



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ETS INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS

# TRABAJO DE FIN DE GRADO

---

Análisis del comportamiento estructural de una vía de doble ancho.  
Aplicación al Corredor Mediterráneo, en la línea de cercanías C5 y C6  
entre las estaciones Massalfassar y El Puig (Valencia)

---

*Presentado por*

Tuesta Gefaell, Jose María

---

*Para la obtención del*

Grado de Ingeniería Civil

*Curso: 2019/2020*

*Fecha: 03/12/2019*

*Tutor: Ignacio Villalba Sanchis*

*Cotutor: Pablo Salvador Zuriaga*



# RESUMEN

Dadas las características de la red ferroviaria española, el material rodante y la necesidad de compatibilizar los anchos ibérico e internacional se implantó el tercer carril en determinados tramos del corredor Mediterráneo formando vías de doble ancho, sin precedentes en el mundo.

El comportamiento de este tipo de vías se desconoce, es por esto que el estudio actual es totalmente novedoso y constituye un punto de partida en el análisis de una vía de doble ancho.

En el presente estudio se ha analizado la respuesta estructural y vibratoria de este tipo de vía frente a diferentes sollicitaciones dinámicas, con el fin de evaluar y determinar su comportamiento. Para ello se ha llevado a cabo mediciones en campo de desplazamientos y aceleraciones y se han comparado con los obtenidos mediante un modelo de vía de doble ancho.

Las conclusiones del trabajo servirán para mejorar el modelo y dotar de una herramienta para el diseño de proyectos y análisis estructurales, así como para ampliar el conocimiento sobre esta clase de vías.

# Índice de contenidos

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. EL ORIGEN DEL DOBLE ANCHO.....	1
1.2. EL CORREDOR MEDITERRÁNEO .....	2
<b>2. TRAMO DE ANÁLISIS.....</b>	<b>3</b>
<b>3. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....</b>	<b>5</b>
<b>4. MODELO ESTRUCTURAL .....</b>	<b>6</b>
4.1. COMPOSICIÓN GENERAL .....	6
4.1.1. <i>El método de los elementos finitos</i> .....	6
4.2. PARTICULARIZACIÓN AL ÁMBITO FERROVIARIO .....	7
4.2.1. <i>Incertidumbres</i> .....	8
4.2.2. <i>Método constitutivo del modelo</i> .....	10
4.3. EL MODELO GEOMÉTRICO .....	10
4.3.1. <i>Sistema de referencia</i> .....	10
4.3.2. <i>Parámetros del modelo geométrico</i> .....	11
4.3.3. <i>Elección del tipo de elementos</i> .....	11
4.3.4. <i>Generación de la geometría</i> .....	12
4.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES A MODELIZAR .....	13
4.4.1. <i>El carril</i> .....	13
4.4.2. <i>La placa de asiento</i> .....	15
4.4.3. <i>Rigidez de la placa</i> .....	15
4.4.4. <i>La traviesa</i> .....	17
4.4.5. <i>El balasto, subbalasto y terraplén</i> .....	19
4.4.6. <i>Tabla Resumen</i> .....	19
4.4.7. <i>Las divisiones del terreno</i> .....	20
4.4.8. <i>Los nodos</i> .....	21
4.4.9. <i>Mallado</i> .....	21
4.4.10. <i>Dominio</i> .....	22
4.4.11. <i>Condiciones de contorno</i> .....	22
4.5. EL MODELO DE CARGAS.....	24
4.5.1. <i>Parámetros del modelo de carga</i> .....	24
4.5.2. <i>Aplicación de la carga en el modelo</i> .....	24
4.5.3. <i>Tratamiento de Datos medidos en campo</i> .....	25
<b>5. CAMPAÑA DE MEDICIONES .....</b>	<b>27</b>

