmente que, en este caso en particular, la causa principal de la excitación es la rugosidad. Incluso cuando el sistema está en buen estado, siempre hay pequeñas imperfecciones presentes tanto en la rueda como en el carril que contribuyen a estas vibraciones.

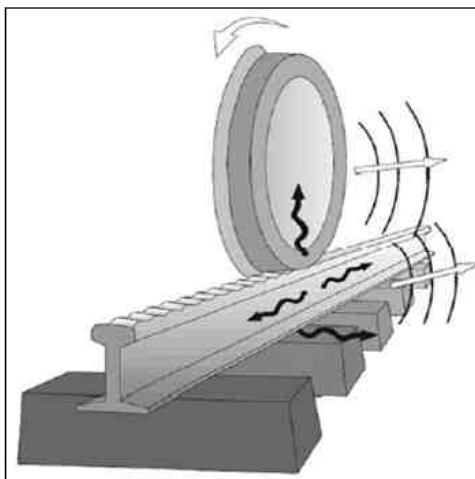


Figura 52: Vibraciones por contacto rueda-carril. Fuente: [25]

Comentar que este mecanismo de generación de vibraciones, a pesar de producir ondas de alta frecuencia (entre 100 y 1000 Hz), no suele resultar problemático, pero es muy tenido en cuenta en los estudios de ruidos generados por el tren. Es también una problemática difícil de eliminar, ya que las irregularidades entre rueda y carril existen en cualquier caso real a estudio. Soluciones comunes son el mantenimiento y cambio a tiempo de ruedas para evitar superficies planas o la utilización de frenos de disco en lugar de frenos de zapata para las ruedas.

Las imperfecciones en el contacto (como soldaduras de mala calidad o irregularidades genéricas entre carril y rueda) también pueden dar lugar a vibraciones de alta frecuencia y onda corta. Suelen darse de 20 a 100 Hz con longitudes variadas entre centímetros y un par de metros. Además, estos efectos pueden ser puntuales o repetirse de manera continua a lo largo de la vía (lo que sería fuertemente perjudicial para que se alargue la vida útil de la máquina).

3.3.3. Vibraciones por paso de carga cuasi-estática

Las vibraciones de este tipo están directamente relacionadas con:

- La frecuencia de paso por ejes
- La frecuencia de paso por bogies
- La frecuencia de paso por traviesas

Ejes, bogies y traviesas, debido a su disposición equiespaciada a lo largo de la longitud del trayecto, llevan a un paso de cargas que se repite de forma constante a medida que va pasando el tren a una determinada velocidad por la vía. Se originan unas pulsaciones que se transmiten al carril, el carril las transmite a las traviesas, y así, finalmente, alcanzan el balasto.

Las vibraciones ocasionadas por el paso de cargas se encuentran en el espectro bajo (de 1 a 25 Hz). El principal problema a tener en cuenta es que estas frecuencias pueden rondar las de resonancia de los puentes de ferrocarril, lo que puede llevar a catástrofes desde el punto de vista estructural. [26].

En la Figura 53 (a) se pueden apreciar las diferentes distancias características en tren y vía. Además, se hace patente que en un tren dado, es factible identificar diversos mecanismos que generan vibraciones en la capa de balasto debido al movimiento de la carga cuasi-estática. Estas vibraciones pueden manifestarse en diferentes rangos de frecuencia, según la configuración tanto del tren como de la vía, si bien no suelen variar de manera significativa entre sí. La nomenclatura de la figura corresponde con:

- M = distancia entre ejes de bogie
- a = distancia entre ejes de un mismo bogie
- d = distancia entre traviesas

Bajo este supuesto, por ejemplo, la frecuencia asociada al mecanismo de generación del paso de bogies correspondería con $f_B = \frac{v}{M}$, mientras que entre ejes de un mismo bogie: $f_B = \frac{v}{a}$. Si suponemos valores aproximados de $v=300$ km/h y distancia entre ejes de 15m (valores ambos lógicos) nos llevaría a frecuencias de 5.55 Hz (es decir, bajas frecuencias como se había pronosticado).

Por otro lado, el avance longitudinal del tren en vía acarrea una deformación en el carril (un pequeño levantamiento del perfil de carril y de la traviesa a la que está sujeto). El paso del tren a cierta velocidad

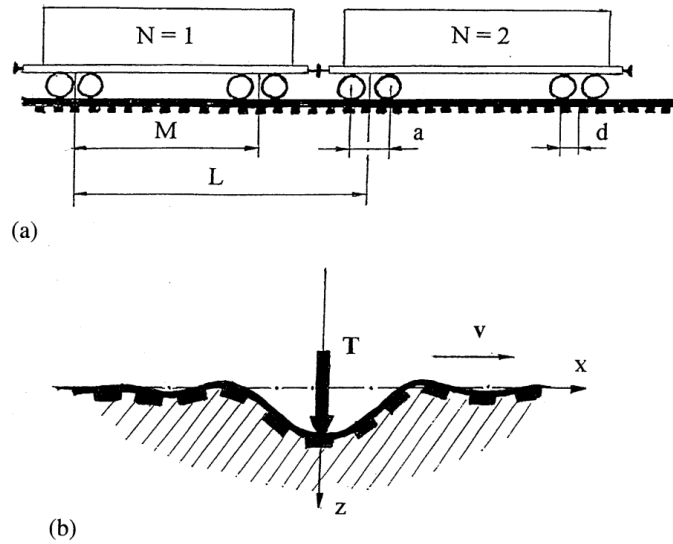


Figura 53: (a) Distancias características de tren y vía. (b) Mecanismo de presión rueda-eje para generar vibraciones en el suelo. Fuente: [26]

por ese punto, fuerza al carril y a la traviesa a recuperar la forma inicial bruscamente, impactando contra el balasto que se halla en la cara bajo traviesa. El movimiento al que lleva es similar al que produciría una onda en el sentido longitudinal de la vida (onda de levante). Todo lo comentado con anterioridad se traduce en el aumento del efecto dinámico de las cargas y, por tanto, en un mayor deterioro del balasto.

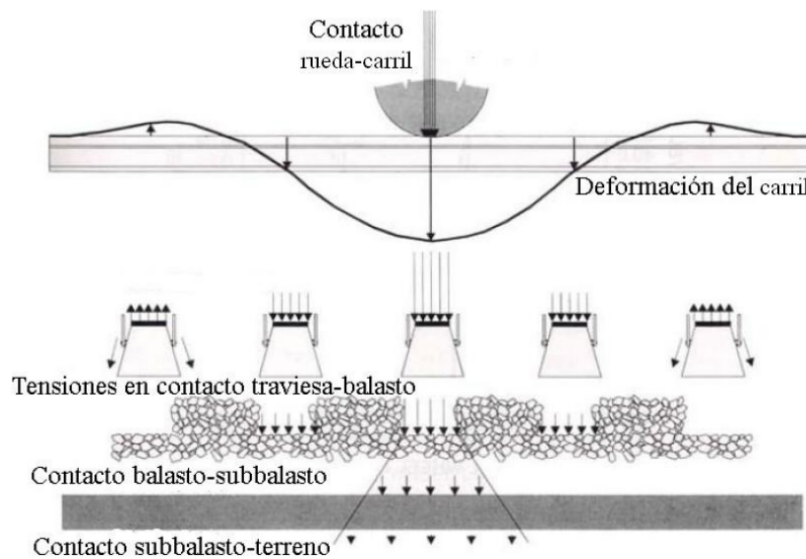


Figura 54: Esquema de la propagación de onda de levante. Fuente: [27]

3.3.4. Vibraciones debidas a danza de traviesas

La danza de las traviesas es un fenómeno ampliamente reconocido en el ámbito ferroviario. Ocurre cuando las cargas repetitivas generadas por los vehículos ferroviarios causan que el asiento del balasto, lo que provoca que las traviesas pierdan su apoyo directo. Como resultado, las traviesas quedan suspendidas sobre la capa de balasto, como se puede observar en la Figura 55, y solo unas pocas proporcionan un soporte real.

Cuando el tren pasa por estos puntos, la carga ejercida por la rueda hace que la traviesa se desplace hacia abajo, golpeando el balasto con una fuerza y velocidad considerables. Esto aumenta el efecto dinámico de la carga en la estructura, lo que deteriora las partículas adyacentes al impacto.

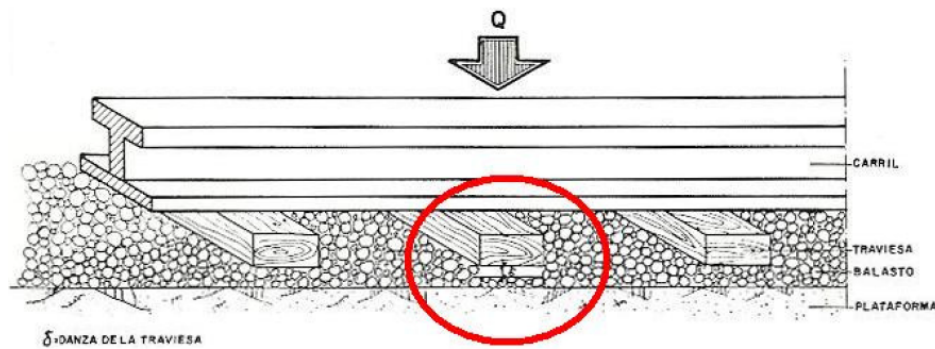


Figura 55: Danza de tradviesas. Fuente: [1]

3.3.5. Vibraciones debidas a las transiciones en vía

Otro aspecto que puede conllevar la aparición de problemas de carácter dinámico son los cambios en las condiciones del terreno.

La situación más común es el paso de un tramo en superficie natural a un tramo en puente (o en general, *transición estructura-terreno natural*). Un tramo natural cuenta en general con menor rigidez y mayor subsidencia y, al producirse la transición de manera brusca y a altas velocidades, conlleva la aparición de vibraciones muy negativas para la durabilidad y estabilidad de la capa de balasto. También a este respecto, la presencia de desplazamientos, deformaciones y giros de los tableros puede llevar a cambios en la geometría de vía, creando irregularidades en la alineación del carril, foco de vibraciones indeseables.

También pueden darse transiciones al pasar de un tipo de terreno a otro. Es un foco fuerte de aumento de cargas dinámicas, aunque es menos común en recorridos ferroviarios que lo anteriormente comentado. Esta casuística es especialmente peligrosa puesto que, el incremento de esfuerzos en la capa lleva a la

aparición de puntos de asiento, que a su vez llevan al aumento de vibraciones, convirtiéndolo en una problemática retroalimentada.

Como cabría esperar, la solución a este problema pasa por tratar de realizar las transiciones de la manera más gradual posible, resultando especialmente importante la suavidad cuanto mayores sean los saltos de rigideces entre tramos o las velocidades de paso. [28]

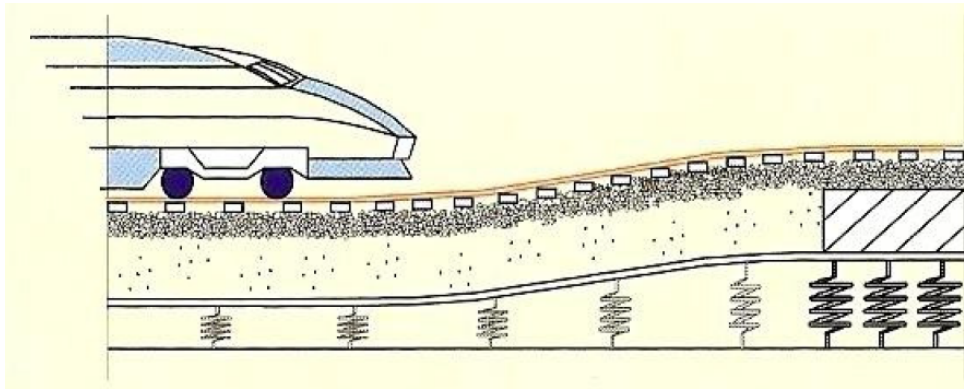


Figura 56: Ejemplo de transición de vía. Fuente: [28]

3.3.6. Efectos de propagación de ondas en alta velocidad

El paso de una carga dinámica sobre un semiespacio elástico acarrea la aparición de ondas de vibración que se desplazan por el terreno y cuya velocidad dependerá de la tipología del medio en el que se propaguen. Horace Lamb (en *On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid* (1904) [29]) fue el primero en categorizar la tipología de ondas que aparecen en el terreno y las denominó:

- Ondas P
- Ondas S
- Ondas de Rayleigh

Las ondas P llevan a las partículas a desplazarse en la dirección de propagación de la propia onda y resultan y se propagan más rápido que las S. En las ondas S, por su parte, las partículas se mueven en una dirección perpendicular a la dirección de propagación. Por último, las ondas R se generan en la superficie libre y provocan un movimiento elíptico en las partículas del suelo. Además, su velocidad de propagación coincide con la velocidad crítica del paso del tren.

En áreas con suelos de baja consistencia, estas ondas pueden ser lo suficientemente bajas como para ser comparables a las generadas por un tren de alta velocidad. Esto puede desencadenar un fenómeno de

resonancia cuando el vehículo pasa por encima. La velocidad de propagación de estas ondas es mayor en suelos más rígidos, por lo que, los suelos menos rígidos entrarán en resonancia antes cuando un tren pase sobre ellos.

Dicha resonancia se dará cuando las velocidades de vibración de la superficie de la capa de balasto y terreno son iguales a la velocidad del tren. Cuando se da esta circunstancia, la energía de las ondas generadas por la carga se desplaza exactamente con la misma velocidad que la propia carga, acumulándose energía bajo el tren con el paso del tiempo. En la Figura 57 se puede ver de forma esquemática (se aprecia la acumulación de energía en la zona de los bogies):

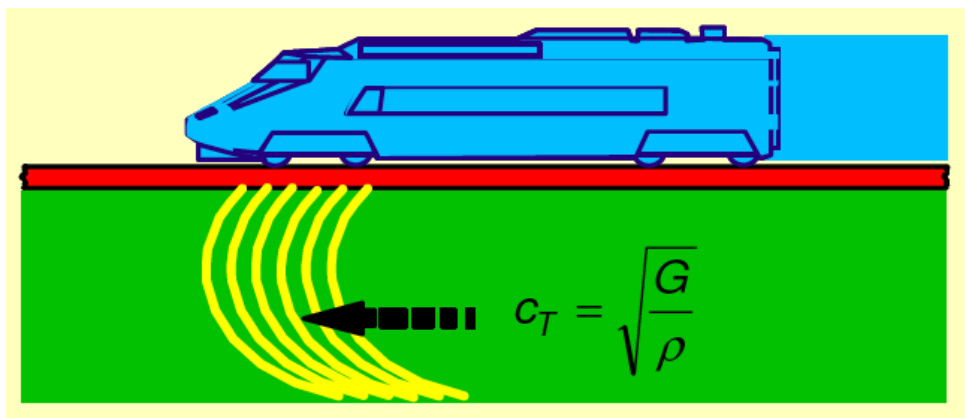


Figura 57: Propagación de onda a alta velocidad. Fuente: [28]

La velocidad mínima a la que se da la resonancia comentada es la conocida como velocidad crítica del tren. A pesar de que pueden existir varias velocidades críticas según condición de vía o según medio de propagación de las ondas, se definirá como la menos de ellas puesto que será la primera en ser alcanzada. Teniendo en cuenta que G representa el Módulo de deformación transversal y ρ la densidad del terreno, podemos definir dicha velocidad crítica a través de la expresión:

$$c_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (14)$$

Actualmente, muchos trenes pueden superar la velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh y los niveles de vibración que suponen empujan a restringir las velocidades alcanzadas.

3.3.7. Efectos dinámicos en puentes

Ya se comentó con anterioridad a lo largo de este capítulo, que el paso de elementos fijos de tren y vía a velocidades específicas generaba excitaciones sobre el lecho con frecuencias entre 1 y 25 Hz. Aunque es importante en zonas comunes de vía, resulta incluso más relevante cuando un alta velocidad atraviesa

un tramo de puente. Durante la operación de la línea de París a Lyon, se pudo observar cómo en algunos puentes de luces comprendidas entre 14 y 20 metros, se producía la expulsión de partículas de balasto desde la plataforma de la vía. Este fenómeno resultaba en la disminución de la resistencia lateral de los puentes y podía ocasionar efectos de pandeo. Se atribuyó este acontecimiento a la resonancia generada en los puentes cuando el vehículo pasaba a altas velocidades (alrededor de 260 Km/h).

Las regulaciones vigentes para el diseño de puentes ferroviarios consideran la carga dinámica a través de un factor conocido como Coeficiente de Impacto. Este coeficiente representa el incremento en la respuesta dinámica en comparación con la respuesta estática para una carga móvil individual. [30] Dicho Coeficiente se puede caracterizar a través de la envolvente de:

$$\varphi = \max(1 + \varphi' + \varphi'') \quad (15)$$

donde, el incremento dinámico tendría un valor máximo de $\varphi'=1.32$ para una vía recta ideal y φ'' resultaría dependiente de las irregularidades de las vías.

Goicolea et al. [30], con intenciones de dar validez a dichas suposiciones en cuanto al coeficiente, estudiaron el paso de un tramo de locomotora ICE2 (igualándolo a una carga puntual) con los siguientes valores de parámetros:

Carga puntual	Puente isostáticos			
Valor	Masa p.u.d. longitud	Rigidez a flexión (EI)	Frecuencia fundamental (primer modo de vibrac.)	Tasa de amortiguamiento estructural
195 kN	15 t/m	$769 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$	5 Hz	2 %

Cuadro 4: Parámetros del problema del ICE2 como carga puntual. Fuente: [30]

Con los valores mostrados en el Cuadro 4 se buscó el desplazamiento máximo con velocidades en el rango de 200-400 km/h. Para su cálculo, supuesta una carga estática, se utilizó la expresión:

$$\delta_{est} = \frac{PL^3}{48EI} \quad (16)$$

Utilizándolos se llega a un $\delta_{est} = 1.78 \text{ mm}$ y, por tanto, el coeficiente de impacto correspondiente resulta suficiente para tener en cuenta el efecto dinámico de una carga móvil en el cálculo de puentes de ferrocarril. [31]

Sin embargo, al tratar de trasladarse este planteamiento a un tren ideal con cargas constituido por diez ejes idénticos al anterior (distancia entre ellos, distancia entre bogies, $D=16 \text{ m}$) las respuestas difieren fuertemente con las velocidades. En los estudios se hicieron pruebas con dos valores ($v = 288 \text{ km/h}$ y $v = 360 \text{ km/h}$) y se detectaron diferencias importantes, destacando sobremanera que la respuesta en el primer caso superaba por mucho al segundo, aun tratándose de la casuística ligada a una velocidad mayor. Esto tiene que ver con que se genera un fenómeno de resonancia con la frecuencia fundamental del puente

a $v = 288 \text{ km/h}$, ya que esto no aumenta con la velocidad, sino que se da a ciertas velocidades críticas determinadas. [30]

Este suceso se puede explicar, tratándose de un caso de espaciamiento uniforme, a través de la expresión de la frecuencia f_p por cargas cíclicas debidas a los ejes del tren:

$$f_p = \frac{v}{D}, \quad (17)$$

de la cual, si se sustituyen los parámetros comentados se obtiene una $f_p = 5 \text{ Hz}$. Al coincidir esta frecuencia con la primera fundamental del puente, se produce la resonancia comentada.

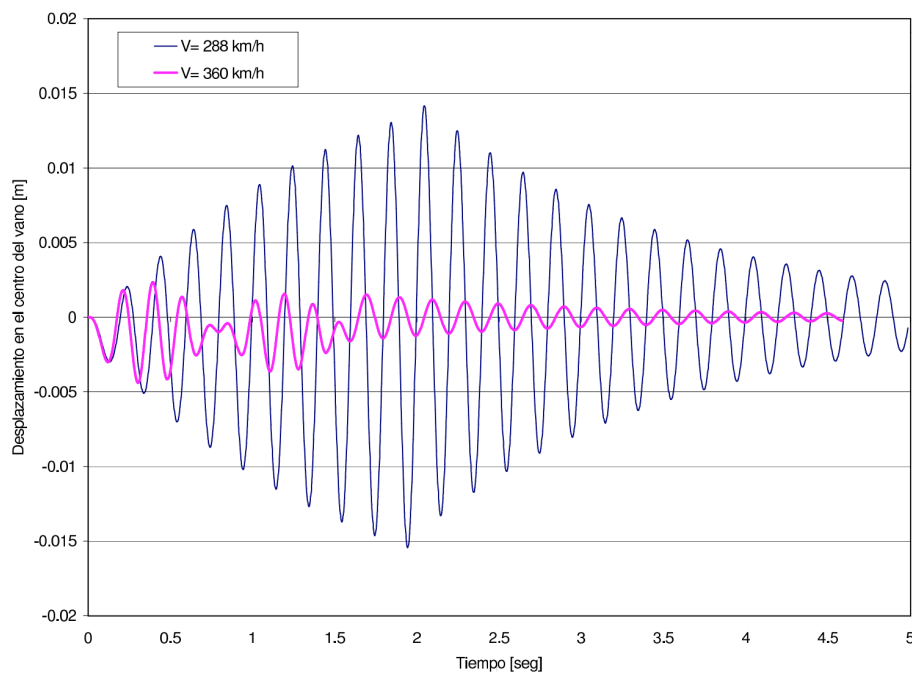


Figura 58: Desplazamiento máximo en el centro del vano en función del tiempo para velocidades de paso $v=288 \text{ km/h}$ (negro) y $v=360 \text{ km/h}$ (rosa). Fuente: [30]

Conocer los modos fundamentales de vibración de un puente es fundamental para entender su comportamiento y las respuestas que presentará ante diferentes esfuerzos. Si se trata de un puente isostático biapoyado, sus tres primeros modos de vibración coincidirían con lo pronosticado por el modelo de la viga de Bernoulli (representados en Figura 59), aunque en este caso, la resonancia solo se daría para el primero de ellos.

Debe entenderse que, antes de que la alta velocidad fuese común, el efecto resonante no era un problema como tal, hasta el punto de que el comentado coeficiente de impacto no tiene en cuenta dicho

fenómeno. Con las velocidades de los trenes de alta velocidad hoy día y teniendo en cuenta las distancias entre ejes de trenes actuales (13-20 m) es importante tenerlo en cuenta en los estudios ferroviarios.

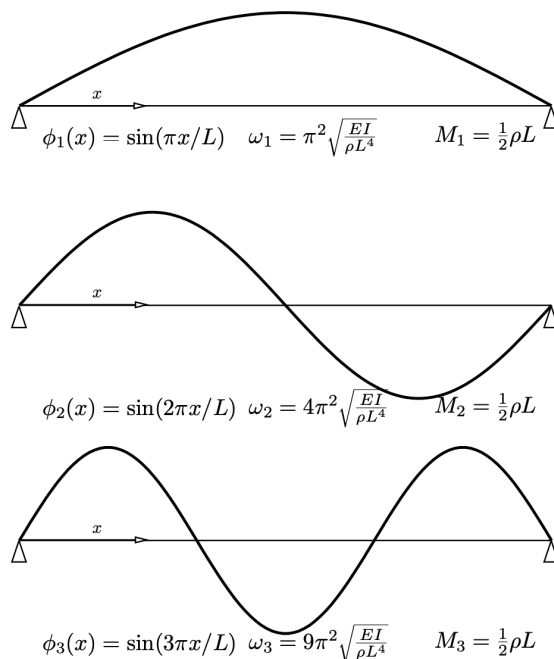


Figura 59: Tres primeros modos de vibración de una viga isostática. Fuente: [30]

Haciendo hincapié en las posibles causas de la resonancia, del estudio analizado se puede extraer que los principales factores presentes en su aparición en puentes de ferrocarril son:

- Espacio característico entre bogies y ejes del tren
- Velocidad del tren
- Frecuencia fundamental del puente (coincidente con la primera propia si se trata de puentes isostáticos biapoyados)

La capa de balasto se ve fuertemente influenciada por estos efectos resonantes. Si aumentan los desplazamientos en el vano, aumentan por consiguiente las aceleraciones y los esfuerzos sobre la capa de balasto, lo que implica: desgaste más rápido, danza de traviesas por la aparición de espacios huecos tras las traviesas, pérdida de compactación, pérdida de nivelación longitudinal y transversal o licuefacción. [30] [31]

3.3.8. Efecto de las frecuencias

A pesar de las innumerables causas de vibraciones y rangos de estas en la problemática, al balasto generalmente suelen afectarle los impulsos de baja frecuencia debidos a los bogies (hasta 25 Hz) y los de

alta frecuencia (entre 50 y 120 Hz) del fenómeno, a través de ruido estructural. Este ruido estructural es aquel que se da en una estructura cuando se n vibraciones a través de la misma.

Para entender el efecto de las frecuencias, resulta interesante analizar las mediciones que se tomaron en los ensayos de homologación del tramo Córdoba-Antequera de un tren AVE a finales de 2006. Con una velocidad de la máquina de 250 km/h y midiendo a 3, 8.6 y 11.8 m de la vía, se pudo comprobar (como queda reflejado en la Figura 60) que las frecuencias, efectivamente, pertenecían al rango 25-150 Hz. [32]

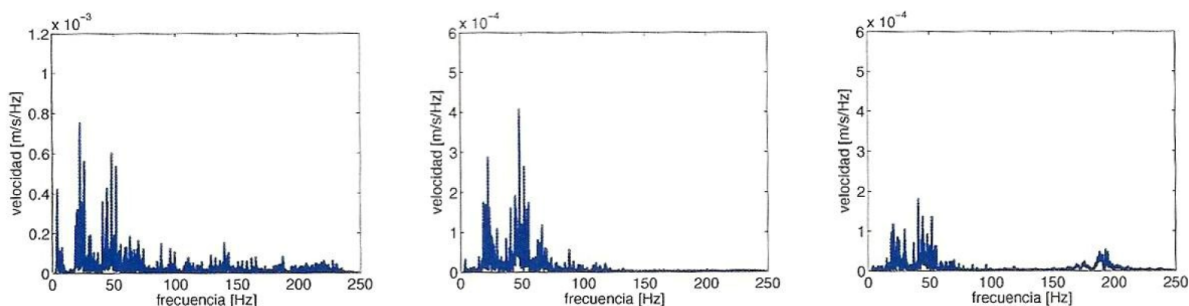


Figura 60: Frecuencias al paso de AVE (250 km/h) para 3, 8.6 y 11.8 m de vía. Fuente: [32]

Si se utiliza el ICE (tren de ensayos) a 320 km/h como referencia, se pueden detectar sus picos de frecuencia y, en líneas general, comprobar que coinciden con los anteriores en la Figura:

- A 20 Hz, por configuración de ejes
- A 50 Hz, por ondulaciones de carril de onda larga y danza de traviesas
- A 100 Hz, por posibles defectos en la vía
- A 130 Hz, (punta) coincide con el espacio entre traviesas de 60 cm
- A 220 Hz, por ondulaciones de carril de onda corta

Vibraciones que superen los 50 Hz (consideradas, por tanto, de alta frecuencia) hacen variar el comportamiento vibratorio del asiento del balasto cuando pasan trenes sobre él, y cuando se trata de alta velocidad, cabe esperar la aparición de puntas entre los 50 y los 150 Hz, por lo que resulta de especial importancia cuidar que no se produzca licuefacción del balasto. Este concepto se explicará con más detalle en siguientes apartados.

En Alemania, por su parte, se realizaron simulaciones con impulsos de 200 kN y frecuencias de 25 Hz (equivalencia con 200 km/h) introduciendo esporádicamente vibraciones de 80 Hz para comprobar hasta qué punto las frecuencias tenían importancia real en los asientos de la capa. Estos estudios permitieron definir tres fases:

- **Fase I:** No hay vibraciones. Asiento inicial continuado y posterior consolidación con tan solo un pequeño asiento.
- **Fase II:** Vibraciones añadidas de 80 Hz. Por licuefacción del balasto, el asiento aumenta prácticamente de manera lineal.
- **Fase III:** Nueva consolidación exenta de vibraciones.