5.1.	EMPLAZAMIENTO.....	28
5.2.	TIPO DE TRENES .....	28
5.3.	EVALUACIÓN DE LAS ACCIONES DINÁMICAS: CRITERIO DE EISENMANN .....	29
5.4.	CÁLCULO DE LA CARGA DINÁMICA.....	31
5.5.	RIGIDEZ DE LA PLACA DE ASIENTO ASOCIADA.....	32
5.6.	INSTRUMENTACIÓN .....	33
5.7.	EXTRACCIÓN DE DATOS .....	35
5.8.	TRATAMIENTO DE DATOS.....	36
5.8.1.	<i>Duración y tamaño de los registros.....</i>	<i>37</i>
<b>6.</b>	<b>CÁLCULO MEDIANTE ANSYS .....</b>	<b>37</b>
6.1.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	37
6.2.	AJUSTE DE LOS SUBSTEPS.....	38
6.3.	AJUSTE DE LA PLACA .....	40
6.4.	TENSIONES EN EL BALASTO .....	41
6.5.	MEDICIÓN EN ANSYS .....	43
<b>7.</b>	<b>COMPARATIVA DE RESULTADOS CAMPO-MODELO .....</b>	<b>43</b>
7.1.	AVE.....	43
7.2.	CIVIA.....	45
7.3.	EUROMED .....	47
7.4.	MERCANCÍAS.....	48
7.5.	CERCANÍAS 447 .....	49
7.6.	CONSIDERACIONES .....	50
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>51</b>
<b>9.</b>	<b>FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>52</b>
<b>10.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>53</b>
<b>11.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA.....</b>	<b>53</b>

## Índice de tablas

TABLA 1.	TABLA RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EN EL MODELO .....	19
TABLA 2.	Nº NODOS SEGÚN EL Nº DIVISIONES DEL TERRENO .....	20
TABLA 3.	Nº NODOS SEGÚN EL Nº DE TRAVIASAS .....	21
TABLA 4.	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS TRENES MEDIDOS EN CAMPO.....	29
TABLA 5.	VELOCIDADES MEDIDAS EN CAMPO PARA LOS DISTINTOS TRENES.....	29

TABLA 6. DISPERSIÓN DE LOS VALORES MEDIOS DE CARGA DINÁMICA. ....	30
TABLA 7. VALORES PARA EL CRITERIO DE EISENMANN .....	32
TABLA 8. VALORES DE CARGA DINÁMICA PARA CADA COMPOSICIÓN .....	32
TABLA 9. VALORES DE RIGIDEZ DE LA PLACA PARA CADA COMPOSICIÓN. ....	33
TABLA 10. DURACIÓN DE CÁLCULO DEL MODELO Y TAMAÑO DE LOS ARCHIVOS DE RESULTADOS .....	37

## Índice de figuras

FIGURA 1. UBICACIÓN DEL CORREDOR MEDITERRÁNEO Y ESTADO ACTUAL DE LAS OBRAS .....	2
FIGURA 2. FASE 1: CAMBIO A TERCER CARRIL EN LA VÍA MÁS CERCANA A LA COSTA. ....	3
FIGURA 3. FASE 2: CAMBIO DE UN CARRIL A ANCHO INTERNACIONAL. ....	4
FIGURA 4. FASE FINAL: CAMBIO DEL SEGUNDO SENTIDO A ANCHO INTERNACIONAL .....	4
FIGURA 5. DOMINIO, INCÓGNITAS Y CONDICIONES DE CONTORNO .....	7
FIGURA 6. LOCALIZACIÓN DEL SISTEMA DE REFERENCIA EMPLEADO. ....	11
FIGURA 7. TIPO DE ELEMENTO EMPLEADO - SOLID 95 .....	12
FIGURA 8. DISTINTAS FASES DE MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA .....	13
FIGURA 9. CARRIL SOFISTICADO. ....	14
FIGURA 10. CARRIL BÁSICO. ....	14
FIGURA 11. SOLUCIÓN DE COMPROMISO PARA LA MODELIZACIÓN DEL CARRIL. ....	15
FIGURA 12. VALORES DE RIGIDEZ PARA DISTINTAS CONDICIONES DE CARGA .....	16
FIGURA 13. DISTINTAS PARTES EN QUE SE DIVIDE LA TRAVIESA MODELIZADA. ....	18
FIGURA 14. TRAVIESA POLIVALENTE. ....	18
FIGURA 15. CONDICIONES DE CONTORNO DEL MODELO. ....	23
FIGURA 16. ACELERACIONES PARA EL AVE MEDIDAS EN CAMPO .....	25
FIGURA 17. TIEMPO DE COMPARACIÓN PARA LAS ACELERACIONES EN EL CASO DEL AVE MEDIDAS EN CAMPO .....	26
FIGURA 18. ACELERACIONES PARA EL AVE MEDIDAS EN CAMPO ENTRE LOS SEGUNDOS 9,1 Y 9,6. ....	26
FIGURA 19. ESPECTRO DE FRECUENCIAS PARA LAS ACELERACIONES DE AVE MEDIDAS EN CAMPO .....	27
FIGURA 20. EMPLAZAMIENTO DE LA ZONA DE MEDICIONES. ....	28
FIGURA 21. ACCELERÓMETROS PIEZOELÉCTRICOS EN CARRIL Y TRAVIESA .....	34
FIGURA 22. DISTANCIÓMETROS CARRIL-TRAVIESA Y CARRIL-BALASTO .....	34
FIGURA 23. EQUIPOS DE MEDICIÓN COMPLEMENTARIOS. ....	35
FIGURA 24. PROGRAMA PARA LA CONVERSIÓN DE DATOS A FORMATO TEXTO .....	36
FIGURA 25. FILTRADO DE SEÑAL. ....	36
FIGURA 26. ASIENTO DE PLACA PARA EL AVE A DISTINTOS SUBSTEPS. ....	39
FIGURA 27. ASIENTOS PLACA AVE SEGÚN DISTINTAS RIGIDECES .....	40