Otro experimento interesante en este campo es el que quedó reflejado en *Comportement des matériaux granulaires sous vibration: Application au cas du ballast*. de Karrech [33], a través del cual se pudo comprobar la relación entre la frecuencia de vibración y el asiento provocado en un material granular parcialmente confinado. Una confinación absoluta resultaría de poco interés por alejarse en demasía de las condiciones en las que se encuentra el balasto en vía. La capa pasó por 200000 ciclos de carga con amplitudes de fuerza aplicadas entre 1-3 kN y distintas frecuencias de excitación. Los resultados pueden verse en la Figura 62:

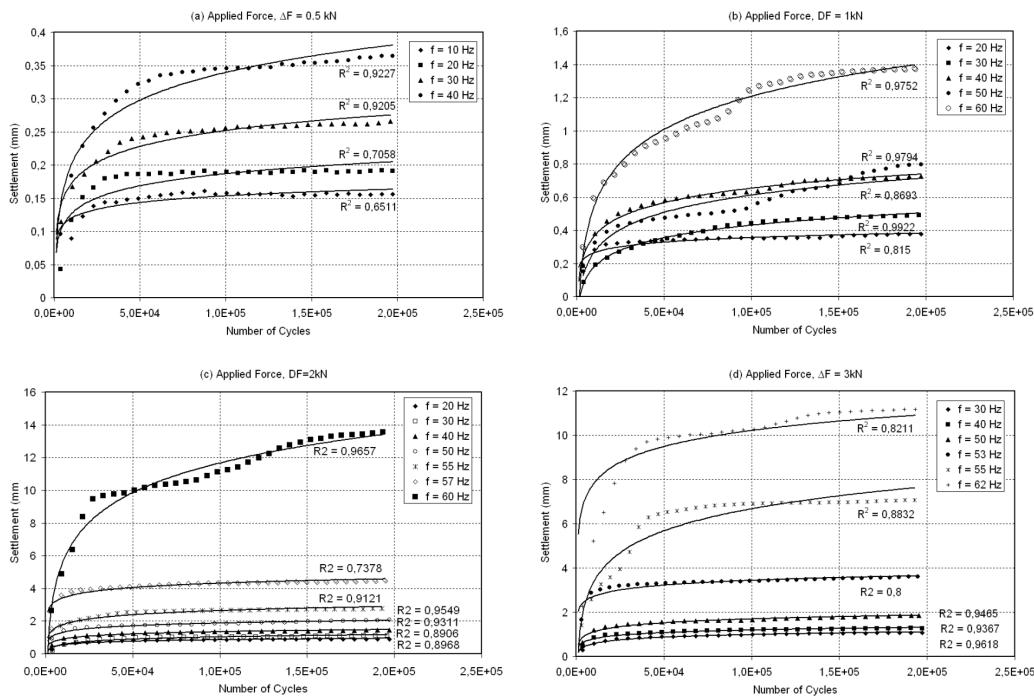


Figura 61: Medida de los asientos respecto al número de ciclos para distintas frecuencias. Fuente: [33]

De los resultados se pueden extraer una serie de conclusiones. La primera se ve en el rango de excitaciones 10-60 Hz (común en ferrocarriles), ya que a mayores frecuencias de excitación sobre materiales granulares mayores resultan los asientos en la capa, y resultan necesarios más ciclos de carga para alcanzar una asíntota horizontal, es decir, para alcanzar zona donde el asiento no crezca progresivamente.

Por otra parte, se aprecian aumentos de deformación mucho más acusados a lo largo de los primeros 50000 ciclos. Esto puede estar relacionado con una recolocación de los granos al inicio hasta alcanzar mayor empaquetamiento. A mayor nivel de empaquetamiento, menos espacios vacíos entre granos. Así, aumentando el grado de consolidación, se reducen los asientos experimentados por el balasto. [33]

Con todo lo visto hasta al momento puede llegarse a la conclusión de que la velocidad está relacionada con la amplificación de esfuerzos sobre la vía, pero no es una condición necesaria. De hecho, en una vía en perfecto estado, un tren podría circular a muy altas velocidades sin acarrear esto desperfectos o la generación de vibraciones especialmente perjudiciales. En el caso de haber resonancias, los picos de deformación ni siquiera están ligados directamente a aumentos en la velocidad y son más importantes para ciertas velocidades determinadas (que no son necesariamente las más altas).

3.4. Consecuencias de las vibraciones sobre la capa de balasto

De manera general, las cargas que se transmiten por el paso de tráfico ferroviario son elevadas y, ya sean de naturaleza estática o dinámica, su aleatoriedad afecta negativamente al estado del balasto. Las presiones a las que se ve sometida la capa son tremendamente peligrosas si se busca mantenerla con las características deseadas y necesarias. Los principales daños y efectos que acarrea la aparición de vibraciones perjudiciales sobre la capa son:

- **Pérdida de la estructura granular resistente interna inicial:** La presencia de asientos remanentes en la vía demuestra cómo el material, que se ha desgastado a nivel microscópico, busca nuevas formas de acomodarse para mantener su resistencia. Estas nuevas disposiciones generalmente ocasionan un descenso irreversible en la altura del balasto. Este fenómeno ocurre al mismo tiempo que otros tipos de asientos, como los causados por la plataforma, los rellenos en el terraplén, el subbalasto, entre otros.
- **Evolución de la forma de los elementos:** Se ha constatado que las aristas afiladas que deberían tener los granos de balasto tienden a desgastarse después de un gran número de ciclos de carga. Este desgaste provoca que los bordes se vuelvan más redondeados, lo que obliga a los granos a buscar nuevos puntos de apoyo con los granos vecinos. Como resultado, se produce una modificación en la estructura original de la capa de balasto.
- **Consecuencias negativas del bateo:** El bateo es un proceso consistente en meter balasto debajo de la traviesa justo en la vertical del riel y dejando el centro de la traviesa sin balasto. Entre las acciones que afectan negativamente al balasto, podemos destacar cuando este se ve sometido a cargas acompañadas de vibraciones en el rango de frecuencia de 35 a 45 Hz. Estas vibraciones, que se transmiten durante las operaciones de bateo, causan una degradación significativa de los granos de balasto. Lleva además a los dos efectos mencionados anteriormente: alteración de la estructura granular interna original y degradación de la forma original de los elementos.

Estos fenómenos ocasionan cambios en la forma original de la vía, generando heterogeneidades en las propiedades mecánicas del balasto debajo de las traviesas. Esto altera los valores de rigidez global e introduce variaciones locales de rigidez que tienen efectos dinámicos en la carga de tráfico, degradando a su vez, la geometría de las áreas cercanas al bache. Este efecto se conoce como degradación de la vía, y en términos generales y desde el punto de vista operativo, se resume como una modificación residual de la geometría inicial de la vía. [27]

Cómo cabe esperar debido al tema que nos ocupa, una de las principales consecuencias de la presencia de vibraciones en la alta velocidad ferroviaria es el vuelo de balasto. No se dedica un apartado específico para ello a lo largo de esta sección ya que se va a utilizar para dar luz sobre algunos otros factores relacionados con las vibraciones que dan una dimensión mayor al estudio.

En cualquier caso, se hace hincapié en que tanto la aerodinámica, como el diseño y estado de la vía, y la excitación dinámica de las partículas de balasto inducida por las vibraciones (descompensación vibratoria de las partículas), son factores determinantes para el estudio y comprensión del fenómeno y para el diseño de soluciones. Con el objeto de establecer criterios para los parámetros de diseño de una posible futura solución óptima, conviene no olvidar que el peso específico del material es un factor directamente relacionado con dicho vuelo.

3.4.1. Licuefacción del balasto

Un tema que aparece repetido en varias ocasiones a lo largo de este Trabajo de Fin de Máster es el hecho de que cuando los trenes atraviesan una vía, se generan esfuerzos que impactan directamente en la capa de balasto, acelerando las partículas y confiriéndoles vibraciones de mayor o menor repercusión según caso. En el caso de trenes de alta velocidad (que es el tema que nos ocupa), estas vibraciones pueden ser muy intensas y afectar significativamente el comportamiento y la capacidad de reacción del balasto frente a los esfuerzos transmitidos por las traviesas. El exceso de esfuerzo dinámico en el balasto puede dar lugar a la pérdida de fricción entre las partículas, el desacoplamiento entre las caras de las traviesas, la disminución de la rigidez vertical y la resistencia lateral. Este deterioro rápido de la estabilidad del lecho de balasto puede ocasionar el desplazamiento del carril y, por consiguiente, de la vía, lo que resulta en la pérdida de alineación y en una disminución general de la calidad geométrica. [31]

A este respecto, Morgan y Markland demostraron en *The Effect of Vibration on Ballast Beds* [34] que la aplicación de un cierto grado de vibración a un material granular puede aumentar tanto su capacidad de soporte de carga como su nivel de compactación dentro de una vía. Este planteamiento casa con lo propuesto por Karrech en [33], ya que aseguraba que las cargas cíclicas a pequeñas frecuencias llevaban al balasto a recolocarse provocando un asiento inicial, pero asegurando que se evitasen posteriores asientos. Por decirlo de manera más sencilla, un movimiento y recolocación inicial de las partículas de balasto lleva a mayor compactación y a menor riesgo de asientos futuros de la capa.

A partir de ciertas aceleraciones (del orden de 0.8g) los materiales granulares comienzan a sufrir degradaciones de varios tipos, relacionadas con los fenómenos propios de la convección granular. Una vez superado un umbral de aceleraciones cercano al propuesto, los medios granulares comienzan a sufrir movimientos relativos entre las partículas que lo constituyen, llevándolo a comportarse como un medio fluido. Con aceleraciones del orden de 0.8g puede empezar a vislumbrarse la pérdida de capacidad portante, pero es a partir de los 1.4g que la situación se vuelve insostenible y se produce la licuefacción total del balasto. [31]

Además de todo lo comentado, varios estudios han constatado que las aceleraciones del balasto en la zona interior pueden superar hasta en un %15 las sufridas por la superficie (detalle que explicaría el comienzo de las irregularidades en el balasto alrededor de los 0.8g).

Las consecuencias negativas de esto sobre el balasto se enumeran a continuación:

1. **Pérdida de soporte vertical:** Se podrían dar tanto variaciones en la alineación de la vía como torsiones en el carril por asientos diferenciales. Por otra parte, también puede darse descompensación de las cargas del tren sobre uno de los carriles desgastándolo en mayor medida o la pérdida de contacto de las ruedas de la máquina. No se va a dar una pérdida completa de la resistencia vertical, pero las sollicitaciones son suficientes para resultar fuertemente perjudiciales [31]
2. **Pérdida de soporte lateral:** A parte de no poder soportar los esfuerzos laterales impuestos por la vía, sufre también de pandeos y variaciones en alineación que no se daban antes (esto lo provoca las tensiones procedentes de aumentos de temperatura por encima de lo admisible). Al igual que en el punto anterior, no se pierde por completo el soporte lateral, pero la disminución de la capacidad portante por pequeña que resulte, lleva a la capacidad de soportar menores cargas que antes de estos efectos. [31]
3. **Pérdida de soporte longitudinal:** Importante para frenados y tracción. Debida a factores similares a los de la pérdida lateral. Las vigas transmiten las fuerzas al balasto en toda su longitud (que tiene alrededor de 2.6 metros para vigas monobloque). Por consiguiente, las fuerzas se distribuyen en una superficie más amplia, lo que implica que es menos probable que se generen fuerzas tan elevadas que el lecho no pueda soportarlas, incluso si está sometido a una vibración intensa. [31]

Todo esto tan solo llevará a un efecto cadena continuo. Empeoramientos de vía llevan a mayores esfuerzos dinámicos al paso del tren por los tramos deteriorados, aumentando así la aceleración de las partículas y llevando, por tanto, al empeoramiento de nuevo.

Algunas de las soluciones pasan por realizar operaciones de bateo, alineado y amolado de carriles, traduciéndose todo ello en mayores costes de mantenimiento y en tratamientos de vía prematuros (antes de lo que sería idóneo).

3.4.2. Efecto de labores de mantenimiento. La importancia del concepto de Bateo

Este apartado aborda un tema verdaderamente importante cuando se hace un estudio vibratorio en el ámbito ferroviario. A pesar de no tratarse estrictamente de un efecto de las vibraciones sobre las vías, se añade este apartado al tratarse de un efecto directo de estos efectos, valga la redundancia. Las propias labores de mantenimiento que surgen como producto de las vibraciones tienen efectos a su vez en las vías y dentro de estas operaciones destacan sobremanera las labores de bateo. De hecho, las propias labores de bateo están fuertemente relacionadas con las vibraciones en la capa de balasto, ya que son un paso clave en su ejecución.

Se denomina bateo a la operación cuyo objetivo es la corrección de los defectos que aparecen en la geometría de la vía como consecuencia de los asentamientos producidos principalmente en la capa de balasto. La operación de bateo de la vía consiste en afianzar el apoyo de las traviesas y contribuir a evitar los apelmazamientos del balasto que dificulten el drenaje de la vía. Esto se lleva a cabo mediante la penetración de unos bates vibrantes en la capa de balasto, a ambos lados de una traviesa, y la posterior introducción de material bajo traviesa mediante un movimiento relativo de aproximación de dichos bates.

Durante el bateo, a pesar de que se trata (en sucesivas operaciones de bateo) con muy pocos ciclos de carga, las sollicitaciones sobre el balasto son las más elevadas.

En este ámbito, son escasos los estudios experimentales o las modelizaciones que analicen la degradación del balasto. Las modelizaciones que consideren la rotura de partículas son escasas y la rotura se aborda de forma simplificada (por ejemplo, considerar el grano como un conjunto de sub-partículas de la misma forma ligadas con un criterio de cohesión).

MOVIMIENTOS DE LOS BATES Y TIPOS DE BATEO

Resulta interesante, antes de profundizar en el bateo y sus efectos, conocer su tipología y formas de categorizarlo. Si se hace un acercamiento desde el punto de vista genérico, se puede decir que los bates pueden sufrir movimientos de tres tipos:

- **Introducción en capa de balasto.** Según el modelo de bateadora, la profundidad máxima de bateo puede ser variable, pero se puede aproximar a 450-500 mm.
- **De cierre.** Introducción en la capa de balasto bajo las traviesas para asegurar que se apoye correctamente,
- **Vibratorio.** Los bates hacen vibrar las partículas de balasto para reorganizar y asegurar compactación. La amplitud óptima de dichas vibraciones está en torno a los 3-5 mm. Luego, será necesario una estabilización de vía para asegurar la compactación y estado correcto de la banqueta.

Dentro del movimiento definido como de cierre se pueden diferenciar dos modalidades de bateo:

- **Síncrono.** Cada bate recorre exactamente el mismo espacio y todos paran si uno de ellos encuentra dificultades para avanzar equiparable a una presión por encima de la de compactación deseada.
- **Asíncrono.** Cada bate es independiente del resto.



Figura 62: Bateadora MATISA, propiedad de la Cosfesa, en la estación de ferrocarril de Salamanca. Fuente: Dominio público.

PROCEDIMIENTO DE BATEO

Las operaciones de bateo consisten en corregir imperfecciones en la geometría de vía debidas al tráfico de ferrocarriles a través de labores de alineación y nivelación. Dichas tareas son llevadas a cabo por máquinas conocidas como bateadoras, encargadas de comprimir y hacer vibrar el balasto bajo traviesas y que pueden alcanzar en algunos modelos los 200 m/h de rendimiento.

Si bien la pérdida de calidad en la geometría puede ser comprendida en sentido amplio como la consecuencia de los asientos globales de todas las capas de asiento y plataforma, es la capa de balasto la que permite mediante las operaciones de bateo la restitución de dicha geometría.

En cualquier caso, las operaciones de bateo no siempre son suficiente para reestablecer la geometría. En algunos casos, el tan deficiente estado de las vías, lleva a la necesidad de sustituir parcial o por completo algunos tramos.

Una operación de bateo completa comprende, a su vez, varias suboperaciones que se desglosan a continuación:

1. Levantamiento del carril (el cual a su vez levantará la traviesa) por su cabeza, mediante unos discos diseñados específicamente para dicha tarea, hasta la altura deseada. Ocupará esta posición buscada una vez se haya realizado el vibrado bajo la misma.

2. Introducción de los bates rápidamente en el balasto de los alrededores de la traviesa, vibrando a una frecuencia determinada, de manera que la parte inferior descienda por debajo de la traviesa. Las vibraciones facilitan la introducción del bate en la masa granular además de dotar a dicha masa de un estado que se denomina de licuefacción o de fluidez.
3. Junto con el vibrado se da la redistribución del mayor número de granos posible bajo traviesa. En esta fase, los bates se aproximan entre sí una distancia dada (conocida como carrera).
4. Extracción de los bates del balasto y liberación de la traviesa, que quedará en la posición y altura prefijadas. A continuación, se desplaza la bateadora una distancia igual a la distancia entre traviesas.

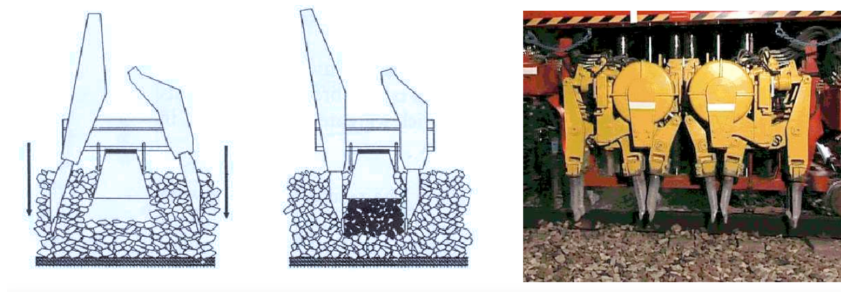


Figura 63: Esquema del bateo. Fuente: [35]

Comentar que la operación de estabilización del balasto (simula el paso de unas 100000 toneladas de carga) es utilizada tanto para compactar un balasto nuevo y reproducir el asiento que ocurre en la primera fase de la vida del balasto como para recuperar parcialmente la pérdida de resistencia lateral del balasto después de un bateo.

Parámetros	Intervalo de valores
Frecuencia de vibración	35-45 Hz
Fuerza de aproximación mutua de bates bajo traviesa	16-19 kN
Amplitud de vibración óptima	3-5 mm
Tiempo de aproximación mutua de bates bajo traviesa	0.8-1 s
Profundidad de introducción bajo traviesa	≈ 450 mm
Velocidad de introducción de bates en balasto	1-2 m/s

Cuadro 5: Parámetros característicos del bateo. Fuente: [35]

Los valores que caracterizan la operación de bateo se muestran en el Cuadro 5. Posteriormente se describen y justifica su elección.

La **frecuencias** de las bateadoras de última generación oscilan entre los 35 y los 45 Hz, pudiendo vibrar hasta a 60 Hz si se tratase de una máquina manual. De hecho, se puede sacar una relación entre la frecuencia de bateo y el estado en el que se encuentra el balasto (Cuadro 6)

Frecuencia	Intervalo de frecuencia	Comportamiento del balasto
Baja	$f < 15$ Hz	Sólido
Media	$15 \text{ Hz} < f < 30$ Hz	Viscoelástico
Alta	$30 \text{ Hz} < f < 45$ Hz	Líquido

Cuadro 6: Relación entre frecuencia de bateo y estado del balasto. Fuente: [36]

Por lo general, y dependiendo de la resistencia que ofrezca el balasto en las diferentes fases del proceso, las **amplitudes** de vibración óptima pueden variar de 3 a 5 mm.

En cuanto a la **fuerza de aproximación mutua entre bates**, debe aclararse que es un parámetro fuertemente dependiente de la calidad del balasto y de sus reacciones ante solicitaciones. Su máximo se alcanza cuando los bates se encuentran introducidos por completo en el balasto. El mínimo del rango planteado en el Cuadro 6 concuerda con la fuerza en la base de los datos requerida para actuar a nivel de gato hidráulico actuador. A esto se puede añadir que algunos modelos de bateadora cuentan con dispositivos de contrapresión para evitar choques bruscos y, por tanto, fracturas de grano en el balasto.

Esta aproximación entre bates bajo travesía se da buscando compensar los posibles vacíos consecuencia de la filtración de elementos finos hacia las subcapas durante la vibración y por el levante del carril cuando se trata de posicionar correctamente. **Los tiempos característicos** son del orden de 1 segundo, pero varían con la frecuencia de vibración. Eso sí, varios ensayos han demostrado que tiempos por encima de 1 segundo no son perjudiciales, aunque parece más efectivo realizar dos ciclos consecutivos por travesía en lugar de uno más largo.

La **profundidad**, por su parte, se puede definir como la distancia entre la superficie de travesía y el borde superior del pie del bate. La fuerza a la hora de penetrar depende del peso de la bateadora y su velocidad de penetración ronda los 2 m/s.

Por último, se pueden comentar algunos detalles al respecto de la **geometría común de bates**. Aunque no se da en todos los casos, es recurrente disponer de bates en forma de T invertida.

ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE EL BATEO

De entre todos los estudios que abordan los movimientos y tensiones del balasto en las operaciones de bateo, uno de los más destacables es el presente en la Tesis de Azema *Étude numérique des matériaux granulaires à grains polyédriques: rhéologie quasi-statique, dynamique vibratoire, application au procédé de bourrage du ballast* [35]. En él se plantean modelizaciones numéricas del bateo, reproduciendo parámetros como la frecuencia de vibración horizontal, fuerza de apriete, etc. Se simulan sucesivamente las tres fases principales del bateo:

- Hundimiento de bates
- Apriete de bates
- Retirada de bates

En un inicio, en la fase de hundimiento o penetración de bates, surgirán importantes esfuerzos (Figura 64). Cuanto mayor es la velocidad de penetración menor resulta el grado de compactación alcanzado en la capa de balasto.

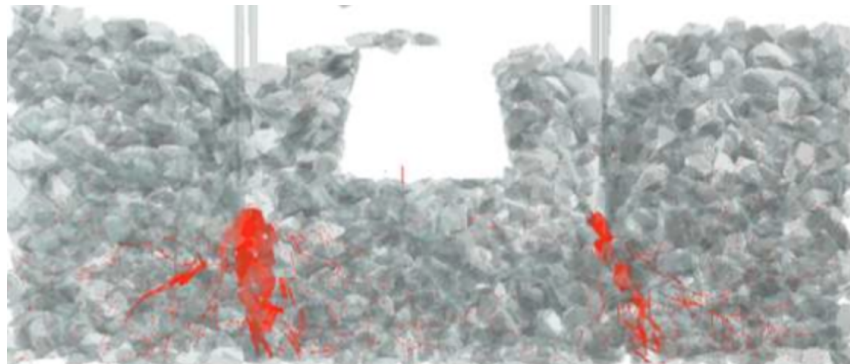


Figura 64: Representación de las fuerzas normales en los bates (en rojo) y en un tramo durante la penetración, para una frecuencia de vibración de 20 Hz. Fuente: [35]

De igual modo, el aumento de la compactación ($\Delta\rho$) del balasto bajo travesía se produce casi en su totalidad durante la penetración de los bates y, siendo más precisos, cabe destacar su aumento a medida que aumenta la frecuencia de vibración de éstos. Por ejemplo, en un caso donde la frecuencia de vibración es de 50 Hz, $\Delta\rho \approx 0.25$, mientras que, si dicha frecuencia tiene un valor de 5 Hz, se alcanza un $\Delta\rho \approx 0.2$.

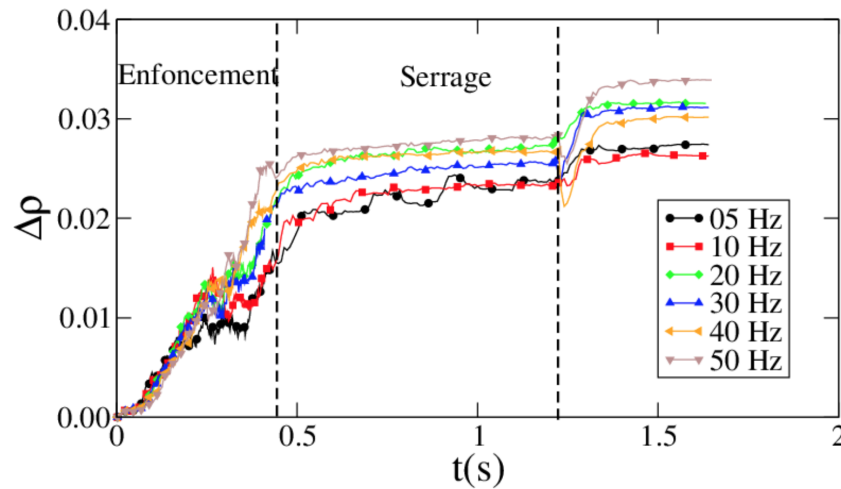


Figura 65: Grado de compactación para las diferentes fases del bateo y con diferentes frecuencias de vibración. Fuente: [35]

La estructura granular responde a la entrada de los bates con la formación de cadenas de fuerzas de gran intensidad en la región debajo de los bates. Esta reacción fluctúa y varía en intensidad sea cual sea la frecuencia de vibración de los bates, aunque, como regla general, se puede decir que la intensidad disminuye con la frecuencia. Además, esta reacción fluctuante lleva a los granos bajo la traviesa a experimentar bloqueos y desbloqueos sucesivos. El análisis de las anisotropías (diferencias en la orientación) de los contactos y las fuerzas debajo de la traviesa no muestra una relación con la frecuencia, y en cualquier caso se observa una marcada disminución en las diferencias de orientación de las fuerzas en el plano vertical.

Estos resultados podrían sugerir la posibilidad de utilizar frecuencias de vibración más altas al introducir los bates, lo que facilitaría su hundimiento en la capa de balasto y mejoraría el grado de compactación en comparación con frecuencias más bajas. Incluso al combinar una frecuencia más alta con una velocidad de hundimiento ligeramente más baja, se lograría una mayor compactación bajo la traviesa.

A medida que se llevaban a cabo las simulaciones del estudio en la fase de apriete, se probaron combinaciones de amplitud y frecuencia de fuerza horizontal del apriete, detectándose en el proceso una serie de fases importantes. La primera que se aprecia está marcada por un fuerte avance, ya que los granos se encuentran muy agitados por la fase de hundimiento de bates anterior. A continuación, se producen ciclos sucesivos de bloqueo (los bates no avanzan), extensión (los bates retroceden) y contracción (los bates avanzan de nuevo). Puede verse una representación de dichas etapas en la Figura 66:

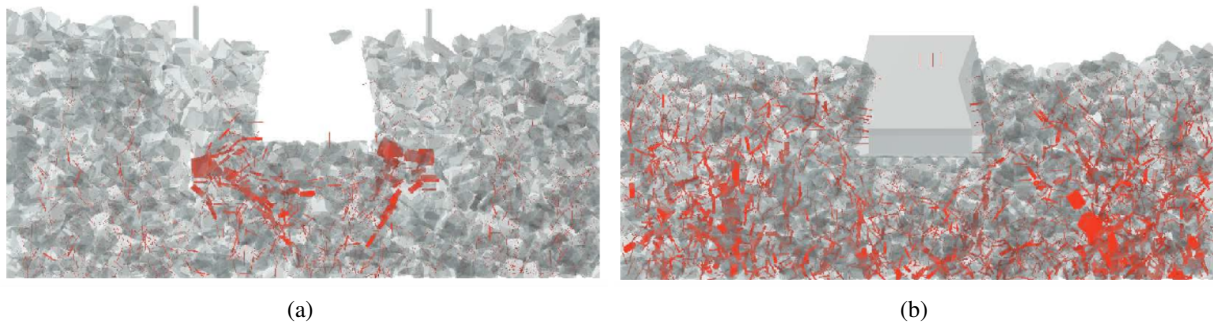


Figura 66: En fase de apriete: (a) Bloqueo. (b) Avance. Fuente: [35]

Si se analiza el fenómeno por ciclos, en cada uno de ellos la amplitud total de la vibración, representada por Δx_{max} , se mantiene constante en general, pero varía de forma inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia cuando la fuerza de extensión de los bates, f_{min} , es pequeña. Se puede observar que la compactación se da con el retroceso de los bates, y por tanto, está condicionada por Δx_{max} siguiendo la siguiente relación: si la frecuencia se mantiene, $\Delta \rho$ aumenta con Δx_{max} . Eso sí, el máximo de $\Delta \rho$ se detecta en el estudio en una de las frecuencias bajas (10 Hz). También se ha observado que en esta etapa, el número de granos en contacto con la traviesa disminuye a medida que pasan los ciclos, lo cual resalta que la amplitud de las vibraciones, en términos de la compactación, puede ser más importante que la frecuencia en sí.

Por último, en la fase de retirada se dan fenómenos de *expulsión* que llevan a la aparición de huecos en la estructura de grano. La compactación bajo la traviesa sufre un pequeño aumento pero disminuyen, por su parte, los granos en contacto, ya que muchos de ellos tienden a ocupar las cavidades que se han formado. Como cabría esperar, esto se hace más patente a mayores frecuencias (cuando la estructura está más cercana a comportarse como un líquido).

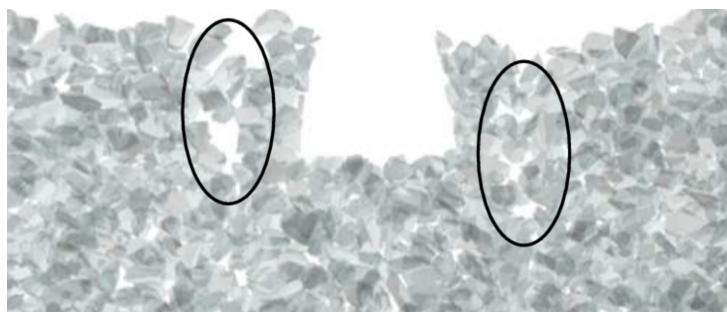


Figura 67: Cavidades observadas tras un ciclo de bateo. Fuente: [35]

Si se trata de analizar las consecuencias del bateo en las vías ferroviarias es primordial poner el foco en las variaciones apreciables desde el punto de vista tensional bajo traviesa. En la microestructura, se

observan disminuciones en la anisotropía de fuerzas normales si se compara el estado tensional inicial y final. Resulta ser la penetración de los bates en el balasto la causante de estas variaciones.