FIGURA 28.ACELERACIONES AVE PARA DISTINTAS RIGIDECES DE PLACA.....	41
FIGURA 29. TENSIONES EN EL BALASTO PARA EL AVE .....	42
FIGURA 30.TENSIONES EN EL BALASTO PARA EL CIVIA .....	42
FIGURA 31. COMPARATIVA ACELERACIONES AVE .....	44
FIGURA 32.COMPARATIVA ASIENTOS DE PLACA AVE.....	45
FIGURA 33. ESPECTRO DE FRECUENCIA AVE MEDIDO EN CAMPO .....	45
FIGURA 34. COMPARATIVA ACELERACIONES CIVIA .....	46
FIGURA 35.COMPARATIVA ASIENTOS PLACA CIVIA.....	46
FIGURA 36. COMPARATIVA ACELERACIONES EUROMED .....	47
FIGURA 37. COMPARATIVA ASIENTO PLACA EUROMED .....	48
FIGURA 38. COMPARATIVA ACELERACIONES MERCANCIAS .....	49
FIGURA 39. COMPARATIVA ASIENTOS PLACA MERCANCIAS .....	49
FIGURA 40. COMPARATIVA ACELERACIONES CERCANIAS .....	50
FIGURA 41. COMPARTIVA PLACA ASIENTO CERCANIAS 447 .....	50

# 1. Introducción

## 1.1. El origen del doble ancho

En torno a 1840 se propuso al Gobierno de España el proyecto de nueva línea de ferrocarril que uniría Madrid con el Puerto de Cádiz, coincidiendo con informes positivos sobre la implantación del ferrocarril en países europeos.

El Gobierno accedió y encomendó la redacción de un informe técnico-económico a Juan Subercase, que se publicó en 1844. En este, se propuso el ancho de vía ibérico de 1668 mm, con el que se pretendía liderar una tendencia observada hacia anchos cada vez mayores. En este informe se explicaba que, dada la orografía montañosa de la península ibérica y las grandes pendientes de las rampas que habrían de superarse, un ancho de vía mayor permitiría trenes con calderas de vapor más grandes, con más potencia y estabilidad, y que alcanzarían velocidades mayores y reducirían el tiempo de viaje.

Sin embargo, en 1886 se acordó en el Congreso Internacional Ferroviario de Berna adoptar un ancho europeo común de 1435 mm, 233 mm menor al ancho ibérico, con el que se establecerían relaciones comerciales y sociales sin necesidad de transbordos entre las fronteras de los países. A pesar de este acuerdo, en España no se modificaron los anchos y se siguió operando con el ancho ibérico a excepción de las líneas de alta velocidad.

Hoy en día, ante la actual globalización y relaciones con el resto de Europa se ha vuelto crucial adoptar el ancho internacional por lo que las vías de ancho ibérico están adaptándose progresivamente.