En una primera aproximación, los fenómenos dinámicos que ocurren durante el bateo pueden ser analizados mediante simplificaciones. Estas simplificaciones se basan en el estudio de la respuesta mecánica del material en reposo, conocido como reología cuasiestática, y en el efecto de la forma de los objetos involucrados y las vibraciones en la capa de balasto. A este respecto, resulta interesante continuar analizando los estudios de [35], ya que en ellos se analizan en detalle dos aspectos clave del bateo a través de simplificaciones y simulaciones de la penetración de un bate o el comportamiento de un material granular confinado bajo el influjo de vibraciones.

Centrándonos en el estudio de penetración, se trató de replicar el hundimiento de una estaca vibrante en capa de balasto (modelada con granos poliédricos) a través de la simulación 3D. La conclusión directa más importante que se pudo extraer de esto es que el movimiento de hundimiento de la estaca se puede descomponer en dos fases fuertemente diferenciadas.

En la primera etapa, la estaca penetra en un medio granular que está en constante agitación, ya sea debido a las vibraciones generadas por la estaca misma (si la fuerza de penetración es débil) o debido al impacto brusco de la estaca con el medio granular (si la fuerza es excesiva). En ambos casos, la profundidad alcanzada por la estaca depende únicamente de la fuerza aplicada. En la segunda, el sistema reacciona a la acción externa generando un movimiento difusivo en la estaca. Cuando la fuerza de penetración es débil, la frecuencia de vibración no tiene un efecto significativo en la respuesta promedio del sistema, aunque localmente pueden aparecer efectos dependientes de la frecuencia debido a la distribución de esfuerzos. Por otro lado, cuando la fuerza de penetración es considerable, el sistema vuelve a mostrar una respuesta promedio independiente de la frecuencia.

Otro de los estudios que se dio de manera simultánea estaba basado en el análisis de la dinámica vibratoria de un sistema granular confinado con simulaciones tanto 2D como 3D, persiguiendo detectar el efecto de la fase de apriete en el grado de compactación del balasto. Se observa que los ciclos de bloqueo, extensión y retracción se suceden de forma idéntica en cada ciclo global de bateo. Al comenzar una fase activa de la respuesta dinámica (la fase de extensión) se aprecia una compactación, directamente seguida de una descompactación de poco calado en la fase pasiva (retracción); aunque de forma global la ganancia de compactación se hace evidente. De hecho, en el caso 3D, se puede detectar ese máximo de compactación entorno a los 10 Hz de frecuencia, comentado con anterioridad.

3.4.3. Caracterización de la magnitud vibratoria en la capa de balasto

Con todo lo comentado hasta el momento, ya es posible tratar de caracterizar las magnitudes vibratorias, con vista a futuras modelizaciones del lecho de balasto. Para plantear una variación en los materiales o composición de la estructura granular, serán necesarias simulaciones y modelizaciones para las cuales resultará primordial conocer los estados vibratorios que se darán con el paso de los trenes de alta velocidad.

Durante la década de los 60, con intenciones de caracterizar y cuantificar la afección experimentada por la capa de balasto si las velocidades de circulación superaban los 200 km/h (caso que nos ocupa y tremendamente frecuente a partir de aquellos años), empezaron a surgir los primeros estudios enfocados en la determinación de la intensidad vibratoria y su frecuencia, y como ésta afectaba al comportamiento de la vía. Las primeras conclusiones apuntaban hacia la relación existente entre la velocidad de circulación de los trenes y la intensidad de vibración del balasto, comentada con anterioridad en el presente Trabajo de Fin de Máster. Esto respaldaba las investigaciones llevadas a cabo por Birmann, que señalaban que cuando los trenes de alta velocidad pasaban, la capa de balasto experimentaba una carga alternativa transmitida a través de las traviesas, generando vibraciones a frecuencias elevadas.

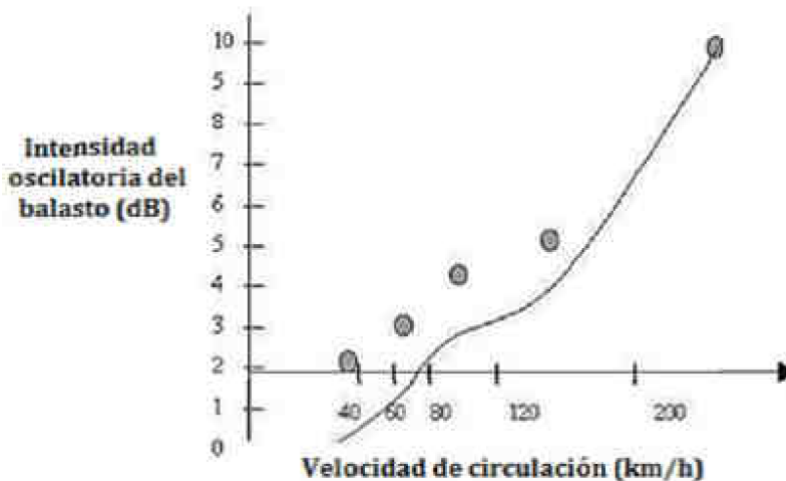


Figura 68: Variación de la intensidad de oscilación del balasto con la velocidad. Fuente: [37]

No fue hasta 1977 cuando los investigadores Katoh y Karegawa observaron, mediante mediciones precisas en la línea Shinkansen de Tokaido (que ya, por aquel entonces, alcanzaba velocidades de hasta 200 km/h), que la calidad del balasto en dicha línea se deterioraba rápidamente, lo que requería un mayor mantenimiento. En esos estudios, se tomaron medidas de los niveles de vibración en diferentes puntos del recorrido, y se descubrió que, en general, se mantenían constantes entre 0,3g y 0,6g para velocidades de hasta 210 km/h. Sin embargo, en algunas áreas de plataforma rígida, como el túnel Rokko,

las aceleraciones en la capa de balasto alcanzaban valores entre 1g y casi 2g para velocidades entre 175 km/h y 208 km/h. [38]

En cuanto a los primeros estudios franceses sobre las aceleraciones detectadas en la capa de balasto debido a la circulación de trenes a alta velocidad, se hace referencia a las mediciones realizadas por Prud'homme a diferentes velocidades, mostradas en el Cuadro 7:

Material locomotor	Velocidad (km/h)	Aceleración media en el carril	Aceleración media en la traviesa	Aceleración media en el balasto
CC650	140	200g	12g	0.8g
TGV	140	300g	15g	0.88g
	245	360g	15g	1.4g
	300	350g	16g	1.4g

Cuadro 7: Aceleraciones medidas al paso de trenes CC 6500 Locomotive y TGV. Fuente: [37]

Analizando dichos resultados se puede destacar el hecho de que a 300 km/h la aceleración en la capa de balasto es prácticamente el doble que a 140 km/h, mientras que las medidas tomadas en el rail y la traviesa no sufren aumentos de esa índole. Además, es fácil entender que el parámetro más importante de estudio debería ser el de la aceleración en la capa de balasto, puesto que el aumento de ésta podría causar un mayor desgaste en el balasto y por lo tanto también el de los costes de conservación. [38]

Con el fin de llevar a cabo una óptima cuantificación de la magnitud de vibración en la capa de balasto cuando circulan trenes a alta velocidad, se han consultado estudios más recientes. Un estudio destacable es el llevado adelante por Le y Rypke en el año 2000 (y analizado a posteriori por Pita en [1]), en el cual tomaron medidas de la aceleración R.M.S. en la capa de balasto (diferentes profundidades y velocidades de circulación desde 250 km/h hasta 330 km/h). Los resultados de los ensayos pueden verse en Figura 69. Se aprecia que los máximos de vibración se dieron al alcanzar los 80 cm de profundidad. Este punto coincidía con la capa de subbalasto, justo encima de la plataforma. Los máximos, al mirar la aceleración media, se comprobó que oscilaban entre $1,4 \text{ m/s}^2$ y 2 m/s^2 (entorno a 0,2g), sin representar esto un problema importante para la circulación.

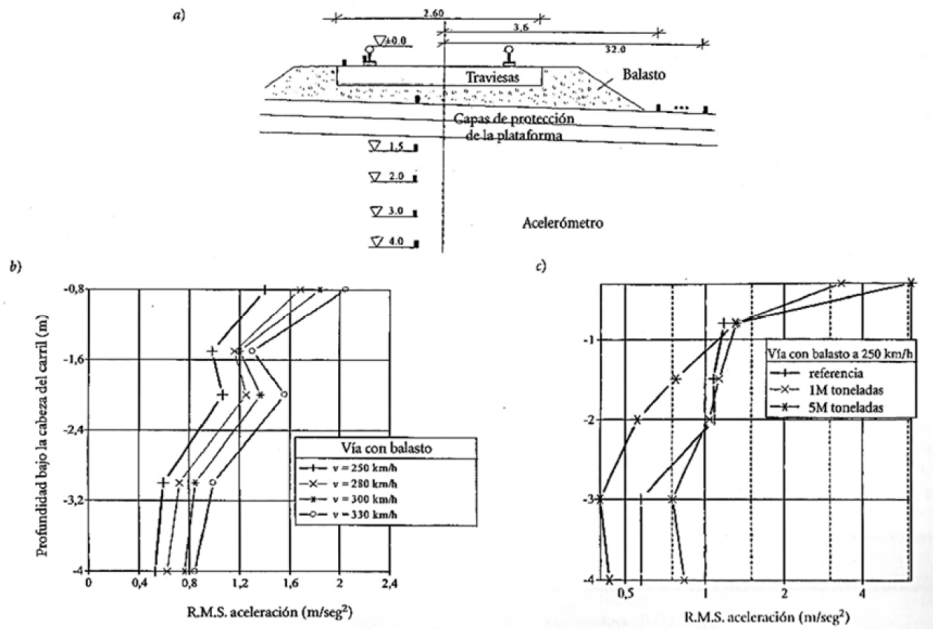


Figura 69: a) Profundidades de los puntos de medida de la aceleración. b) Medidas de vibraciones registradas en la línea Hannover-Berlín para los puntos mostrados en a). Fuente: [1]

Otro estudio relativamente reciente que se va a analizar y que también fue comentado por Pita en [1] se trata del llevado adelante por Eissenmann y Rump (1997). Estos dos autores adoptaron un enfoque diferente al analizar las causas del deterioro de la geometría de las líneas de alta velocidad en Alemania, identificando por su parte la velocidad de vibración de las partículas como el factor más significativo de los efectos observados en el balasto debido a vibraciones. Ambos detectaron la fuerte superioridad (del orden 4 veces) de la componente vertical sobre longitudinal o transversal, además de encontrar una relación directa entre velocidad de tren y vibración de partículas, o incluso entre la carga por eje y la velocidad (Figura 70).

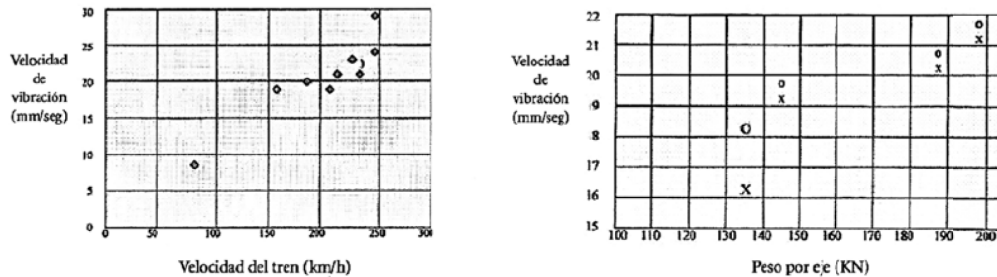


Figura 70: Velocidad de vibración en el balasto. Izquierda: influencia de la velocidad de circulación. Derecha: influencia del peso por eje del vehículo. Fuente: [1]

Por su parte, y con el fin de obtener resultados que pudieran aplicarse en el diseño y mantenimiento de la vía, Man-Cheol llevó a cabo otro importante estudio, reflejado en su *Analysis on Factors Affecting the Acceleration of the Ballasted Track in Kyong-Bu High Speed Line* [39], consistente en la medición de las aceleraciones en el balasto, los carriles y las traviesas, y el posterior análisis de la correlación entre estas aceleraciones y los parámetros que afectan a la vía. Dicho análisis se realizó en la línea de alta velocidad Kyong-Bu.

Poniendo atención en los resultados del comportamiento del balasto, se pudo comprobar que los valores de aceleración eran más pequeños bajo las traviesas que entre ellas. Los rangos de frecuencia más frecuentes en dicho balasto por la velocidad de trenes sobre la vía resultaron encontrarse entre 20-25 Hz y 63-80 Hz.

La velocidad de vibración del balasto medida en la línea Kyong-Bu de alta velocidad, por su parte, resultó ser de 8-10 mm/s². Esta vibración es similar a la vibración del balasto causada por la circulación del tren modelo ICE alemán (V=250 km/h), cuyo valor máximo en velocidad de vibración es 8 mm/s siendo 500 kN/mm la rigidez de la placa de asiento; y del que se comentan resultados con anterioridad a lo largo de este Trabajo.

Esta investigación llega a la conclusión de que los factores que influyen en la vibración de cada componente se pueden clasificar en dos categorías: aquellos asociados al vehículo y aquellos relacionados con la vía. Los factores del vehículo incluyen la carga por eje, el perfil de la rueda y la velocidad de circulación. Por otro lado, los factores vinculados a la vía abarcan la variación del perfil longitudinal, la rigidez de las almohadillas, el tipo de balasto y las características de la plataforma.

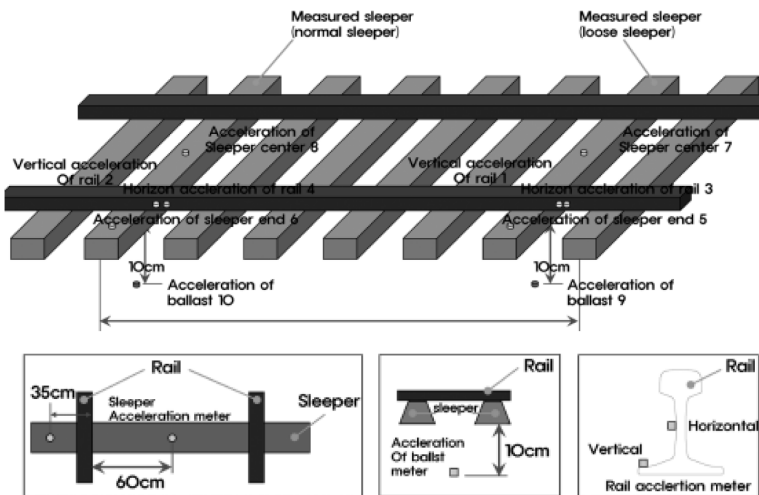


Figura 71: Esquema de los puntos de medición en la vía. Fuente: [39]

El último estudio comentado en este análisis es el de Zhai et al. reflejado en *Modelling and experiment of railway ballast vibrations* [40], en el cual se desarrolló un método de modelado de la vibración de balasto en base a cinco parámetros y a la hipótesis de que la transmisión de la carga a la capa de balasto coincidía con una distribución en forma de cono (Figura 72):

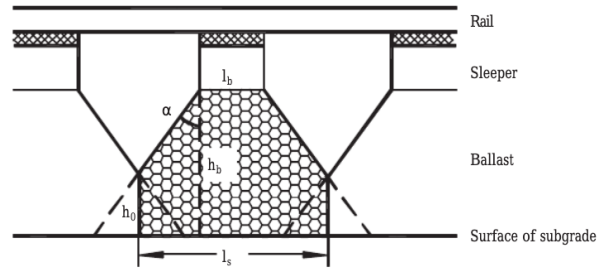


Figura 72: Hipótesis de transmisión de carga con modelado en forma de cono. Fuente: [40]

En el ensayo se realizaron, además, experimentos in situ de gran envergadura en la línea ferroviaria Chengdu-Kunming (suroeste de China) para medir las vibraciones en el balasto y verificar así el modelo expuesto. El banco de pruebas estaba constituido por carriles soldados continuos de 60 kg/m (UIC-60), placas de asiento tipo 60-11 bajo los carriles, y 69 traviesas de hormigón monobloque, con espesor de la capa de balasto de 450 mm.

Para determinar la aceleración experimentada por las partículas de balasto, se colocó un acelerómetro en el interior de dicho medio granular. Para evitar posibles daños en el acelerómetro, debido al contacto directo con las piedras de balasto, éste se introduce en una caja diseñada para tal fin. El tamaño de dicho recipiente es similar al de una piedra media de balasto, con el fin de mantener la configuración de original del lecho granular. Esto es importante para que las mediciones del nivel de vibración sean lo más aproximadas a las reales.

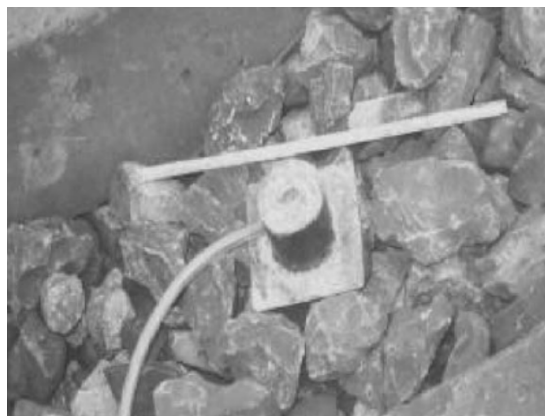


Figura 73: Modo de colocación del acelerómetro en la capa de balasto. Fuente: [40]

Se midieron las respuestas dinámicas de las aceleraciones de balasto excitado por la circulación de los trenes. En la Figura 74 se muestra un registro de las aceleraciones (en g) medidas cuando un tren de pasajeros, circulando a 90 km/h, atravesaba la sección de pruebas. Se detecta una obvia vibración por impacto debida a la carga por eje. La comparación entre simulación teórica mediante modelos numéricos y resultados medidos fue satisfactoria. Esto lleva a pensar que el modelo de vibración del balasto es válido.

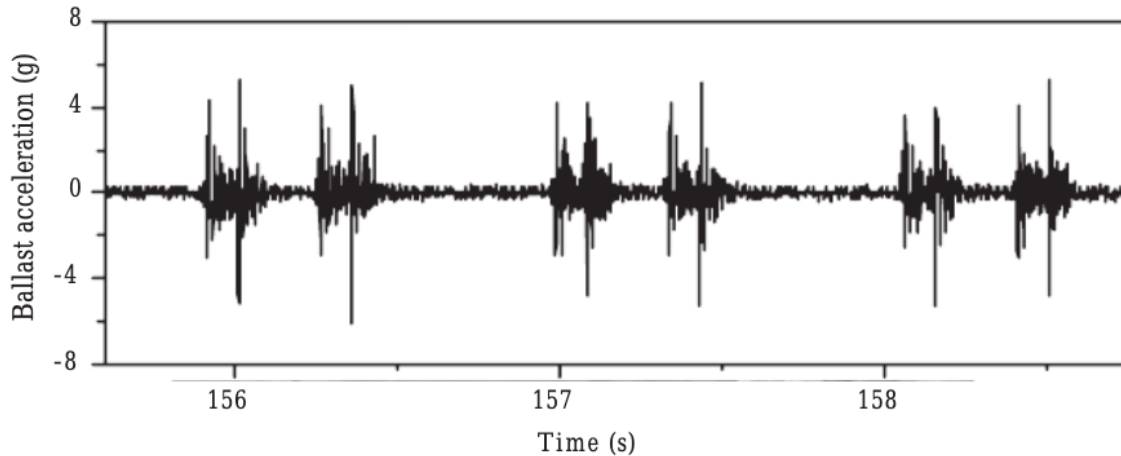


Figura 74: Respuesta de aceleración del balasto debido al paso del tren por la sección de pruebas. Fuente: [40]

Los resultados del banco de pruebas concluyeron que el balasto vibra en el rango 80-110 Hz. El efecto de la fricción y el impacto de piedras de balasto inducen un contra-movimiento en las piezas adyacentes. Por lo tanto, la capa de balasto puede vibrar de manera libre. Este estudio concluye que los parámetros de cizallamiento de las partículas de dicho medio granular tienen gran influencia en el comportamiento dinámico de vía y muestran una gran dependencia con la estructura de la capa.

4. Conclusiones y desafíos actuales

El presente Trabajo de Fin de Máster ha resultado útil para conocer el punto aproximado en el que se encuentra la problemática del vuelo de balasto y poder, a partir de estas bases, desarrollar futuras soluciones. Conocer el estado del arte y los estudios realizados con anterioridad son un punto fundamental en el planteamiento de un proyecto de estas dimensiones, ya que llevan a un punto de partida de mayor solidez. Sin conocimientos, por ejemplo, sobre las solicitaciones vibratorias que afectan a una vía con el paso de un ferrocarril resultaría imposible plantear una alternativa al balasto tradicional para solucionar el vuelo.

La primera de las conclusiones extraídas prácticamente en las primeras páginas de este Trabajo, aunque obvia, es inevitable de comentar. El vuelo de balasto, por la estructura de vía y los materiales que componen la capa en la actualidad, es un **problema inevitable** con el paso de cargas a gran velocidad. Este hecho convierte en casi una obligación la búsqueda de alternativas para mejorar la estabilidad y durabilidad de los trenes.

Aunque la estructura de los análisis planteada diferenciaba entre ensayos in-situ, en túnel aerodinámico, a través de elementos discretos y con CFD, en realidad el grosso del estudio se basaba principalmente en seis ensayos (Kaltenbach et al.[2], Quinn & Howard [3], Kwon & Park [4], Deeg et al. [5], Lázaro & González [6] e Ido et al. [7]), de los cuales se han podido extraer las siguientes conclusiones de vital importancia para caracterizar el vuelo de balasto:

- Desde el punto de vista del tren, los factores principales de los que depende el vuelo de balasto son las **características geométricas y aerodinámicas** de la máquina (en especial, la distancia de sus bajos hasta la capa de balasto y su rugosidad, y la forma que presentan cabeza, cola y bogies del tren, entre otros elementos). En cuanto a las piedras de balasto, son su **tamaño, peso y/o forma** los parámetros fundamentales para discernir la ocurrencia o no del fenómeno.
- El análisis de **estudios in situ** empuja a afirmar que la velocidad inducida al flujo que se produce entre los bajos de la máquina y la capa de balasto ronda el $0.4 V_{tren}$. Además, poder comprobar la fuerte turbulencia de dicho flujo generado justifica la elevada energía adquirida por este y, por tanto, la alta probabilidad de apariciones de nubes de balasto. [2] [3]

Sumado a todo esto, en [3] se muestran los problemas generados por el **ballast pitting** y la importancia que puede tener de cara al estudio de una alternativa futura. Se detecta que, debido a este fenómeno, experimentado por la cabeza del carril, el flujo de viento sobre la vía combinado con las corrientes de aire generadas por el paso de los coches que componen el tren, provocaba sobre la superficie de la cama de balasto fuertes fluctuaciones de presión, generando un mecanismo potencial para el transporte de partículas de balasto hacia la cabeza del carril donde son aplastadas

por el paso del vehículo. Evidentemente es un hecho que debe paliarse si se quiere mantener la geometría y estabilidad del vehículo. [3]

- De los estudios que enfocan el problema a través de la **modelización DEM**, se sacan conclusiones sobre la obvia **relación directa entre velocidades de paso del tren y la cantidad de piedras de balasto desplazadas**. Teniendo en cuenta que se busca enfocar la solución variando la composición del balasto o la geometría del tren y en ningún caso la velocidad de este, las conclusiones no resultan prácticas en condiciones normales de explotación del servicio ferroviario, pero sí lo serán en situaciones de **explotación condicionada por nieve**. Lo extraído de este estudio, por tanto, será especialmente aplicable si se va a implantar la solución planteada en líneas con condiciones meteorológicas adversas. [16]
- Poniendo el foco en **la influencia que la geometría de la vía y del material rodante**, en [4] se concluye que la perturbación inducida por los **bogies y por el hueco entre coches** es la principal responsable de la generación del elevado flujo bajo la máquina. Por su parte, en [6], además de corroborarse dicha afirmación, se plantea que la región de flujo cerca del lecho de balasto se asemeja a un flujo con **perfil logarítmico** que se caracteriza por una **velocidad de fricción cercana a $0.06 V_{tren}$** y una **rugosidad equivalente** dependiente de la posición relativa del tren.
- Los **estudios en túnel aerodinámico** confirman que la acción del flujo sobre la capa de balasto se puede minimizar suavizando formas (tanto en los propios bajos como en líneas generales, cabeza y cola) y creando los **perfiles** y los bajos del tren más **aerodinámicos** [7]. De hecho, en [14], se llega a afirmar que la modificación de la geometría del morro delantero conlleva una **variación del coeficiente de arrastre de alrededor de un 14.4 %** (siendo este coeficiente primordial para entender la resistencia que dicho morro opone contra el viento). En este sentido, los estudios realizados con el empleo de **técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD)**, a partir del análisis de las simulaciones realizadas concluyen que, la turbulencia se incrementa en la zona de los bogies, siendo las velocidades y las turbulencias más altas justo detrás de los bogies. Este hecho confirma la teoría de que el flujo generado en esta zona es el principal causante del vuelo de balasto. [20] [21][22]
- Aunque se detecta un aumento del vuelo de balasto con las fuerzas dinámicas del tren, este **disminuye con el tamaño, peso y coeficiente de fricción del balasto**. La velocidad crítica a partir de la que se da el vuelo en piedras esféricas y de poca masa es bastante menor que en los casos poliédricos más pesados [19]. Todo esto, de hecho, confirma la motivación del presente Trabajo: **aumentar la densidad de las partículas de balasto** lleva directamente a la disminución del vuelo.
- La **aparición de movimiento en las partículas de balasto** resulta ser **condición necesaria pero no suficiente** para que se produzca el fenómeno del levantamiento de balasto. Es decir, las piedras de balasto deben alcanzar un nivel de energía cinética suficiente como para que se produzca su

proyección y sólo si la intensidad y las rachas de flujo son lo suficientemente elevadas, las partículas de balasto adquieren la suficiente energía para contrarrestar el efecto de las fuerzas gravitatorias consiguiendo la continuación del movimiento (movimiento exitoso).

- De varios de los estudios comentados permiten caracterizar las fases por las que pasa el balasto hasta su vuelo: **inducción, transporte superficial, vuelo, impacto y post-impacto**. El conocimiento de estas fases resultará muy importante a la hora de modelizar y simular nuevas alternativas de materiales para la capa.

Por otra parte, el **estudio vibratorio de vías de balasto** también ha arrojado luz sobre algunos factores a tener en cuenta en futuros estudios:

- Existen **diversas fuentes de excitación en el transporte ferroviario**, que pueden afectar de manera muy significativa a la estabilidad y comportamiento de la vía, y en particular al balasto, como elemento importante en la infraestructura ferroviaria.
- Dentro de dichas excitaciones, las **labores de bateo de vía** son las que generan mayores problemas por tratarse de las sollicitaciones vibratorias de mayor magnitud.
- El hecho de plantear como solución de futuro la implementación de, por ejemplo, un nuevo **balasto artificial a base de hormigón pesado** u otro material de mayor densidad, llevaría a la necesidad de evaluar su comportamiento ante las diferentes excitaciones expuestas. Conocerlas, por tanto, es un paso fundamental en el estudio.

En tareas posteriores y como **futuras líneas de acción**, se plantea comenzar con un riguroso **estudio de selección del material sustitutivo** y continuar con la realización de un **modelo de elementos discretos (DEM)** con tal de analizar el comportamiento de las partículas ante diferentes hipótesis de excitación. Una de las simulaciones más importantes será la **modelización del bateo de la vía**, ya que se ha podido comprobar su importancia a través de los estudios analizados.

De esta manera, a través del modelo DEM, se plantean como otras líneas futuras de acción posteriores la determinación de:

1. El flujo de partículas que se producirá al aplicar una vibración excitadora. Estudio en términos de amplitud y frecuencia.
2. La segregación que podría darse como consecuencia de la colocación de piedras de balasto artificial más pesado que el balasto natural.
3. Las posibles afecciones de estas vibraciones sobre dichas partículas.

Parte II
ODS

II ODS

1. Anexo al Trabajo de Fin de Máster: Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos de Desarrollo Sostenible	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.		X		
ODS 4. Educación de calidad.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.		X		
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.			X	
ODS 12. Producción y consumo responsables.				X
ODS 13. Acción por el clima.				X
ODS 14. Vida submarina.				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos				X

Cuadro 8: Objetivos de desarrollo sostenible.