Para llevar a cabo este cambio se decidió pasar por una fase de transición, formando vías con tres carriles que permitieran el paso de trenes tanto por el ancho ibérico como por el ancho internacional.

En concreto, hay un corredor en el cuál ésta solución cobra especial importancia dado el interés comercial, logístico y de unión con los principales puertos de España y países europeos. Se trata del corredor Mediterráneo, objeto del estudio actual.

## 1.2. El corredor Mediterráneo

El corredor Mediterráneo es conjunto de líneas ferroviarias que discurre paralelo a la costa del mar Mediterráneo, comunicando España con Europa e importantes centros urbanos donde se ubican los principales puertos de España.

Está formado por tramos con distintas configuraciones según los anchos de vía o tercer carril que se dispongan. En la imagen siguiente se presentan los diferentes tramos y sus características.



Figura 1. Ubicación del corredor Mediterráneo y estado actual de las obras  
Fuente: (Asociación Valenciana de Empresarios, 2019)

## 2. Tramo de análisis

El tramo a analizar se sitúa entre Valencia y Castellón, concretamente entre las estaciones de Massalfassar y El Puig pertenecientes al corredor Mediterráneo.

Está formado por una plataforma de doble sentido en el cual se tiene tercer carril en el tramo más alejado de la costa.

Los planes más inmediatos con respecto al Corredor Mediterráneo son la construcción de otro tercer carril en el sentido más cercano a la costa, de forma que la plataforma quede constituida por dos vías de tres carriles cada una. Una para cada sentido.

Dado que la evolución de las obras en el corredor Mediterráneo son algo lentas, parece conveniente que se estudie el tercer carril con detenimiento ya que se espera que se mantenga un tiempo considerable hasta el cambio final al ancho internacional.

En las siguientes imágenes tenemos el plan de remodelación del corredor Mediterráneo:

En la figura 2 se observa la primera fase de construcción, en la que se dispone un tercer carril en el tramo más cercano a la costa formando una plataforma de doble sentido con doble ancho para cada sentido.



Figura 2. Fase 1: Cambio a tercer carril en la vía más cercana a la costa.  
Fuente: (Asociación Valenciana de Empresarios, 2019)



Figura 3. Fase 2: Cambio de un carril a ancho internacional.  
Fuente: (Asociación Valenciana de Empresarios, 2019)



Figura 4. Fase final: Cambio del segundo sentido a ancho internacional  
Fuente: (Asociación Valenciana de Empresarios, 2019)

En la figura 3, queda representada la fase 2, en la que se procedería a cambiar uno de los sentidos de circulación a ancho internacional único, dejando el otro sentido con tercer carril.

Finalmente, en la última fase (Figura 4), se sustituiría este tercer carril restante y se formaría una vía de doble sentido y de ancho único internacional que supondría que la mayoría de composiciones actuales, construidas para ancho ibérico quedarían

relegadas a tramos de cercanías interiores como son los indicados en rojo en las figuras anteriores.

### 3. Objetivos del proyecto

El comportamiento de una vía formada por tres carriles se desconoce. El siguiente estudio pretende ampliar y mejorar el conocimiento sobre el comportamiento estructural y vibratorio de esta clase de vías.

Para ello se analizará la estructura ante el paso de vehículos ferroviarios tanto de pasajeros como mercancías incluyendo trenes de alta velocidad.

Dada la imposibilidad de calcular manualmente desplazamientos y aceleraciones entre las distintas partes que componen la superestructura se recurrirá a un programa de cálculo por elementos finitos en el cual se modelice tanto la geometría como las cargas a las que está sometida.

Se realizarán mediciones de desplazamientos y aceleraciones en campo, en la vía ya comentada perteneciente al corredor Mediterráneo y se compararán con los obtenidos mediante un modelo estructural de la vía de tres carriles realizado mediante el programa Ansys APDL, perteneciente al departamento de Ingeniería e Infraestructura de los transportes de la Universitat Politècnica de València.

Posteriormente se extraerán conclusiones que nos permitan mejorar el modelo y ampliar el conocimiento sobre esta clase de vías.