Los ODS con un grado más alto de relación con el presente Trabajo de Fin de Máster son:

- **ODS 3. Salud y bienestar (Grado medio):** Al tratarse de un proyecto que busca sentar unas bases para un futuro desarrollo de alternativa al balasto, se pronostica que la existencia de un material menos propenso al vuelo se traduciría en menores accidentes en el ámbito ferroviario.
- **ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico (Grado medio):** Se puede pronosticar también un desembolso económico importante a futuro de prosperar las propuestas posteriores.
- **ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras (Grado alto:)** Por la naturaleza del proyecto, tiene un fuerte valor en este ámbito.

Parte III

PLIEGO DE CONDICIONES

III Pliego de condiciones

1. Objetivo

Sirva este documento como Pliego de Condiciones del presente proyecto, albergando las condiciones de tipo técnico, económico, normativo, laboral y administrativo que deben tenerse en cuenta de cara a la conclusión satisfactoria del mismo.

En el caso que nos ocupa, al tratarse de un Trabajo de Fin de Máster fundamentalmente bibliográfico, se dedica un apartado a detallar las condiciones y especificaciones referentes al software utilizado y otro a desglosar los factores determinantes del ambiente de trabajo en el que se ha llevado a cabo el proyecto.

2. Condiciones del Software

2.1. Software empleado

El software utilizado para la realización del presente Trabajo de Fin de Máster está constituido fundamentalmente por:

MICROSOFT OFFICE 365:

Microsoft Office 365 es una solución integral de software que permite a los usuarios acceder a una variedad de aplicaciones y servicios de Microsoft en la nube. Esta suite incluye aplicaciones populares como Word, Excel, PowerPoint, Outlook, OneNote, Publisher y Access, así como servicios en línea como OneDrive, SharePoint, Teams, Exchange Online, etc. Office 365 se basa en el modelo de suscripción, lo que significa que los usuarios pueden acceder a las últimas versiones de las aplicaciones y recibir actualizaciones regulares mientras mantienen su licencia activa.

Especificaciones de hardware: Para utilizar Microsoft Office 365 de manera efectiva, es importante contar con un hardware adecuado que cumpla con los requisitos mínimos. Si bien los requisitos exactos pueden variar según las aplicaciones específicas de Office y las necesidades del usuario, a continuación se detallan las especificaciones generales recomendadas:

- **Procesador:** Se recomienda un procesador de al menos 1,6 GHz o superior, preferiblemente de doble núcleo.
- **Memoria RAM:** Se sugiere un mínimo de 4 GB de RAM para un rendimiento óptimo.
- **Espacio de almacenamiento:** Se debe disponer de al menos 4 GB de espacio libre en el disco duro para la instalación y almacenamiento de archivos.

- **Pantalla:** Se recomienda una resolución mínima de 1280x800 para una visualización adecuada de las aplicaciones de Office.
- **Sistema operativo:** Office 365 es compatible con las versiones más recientes de Windows y macOS. Se recomienda utilizar versiones compatibles de los sistemas operativos para asegurar una funcionalidad completa y recibir actualizaciones de seguridad.

Limitaciones: Aunque Microsoft Office 365 ofrece una amplia gama de características y beneficios, es importante tener en cuenta algunas limitaciones potenciales al utilizar esta suite de productividad:

- **Conexión a Internet:** Dado que Office 365 se basa en la nube, se requiere una conexión a Internet estable y de alta velocidad para acceder a las aplicaciones y servicios en línea. Sin una conexión a Internet, las funcionalidades avanzadas y las actualizaciones en tiempo real pueden estar limitadas o no disponibles.
- **Suscripción activa:** Office 365 funciona mediante un modelo de suscripción, lo que implica que los usuarios deben mantener su licencia activa para acceder a las últimas versiones y actualizaciones. En caso de que no se renueve la suscripción, es posible que algunas funciones no estén disponibles.
- **Dependencia de la nube:** Al utilizar Office 365, los documentos y archivos se almacenan en la nube, lo que implica una dependencia de los servicios en línea. Si se experimentan problemas con la conectividad o los servidores de Microsoft, el acceso y la edición de los archivos pueden verse afectados.
- **Personalización limitada:** A diferencia de las versiones locales de las aplicaciones de Office, las opciones de personalización en Office 365 pueden estar más limitadas. Algunas características avanzadas y ajustes personalizados pueden no estar disponibles en la versión en línea.

OVERLEAF:

Overleaf es una plataforma en línea que permite a los usuarios crear, editar y colaborar en documentos científicos y académicos utilizando el lenguaje de marcado LaTeX. En su versión de pago Standard, Overleaf ofrece características adicionales y una experiencia mejorada en comparación con la versión gratuita. Algunas de las características destacadas de Overleaf Standard incluyen la capacidad de colaborar con un número ilimitado de colaboradores, control de versiones avanzado, acceso a plantillas personalizadas, integración con servicios en la nube y soporte técnico prioritario.

Especificaciones de hardware:

- **Procesador:** Se recomienda un procesador de al menos 1,6 GHz o superior, preferiblemente de doble núcleo.
- **Memoria RAM:** Se sugiere un mínimo de 4 GB de RAM para un rendimiento óptimo al compilar documentos LaTeX más grandes o complejos.
- **Espacio de almacenamiento:** Overleaf es una plataforma en línea, por lo que no se requiere un espacio de almacenamiento local significativo. Sin embargo, se recomienda contar con un espacio de almacenamiento adecuado en el disco duro para guardar los archivos LaTeX y otros archivos relacionados.
- **Navegador web:** Overleaf es compatible con una amplia gama de navegadores web modernos, como Google Chrome, Mozilla Firefox, Safari y Microsoft Edge. Se recomienda utilizar la versión más reciente del navegador preferido para una experiencia óptima.

Limitaciones:

- **Conexión a Internet:** Dado que Overleaf es una plataforma en línea, se requiere una conexión a Internet estable para acceder a la plataforma y colaborar con otros usuarios. Sin una conexión a Internet, el acceso y la edición de documentos pueden verse limitados.
- **Dependencia de servicios en línea:** Overleaf utiliza servicios en línea para compilar y visualizar los documentos LaTeX. En caso de que haya problemas con los servidores de Overleaf u otros servicios en línea, la compilación y visualización de los documentos pueden verse afectadas.
- **Plantillas personalizadas:** Aunque Overleaf Standard permite acceder a plantillas personalizadas, la creación de plantillas personalizadas puede requerir conocimientos técnicos adicionales de LaTeX y el formato de plantilla específico de Overleaf.

2.2. Hardware empleado

El hardware utilizado corresponde con el ordenador portátil **HP Pavilion Plus 14-eh0009ns**. Las especificaciones del mismo son las siguientes:

- **Procesador:** Cuenta con un procesador AMD Ryzen 5 5600H de 6 núcleos y 12 hilos, con una frecuencia base de 3,3 GHz y una frecuencia máxima de 4,2 GHz.
- **Memoria RAM:** Viene con 8 GB de memoria RAM DDR4-3200, lo que permite un buen rendimiento en la ejecución de aplicaciones y la gestión de múltiples tareas. Además, ofrece la posibilidad de ampliar la memoria RAM en caso de ser necesario.
- **Almacenamiento:** Cuenta con una unidad de estado sólido (SSD) de 512 GB de capacidad.

- **Pantalla:** Dispone de una pantalla de 14 pulgadas con resolución Full HD (1920x1080 píxeles). La pantalla ofrece una calidad visual nítida y colores vibrantes.
- **Tarjeta gráfica:** Incorpora una tarjeta gráfica integrada AMD Radeon Graphics.
- **Conectividad:** Cuenta con varias opciones de conectividad, incluyendo puertos USB tipo A y USB tipo C, un puerto HDMI para conectar a monitores externos o televisores, un lector de tarjetas SD, así como conexión inalámbrica Wi-Fi y Bluetooth para facilitar la conectividad a internet y dispositivos periféricos.
- **Sistema operativo:** Viene preinstalado con el sistema operativo Windows 10 Home de 64 bits.
- **Batería:** Cuenta con una batería de 3 celdas que ofrece una duración promedio de uso de hasta 8 horas, dependiendo del uso y la configuración del sistema.

3. Condiciones de trabajo

En el marco de este Trabajo de Fin de Master, se establecen las siguientes condiciones de realización considerando que el proyecto ha sido desarrollado en el domicilio particular del estudiante responsable:

1. **Espacio de trabajo:** El estudiante se responsabilizó de proporcionar un entorno adecuado en su domicilio para llevar a cabo el trabajo de investigación y desarrollo del proyecto. Se garantizó en todo momento un espacio tranquilo, bien iluminado, con una temperatura ambiente agradable y libre de distracciones que permitió la concentración necesaria para realizar las tareas requeridas.
2. **Equipamiento y conectividad:** El estudiante contó con el equipamiento necesario para llevar a cabo el proyecto de manera efectiva. Esto incluye un ordenador o portátil con las especificaciones adecuadas para ejecutar el software y las herramientas requeridas, así como una conexión a Internet estable y de calidad que permitiera la comunicación y el acceso a los recursos en línea necesarios para el desarrollo del proyecto.
3. **Gestión de tiempos:** El estudiante estableció un plan de trabajo y gestionó su tiempo de manera efectiva para cumplir con los plazos establecidos para la realización del proyecto. Se esperaba que se dedique un número de horas adecuado a la investigación, desarrollo y redacción del Trabajo de Fin de Master, teniendo en cuenta las fechas límite establecidas por la institución académica y todo se llevó a cabo de forma satisfactoria.
4. **Supervisión y seguimiento:** El estudiante estuvo sujeto a la supervisión y seguimiento por parte de la tutora asignada por la institución académica. Se acordaron reuniones periódicas en línea, para revisar el progreso del proyecto, discutir cualquier problema o duda, y recibir orientación y retroalimentación.

5. **Cumplimiento de normativas y ética:** El estudiante cumplió con todas las normativas y políticas establecidas por la institución académica, así como con los principios éticos y de integridad académica.
6. **Entrega de resultados:** El estudiante se responsabilizó de entregar el Trabajo de Fin de Master de acuerdo con los plazos establecidos y los requisitos formales especificados por la institución.

Estas son las condiciones de realización del Trabajo de Fin de Master considerando que el proyecto ha sido desarrollado en el domicilio particular del estudiante responsable. Todas las condiciones han sido seguidas por dicho alumno en todo momento.

Parte IV

PRESUPUESTO

IV Presupuesto

1. Consideraciones previas

El desglose económico de un proyecto es uno de los puntos fundamentales a la hora de concretar y asegurar la viabilidad del mismo. Al tratarse, en este caso, de un proyecto de concreción de estado del arte puramente bibliográfico, el grueso del presupuesto debe ir destinado a software, licencias y factor humano (principalmente sueldos de los implicados).

Si se trata de contabilizar horas, deben hacerse una serie de suposiciones. Teniendo en cuenta una jornada laboral de 8 horas y una duración del proyecto de 5 meses (desde Febrero hasta Julio), eliminando las festividades (únicamente Nacionales al encontrarse los miembros del proyecto en diferentes partes del país durante su realización), se puede afirmar que el número de días laborables aproximado empleados en el proyecto es de 104 días. Conocidas las horas diarias y los días empleados se pueden estimar las horas laborables empleadas en el proyecto a través de la siguiente expresión:

$$104 \frac{\text{día}}{\text{proyecto}} \cdot 8 \frac{\text{h}}{\text{día}} = 832 \frac{\text{h}}{\text{proyecto}} \quad (18)$$

Por otra parte, y teniendo en cuenta que no se han dedicado jornadas laborales completas a dicho proyecto, el reparto de tiempo aproximado dedicado a cada tarea podría hacerse del siguiente modo:

- **30 horas** de Tutorías
- **20 horas** de Familiarización con software
- **150 horas** de Búsqueda Bibliográfica
- **200 horas** a Redacción y Realización del Proyecto

El total de horas, por tanto, sería de **400 horas**.

2. Desglose y cálculo de costes unitarios

A continuación, se desglosa el coste que ha supuesto cada fuente de gasto en la elaboración del proyecto, además de justificar la elección de los diferentes costes unitarios elegidos.

EQUIPO INFORMÁTICO UTILIZADO:

El equipo utilizado constaba de un ordenador portátil de reciente adquisición para la realización del propio proyecto (HP Pavilion Plus 14-eh0009ns) cuyo precio fue de **1340 €** en Marzo de 2023. Por la vigencia del equipo, no resulta de interés calcular una posible depreciación del mismo, pero sí se puede tener en cuenta la depreciación del equipo por su propio uso en los 5 meses que duró el proyecto.

Si se estima la devaluación anual en un 20 % (268 €/año), la depreciación del activo queda de la siguiente manera:

$$\frac{268\text{€/año}}{400\text{h/año}} = 0,67\text{€/h} \quad (19)$$

SOFTWARE:

- **Microsoft Office 365:** El precio de su versión Personal actualmente es de 69 €/año. Teniendo en cuenta las horas totales empleadas (400), el coste por hora de la licencia sería de:

$$69 \frac{\text{€}}{\text{año}} \cdot \frac{\text{año}}{8760\text{h}} = 0,0079\text{€/h} \quad (20)$$

- **Overleaf:** A pesar de tratarse de un Software de edición online con opción gratuita, para este proyecto se adoptó el plan Standard con un precio de 179 €/año. Siguiendo el mismo razonamiento que en la ecuación anterior:

$$179 \frac{\text{€}}{\text{año}} \cdot \frac{\text{año}}{8760\text{h}} = 0,02\text{€/h} \quad (21)$$

MATERIAL DE OFICINA:

El presupuesto para material de oficina se reparte entre papel, bolígrafos, fotocopias y una silla de escritorio. El total es de **75 €**.

PERSONAL CUALIFICADO:

Tutor. Supuesta una retribución mensual aproximada para un profesor ordinario o catedrático de universidad con dedicación exclusiva de **2500 €/mes** y un mes laborable de 160 horas:

$$2500 \frac{\text{€}}{\text{mes}} \cdot \frac{\text{mes}}{160\text{h}} = 15,627\text{€/h} \quad (22)$$

	Tiempo [horas]	Tasa horaria [€/h]	Importe bruto [€]	IVA (21%) [€]	Importe final [€]
Ordenador (fijo)			1340	(incluido)	1340
Ordenador (uso)	400	0,67	268	-	268
Microsoft Office 365	60	0,0079	0,474	-	0,474
Overleaf Standard	140	0,02	2,8	-	2,8
Material de oficina (fijo)			75	15,75	90,75
Sueldo tutor	50	15,625			781,25
					2483,27

Cuadro 9: Presupuesto económico del proyecto.