## 4. Modelo estructural

### 4.1. Composición general

El modelo en cuestión es un modelo tridimensional de vía de tres carriles creado con el programa ANSYS APDL. Se ha dividido por comodidad en dos códigos distintos, uno para la geometría de la sección y otro para las cargas que constituye el material rodante sobre la vía.

Ambos códigos se componen en el programa para calcular por elementos finitos, en nuestro caso, desplazamientos y aceleraciones en distintos puntos de la estructura.

#### 4.1.1. El método de los elementos finitos

Las bases del método de los elementos finitos fueron establecidas hacia 1940 aunque no fue hasta 1970 cuando se desarrollaron debido al gran avance tecnológico en los ordenadores de la época.

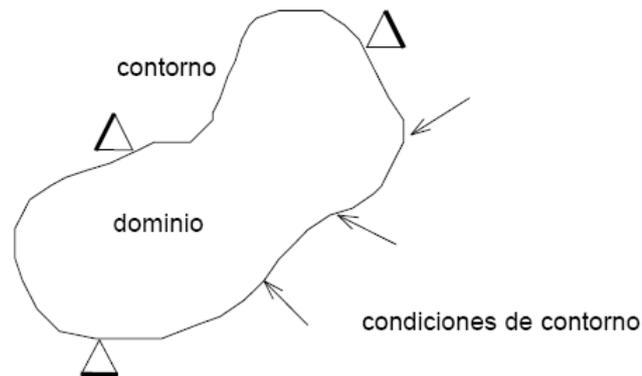
El método de los elementos finitos funciona mediante divisiones de una estructura en partes pequeñas interconectadas por puntos llamados nodos. A cada parte de la estructura se le asigna un tipo de elemento, normalmente hexaedros con una configuración de nodos determinada. En cada uno de estos elementos se ensambla una ecuación matricial que resuelve la estructura en cada punto basada en las ecuaciones que rigen el comportamiento del medio continuo.

El método de los elementos finitos busca pasar de un sistema continuo con infinitos grados de libertad, a un sistema con un número finito de grados de libertad, para lo cual se busca resolver la estructura en los nodos, dando un resultado final suma de resultados en cada nodo.

Para caracterizar el problema debemos atender a las siguientes variables:

- Dominio: espacio donde se analiza el problema.

- Condiciones de contorno: desplazamientos y giros impuestos por la estructura en apoyos u otras zonas con condiciones especiales.
- Incógnitas: variables a resolver en el sistema.



*Figura 5. Dominio, incógnitas y condiciones de contorno  
Fuente: (Mesa Hinarejos, 2009)*

En el caso de elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de éstos podemos calcular el resto de incógnitas que nos interesen, como pueden ser tensiones, deformaciones, etc. A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo, siendo estos grados de libertad las variables que nos determinan el estado y/o posición del nodo.

Igual que el desarrollo de esta metodología, la aplicación de la misma al ámbito de la ingeniería civil siempre ha estado vinculado a los avances en el campo de la informática. En la actualidad existen multitud de programas informáticos que posibilitan el análisis de problemas ingenieriles relativamente complejos.

## 4.2. Particularización al ámbito ferroviario

Para analizar el comportamiento de la estructura que compone la vía, este método realiza la división de la misma en un número finito de pequeños elementos, siendo cada elemento analizado de forma separada y considerando la deformación de la

estructura como el reagrupamiento de los desplazamientos individuales de cada elemento para posteriormente sacar conclusiones de toda ella.

El cálculo mediante el método de los elementos finitos tiene como ventaja que permite tener en cuenta los parámetros que se consideren necesarios en el problema a resolver, como por ejemplo la calidad del suelo de la plataforma, el tipo de traviesas o el grosor de las capas soporte. Pese a esto, si se pretende la realización de un estudio muy preciso mediante el MEF, van a existir unas limitaciones por los siguientes factores como los siguientes:

Las incertezas en la magnitud de las cargas, el estado del balasto, el estado del material rodante, el apriete de las sujeciones, etc.

También hay que tener en cuenta que en la realidad existen fuerzas en las tres direcciones del sistema de referencia, mientras que en el estudio de los modelos solo se tienen en cuenta la carga vertical, despreciando los efectos de acople de la carga en las tres direcciones.