Por lo tanto, el presupuesto total del proyecto asciende a la cantidad de:

DOSMIL CUATROCIENTOS OCHENTA Y TRES EUROS CON VEINTISIETE CÉNTIMOS
(2483,27 €)

Parte V

REFERENCIAS

1. Referencias

- [1] A. L. Pita, *Infraestructuras ferroviarias*. Universidad Politécnica de Catalunya. Edicions UPC, 2006.
- [2] H. J. Kaltenbach et al., *Assessment of the aerodynamic loads on the trackbed causing ballast projection: results from the DEUFRAKO project Aerodynamics in Open Air (AOA)*, 2008.
- [3] A. Quinn & M. Hayward, *Full-scale aerodynamic measurements underneath a high speed train*. Proceedings of the BBAA VI, Milano, Italy, 2008.
- [4] H. Kwon & C.S. Park, *An experimental study on the relationship between ballast flying phenomenon and strong wind under high speed train*. In Proceedings of the World Congress on Rail Research, Montreal, Canada, 2006.
- [5] P. Deeg et al., *Cross- Comparison of Measurement Techniques for the determination of train induced Aerodynamic Loads on the trackbed*. Proceedings of the BBAA VI, Milano, Italy, 2008.
- [6] B. Lázaro & E. González, *Characterization and Modeling of Flying Ballast Phenomena in High-speed Train Lines*. In the ninth world congress on railway research, 2010.
- [7] A. Ido et al., *Study on under-floor flow to reduce ballast flying phenomena*. In Proceedings of the World Congress on Rail Research, Seoul, South Korea, 2008.
- [8] R. Kind, *Tests to determine wind speeds for scouring and blowoff of roof-top gravel*. In Proc. of the 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, London, 1975.
- [9] B. Lázaro et al., *Test Procedure for Quantitative Ballast Projection Risk Evaluation*. Proyecto AURÍGIDAS, 2008.
- [10] G. Q. Jing et al., *Ballast Flying DEM Microscopic Analysis and Counteracting Measures*. Applied Mechanics and Materials, 97, 266-270, 2011.
- [11] A. in Open Air (AOA), *WPI.2 - Ballast Projection*. Paris, 2008.
- [12] H. Kaltembach et al., *WPI.2 - Investigation of particle dislodgement from a ballasted trackbed in scale 1:10*. Aerodynamics in Open Air (AOA), Paris, 2008.
- [13] A. in Open Air (AOA), *WPI.2 - Ballast Projection. Full-scale tests on track model*. Paris, 2008.

-
- [14] H. B. Kwon et al., *Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89(13), 1179-1195, 2001.
- [15] A. in Open Air (AOA), *WPI.2.5 – Numerical investigations on ballast collision process*. AOA Dissemination meeting, Paris, 2008.
- [16] G. Saussine et al., *Ballast Flying Risk Assessment Method for High Speed Line*. SNCF, Paris, France. ALTEN, Paris, France, 2011.
- [17] G. Saussine, *Ballast Flying and Projection Phenomena: Issues and Challenges*. SNCF, Paris, France University of Illinois at Urbana-Champaign. Yeh Center NCEL, 2013.
- [18] G. Saussine et al., *High speed in extreme conditions: ballast projection phenomenon.*, 2014.
- [19] G. Q. Jing et al., *Ballast Flying Mechanism and Sensitivity Factors Analysis*, 2012.
- [20] F. Cheli, *CFD Analysis of the under carbody flow of an ETR500 High Speed Train*.
- [21] M. Jönsson, *Numerical Investigation of the Flow Underneath a Train and the Effect of Design Changes*. Mechanical Engineering. Department of Applied Physics and Mechanical Engineering. Division of Fluid Mechanics. Lulea University of Technology, 2007.
- [22] M. Sima et al., *Validation of CFD for the flow under a train with 1: 7 scale wind tunnel measurements*. In BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics Applications. Milano. Italy (pp. 20-24), 2008.
- [23] J. García et al., *Results for the estimation of an equivalent roughness for the wall made up of the Ballast and sleepers*. AOA-DEUFRAKO WP 1.1. Paris, 2008.
- [24] A. Mascaraque et al., *AAerosleeper - A novel sleeper design to reduce aerodynamics loads on track: Reduction in the aerodynamic load averaged over the train passage measured close to the ballast bed*. 2nd International Symposium on RAIL AERODYNAMICS., 2013.
- [25] D. Thompson, *Railway Noise and Vibration. Mechanisms, Modelling and Means of Control*. Editorial Elsevier, 2009.
- [26] V. Krylov et al., *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, 2000.
- [27] W. Lim, *Mechanics of Railway Ballast Behaviour*. Tesis Doctoral Universidad de Nottingham. 11-12, 2004.
-

-
- [28] C. Esveld, *Modern Railway Track*. Second Edition. MRT – Productions, 2001.
- [29] H. Lamb, *On the Propagation of tremors over the surface of an elastic solid*. Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A. 203:1-42, 1904.
- [30] J. Goicolea et al., *Nuevos Métodos De Cálculo Dinámico Para Puentes De Ferrocarril En Las Instrucciones IAPF y Eurocódigo 1.*, 2002.
- [31] A. Vidal, *Vibraciones en las Vías de Ferrocarril*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona., 2009.
- [32] P. Galvín, *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., 2007.
- [33] A. Karrech, *Comportement des matériaux granulaires sous vibration: Application au cas du ballast*. Tesis Doctoral ENPC, 2008.
- [34] J. Morgan & E. Markland, *The Effect of Vibration on Ballast Beds*. Gèotechnique 31, N°3, 367-386., 1981.
- [35] E. Azema, *Étude numérique des matériaux granulaires à grains polyédriques: rhéologie quasi-statique, dynamique vibratoire, application au procédé de bourrage du ballast*. Tesis Doctoral, Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC), Université Montpellier 2., 2007.
- [36] —, *Force transmission in a packing of pentagonal particles*. Arxiv, APS/123- QED, 2008.
- [37] A. Pita, *Ballast vibration makes new designs for high speed lines advisable*. WCRR, 2001.
- [38] C. Blanco, *Influencia de las vibraciones generadas por las ramas de alta velocidad en la infraestructura ferroviaria*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
- [39] K. Man-Cheol, *Analysis on Factors Affecting the Acceleration of the Ballasted Track in Kyong-Bu High Speed Line*. International Journal of Railway,2(4), 152-163., 2009.
- [40] W. Zhai et al., *Modelling and experiment of railway ballast vibrations*. Journal of sound and vibration, 270(4), 673-683., 2004.

Índice de figuras

1.	Balasto depositado en las vías. Fuente: Dominio público.	4
2.	Esquema de disposición de capas en infraestructura ferroviaria con balasto. Fuente: Instrucción General para el Proyecto de Plataformas de ADIF (IGP-2008).	7
3.	Detalle de vía con balasto. Fuente: Geotexan (Web).	8
4.	Velocidades medias al paso de un tren, con aparatos a 200 mm de centro de vía. Fuente: [2]	13
5.	Velocidades adimensionales al paso de un tren. Fuente: [3]	14
6.	Daño en superficie de rodadura debido a <i>ballast pitting</i> en Eurotúnel. Fuente: [3]	15
7.	Patrón aproximado del flujo de viento generado por el paso del tren. Determinado en Fase 1. Fuente: [3]	16
8.	Instrumentación sobre capa de balasto, a excepción de sonda cobra. Fuente: [3]	16
9.	Componente transversal a la trayectoria de flujo generado. Fuente: [3]	17
10.	Componente vertical del flujo. Fuente: [3]	17
11.	Sistema de medición de flujo Kiel-Probe en tramo de línea Seúl-Busan. Fuente: [4]	19
12.	Fluctuación de velocidad del flujo generado a distintas alturas sobre el lecho de balasto. Fuente: [4]	20
13.	(a) Distribución vertical de velocidades medias en eje de simetría. (b) Distribución de velocidades en un plano horizontal, 20 mm sobre la cabeza del carril. Fuente: [4]	21
14.	Tramo de pruebas en Guadalajara. Fuente: [6]	22
15.	Aclaración: sistema de coordenadas. Fuente: [6]	22
16.	Perfil de velocidades medias en distintos momentos de paso del tren. Fuente: [6]	23
17.	Tipos de trenes presentes en el estudio, según bajos de la máquina. Fuente: [7]	25
18.	Medida del flujo sobre el balasto. Fuente: [7]	25
19.	Velocidades del flujo para los dos tipos de trenes a estudio. Fuente: [7]	26
20.	Perfiles de velocidad de flujo para diferentes alturas sobre el lecho de balasto. Fuente: [7]	27
21.	(a) Tipología de piedras de balasto. (b) Frecuencia de cada tipo de piedra de balasto. Fuente: [4]	28
22.	(a) Antes de ensayo. (b) Después de ensayo. Fuente: [4]	29
23.	Velocidad crítica de viento que inicia levantamiento según tipología de piedra de balasto. Fuente: [4]	29
24.	Estudio de vuelo de balasto con velocidad del viento de 33 m/s para diferentes instantes de tiempo. Fuente: [7]	30
25.	Trayectorias definidas para los desplazamientos de las partículas determinados en el túnel de viento. Fuente: [11]	31
26.	Vuelo de balasto con viento a 33 m/s. Fuente: [7]	33
27.	Tipos de modelos de tren a estudio. Fuente: [7]	33
28.	Perfiles de velocidad según tipo de tren. Fuente: [7]	34

29.	Modelo DEM. Fuente: [15]	35
30.	Registros y regresiones para el número de partículas movilizadas con la energía cinética de cada impacto y ángulo variable. Fuente: [15]	35
31.	Relación de coeficientes de restitución tangencial entre experimento y simulación DEM. Fuente: [15]	36
32.	Mediciones experimentales con tubos de Pitot. Fuente: [16]	37
33.	Modelo de vía DEM. Fuente: [17]	37
34.	Correlación entre el porcentaje de piedras de balasto que se han desplazado y P_{Tot} . Fuente: [16]	38
35.	Función Densidad de Probabilidad de balasto sobre traviesa. Fuente: [16]	39
36.	a) Explicación de procedimiento a seguir. b) Relación entre número de partículas expulsadas y porcentajes de partículas desplazados. Fuente: [16]	39
37.	% de partículas movidas frente a P_{Tot} . Distribución Gaussiana. Fuente: [16]	40
38.	Simulación de proyección de balasto bajo condiciones de nieve. Fuente: [18]	41
39.	Fuerzas presentes en el levantamiento de balasto. Fuente: [19]	42
40.	Resultados de simulación CFD en ICE3. Fuente: [2]	44
41.	Velocidad axial, intensidad de turbulencia y coeficiente de fricción con la distancia al frente. Fuente: [2]	44
42.	Simplificación de geometría de bogies. Fuente: [20]	45
43.	Módulos que componen el dominio simplificado de cálculo. Fuente: [20]	45
44.	Contornos de velocidad x no dimensional. Fuente: [20]	45
45.	Modelo ICE3. Fuente: [21]	46
46.	Contornos de velocidad para ICE3 original (izquierda) y el ICE3 modificado (derecha). Fuente: [21]	46
47.	Resultados de los perfiles de velocidad comparando modelos analíticos, computacionales y ensayos de campo. Fuente: [23]	48
48.	Movilidad vertical vía con traviesas bloque. Trazo continuo representa la medición entre traviesas y trazo discontinuo la medición sobre una traviesa. (a) Placa de asiento rígida. (b) Placa de asiento flexible. Fuente: [25]	53
49.	Relación entre rigidez de placa de asiento e interacción vía-traviesa (con el amortiguamiento en el carril). Fuente: [25]	54
50.	Tasa de amortiguamiento/m de vía. El trazo continuo, traviesas bloque/placas de asiento poco rígidas; el trazo discontinuo, traviesas bloque/placas de asiento rígidas; y trazo discontinuo punteado, traviesas de madera. (a) Movimiento vertical. (b) Movimiento lateral. Fuente: [25]	54

51.	Ratio de vibración traviesa-carril cuando pasa un tren. El trazo continuo, traviesas bi-bloque/placas de asiento poco rígidas; el trazo discontinuo, traviesas bibloque/placas de asiento rígidas; y trazo discontinuo punteado, traviesas de madera. Fuente: [25]	55
52.	Vibraciones por contacto rueda-carril. Fuente: [25]	56
53.	(a) Distancias características de tren y vía. (b) Mecanismo de presión rueda-eje para generar vibraciones en el suelo. Fuente: [26]	58
54.	Esquema de la propagación de onda de levante. Fuente: [27]	58
55.	Danza de traviesas. Fuente: [1]	59
56.	Ejemplo de transición de vía. Fuente: [28]	60
57.	Propagación de onda a alta velocidad. Fuente: [28]	61
58.	Desplazamiento máximo en el centro del vano en función del tiempo para velocidades de paso $v=288$ km/h (negro) y $v=360$ km/h (rosa). Fuente: [30]	63
59.	Tres primeros modos de vibración de una viga isostática. Fuente: [30]	64
60.	Frecuencias al paso de AVE (250 km/h) para 3, 8.6 y 11.8 m de vía. Fuente: [32]	65
61.	Medida de los asientos respecto al número de ciclos para distintas frecuencias. Fuente: [33]	66
62.	Bateadora MATISA, propiedad de la Cosfesa, en la estación de ferrocarril de Salamanca. Fuente: Dominio público.	71
63.	Esquema del bateo. Fuente: [35]	72
64.	Representación de las fuerzas normales en los bates (en rojo) y en un tramo durante la penetración, para una frecuencia de vibración de 20 Hz. Fuente: [35]	74
65.	Grado de compactación para las diferentes fases del bateo y con diferentes frecuencias de vibración. Fuente: [35]	75
66.	En fase de apriete: (a) Bloqueo. (b) Avance. Fuente: [35]	76
67.	Cavidades observadas tras un ciclo de bateo. Fuente: [35]	76
68.	Variación de la intensidad de oscilación del balasto con la velocidad. Fuente: [37]	78
69.	a) Profundidades de los puntos de medida de la aceleración. b) Medidas de vibraciones registradas en la línea Hannover-Berlín para los puntos mostrados en a). Fuente: [1]	80
70.	Velocidad de vibración en el balasto. Izquierda: influencia de la velocidad de circulación. Derecha: influencia del peso por eje del vehículo. Fuente: [1]	80
71.	Esquema de los puntos de medición en la vía. Fuente: [39]	81
72.	Hipótesis de transmisión de carga con modelado en forma de cono. Fuente: [40]	82
73.	Modo de colocación del acelerómetro en la capa de balasto. Fuente: [40]	82
74.	Respuesta de aceleración del balasto debido al paso del tren por la sección de pruebas. Fuente: [40]	83