#### 4.2.1. Incertidumbres

La imposibilidad de obtener algunos datos de relevancia, las simplificaciones adoptadas y la ausencia de formulaciones precisas para el cálculo de ciertos parámetros del modelo inducen cierta incertidumbre sobre la validez de los resultados. Dichas incertidumbres pueden ser futuras líneas de investigación. En este apartado se explican las principales.

- Carga interior de las composiciones:

Se desconoce por una parte el incremento de la carga estática por eje debido a los pasajeros o mercancías. Este desconocimiento produce un error considerable en la magnitud de aceleraciones y desplazamientos.

- Mayoración de la carga estática – Criterio de Eisenmann:

La mayoración de la carga estática constituye una fórmula empírica sujeta a variaciones muy grandes según los parámetros de calidad de la vía. Sabemos que la carga dinámica podría estimarse en un 10% más que la estática siendo conservadores. En este caso, con el criterio de Eisenmann y un factor de seguridad estadística del 60% hemos obtenido una mayoración de la carga de un 17%. Estos valores son representativos y están dentro del orden de magnitud, sin embargo hay una gran incertidumbre en su estimación y pequeñas variaciones de los mismos producen grandes variaciones en los desplazamientos y aceleraciones.

- Condiciones de contorno:

El hecho de que el balasto y traviesa estén unidos no permite el despegue de la traviesa sobre el balasto. Esta simplificación del modelo, adoptada en parte porque Ansys no permite el cálculo de elementos discretos y elementos continuos en un mismo modelo podría provocar incoherencias en el balasto como tracciones en el mismo.

- El estado de la vía y el material rodante:

Así como sus imperfecciones, mantenimiento o características del balasto y su consolidación.

- Aplicación de la carga:

En el modelo hemos simplificado este aspecto modelizando una carga vertical sobre el carril aunque realmente no se aplica vertical e introduce una componente perpendicular y otra en la dirección del carril.

## 4.2.2. Método constitutivo del modelo

Se ha descubierto que las deformaciones producidas por las cargas en las capas granulares se puede descomponer en dos partes bien diferenciadas, una elástica, que desaparece después de pasar el tren, y otra plástica, que conserva una deformación remanente. Por esto, se recomienda el uso de modelos constitutivos de tipo elastoplástico, pese a ser necesario la elección de la ley apropiada para evitar errores y la caracterización de los parámetros mediante ensayos de laboratorio. En contraposición, también se ha comprobado que después de un cierto tiempo en explotación se produce la consolidación de las capas granulares, por lo que el comportamiento de la infraestructura puede ser considerado como elástico lineal.

## 4.3. El modelo geométrico

### 4.3.1. Sistema de referencia

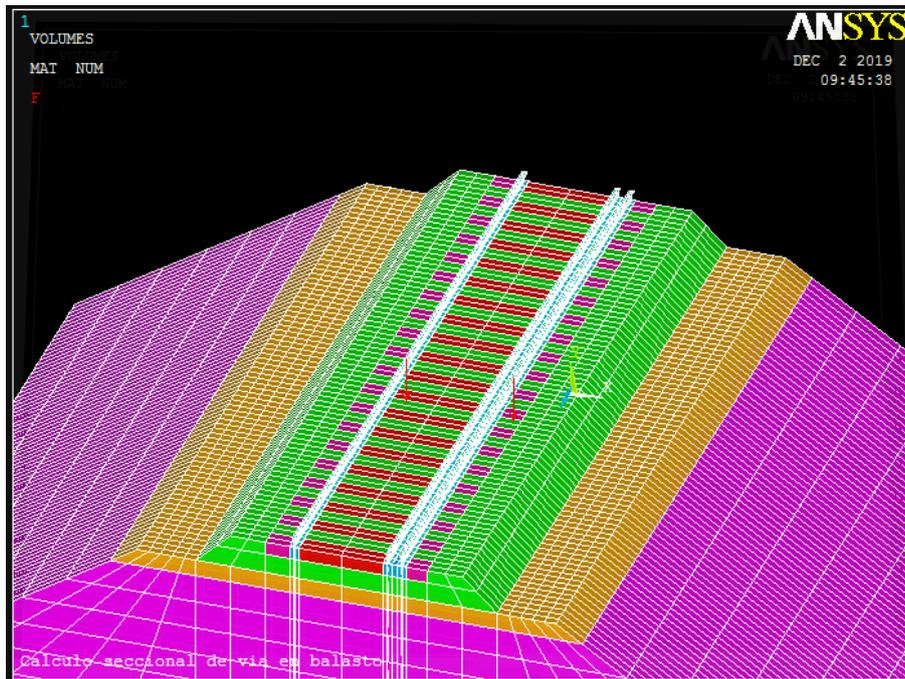
El sistema de referencia XYZ se tiene las siguientes características:

Las secciones transversales están contenidas en el plano XY de manera que las X negativas representan el lado de la estructura a la izquierda del sistema de referencia, donde se haya el carril común a los dos anchos. Las X positivas, por otro lado representan la parte de sección que contiene a los otros dos carriles.

El modelo en su totalidad está sobre las Y positivas de forma que los ejes XYZ se encuentran en la parte más baja del modelo.

Respecto al eje Z, el modelo está formado por 20 traviesas y empieza en el 0, desarrollándose en las Z positivas.

El sistema de referencia quedaría por tanto de la siguiente manera:



*Figura 6. Localización del sistema de referencia empleado.  
Fuente: Ansys APDL*

Quedando las siguientes vistas: X-lateral, Y-vertical, Z-profundidad como se observa en la imagen anterior.

### 4.3.2. Parámetros del modelo geométrico

El modelo está creado en función de ciertos parámetros de entrada que caracterizan la sección transversal con lo que basta cambiar dichos parámetros para obtener la sección deseada geoméricamente y las características de cada elemento (Módulos de elasticidad, coeficientes de Poisson, etc.)

### 4.3.3. Elección del tipo de elementos

Para modelizar nuestra estructura hemos utilizado el tipo de elemento SOLID 95 que consiste en un hexaedro de veinte nudos. Este tipo de elemento es el más aconsejable

para una estructura tridimensional, sin embargo el tiempo de cálculo del mismo es elevado.

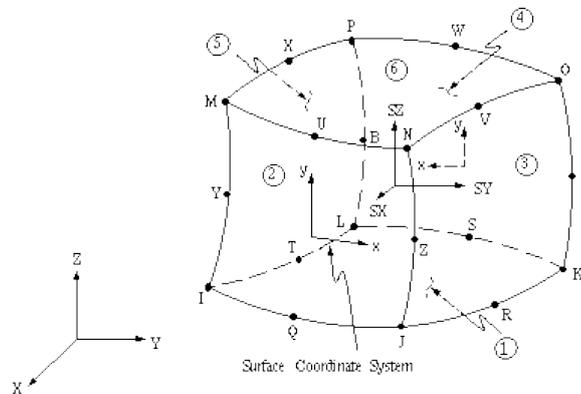


Figura 7. Tipo de elemento empleado - SOLID 95  
Fuente: Menú de ayuda Ansys APDL

#### 4.3.4. Generación de la geometría

La geometría del modelo se consigue a partir de una sección transversal en el plano XY. La localización de los Keypoints es función de divisiones verticales en el eje X y espesores en el eje Y de manera que el modelo está diseñado en función de parámetros iniciales que podemos cambiar, haciendo del mismo un modelo versátil para diferentes geometrías.

A partir de los keypoints, se forman áreas cuadriláteras (ya que usaremos un elemento paralelepípedo) y se extruyen formando la geometría en volumen. En la siguiente imagen podemos observar la geometría en volumen a falta de las condiciones de contorno por simetría y de las traviesas.

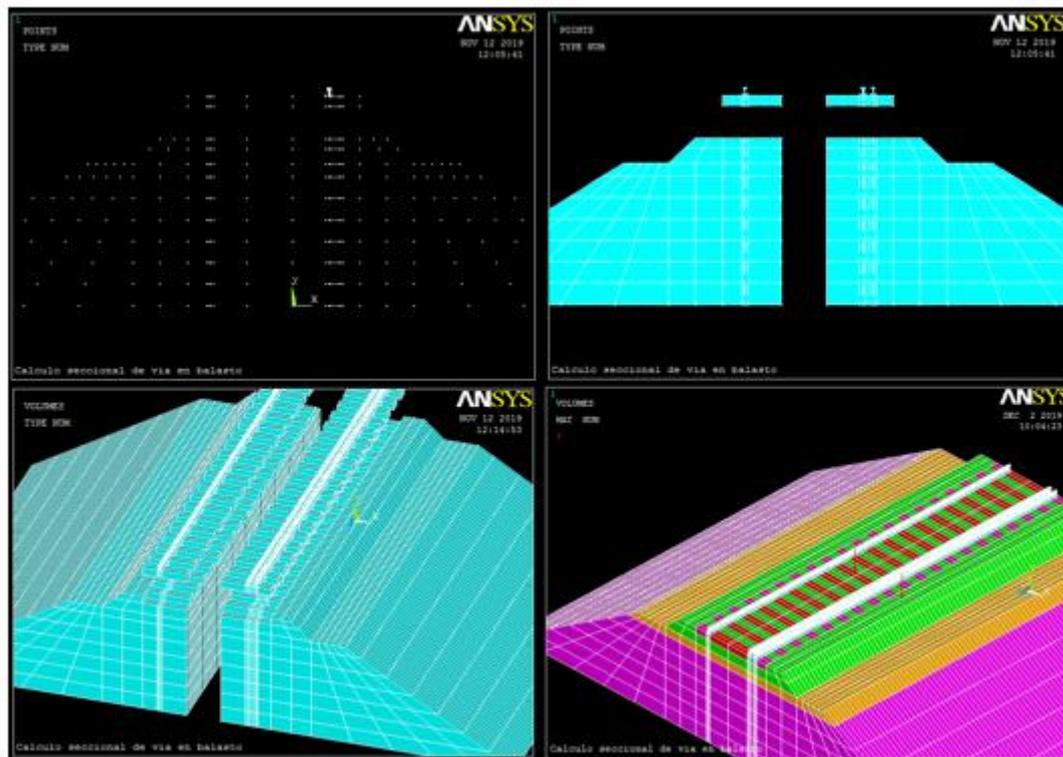


Figura 8. Distintas fases de modelización de la estructura  
Fuente: Ansys APDL.

## 4.4. Características de los materiales a modelizar

### 4.4.1. El carril

Dado que en nuestro estudio buscamos calcular los desplazamientos y deformaciones en puntos alejados del carril y dada la cantidad de nodos que supone modelizar el carril debido a sus distintos radios en su geometría decidimos probar distintas simplificaciones del mismo hasta dar con una solución de compromiso que por una parte fuera capaz de representar al carril, donde aplicaremos las cargas y por otra parte que no supusiese una cantidad excesiva de nodos.

En un principio se pensó en un modelo que representara fielmente el carril, con algunas simplificaciones, pero conservando de alguna manera la forma aproximada del mismo. Se modeló a partir de rectángulos de distintos tamaños.

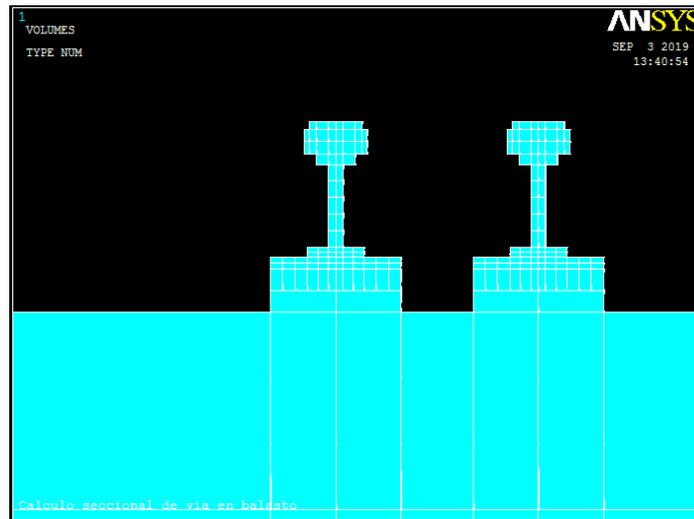


Figura 9. Carril sofisticado.  
Fuente: Ansys APDL.

En la segunda imagen tenemos un carril paralelepípedo formado por un único rectángulo en su sección transversal, el cual constituye un ahorro importante de nodos a la hora de calcular el modelo pero perdiendo en este caso cualquier parecido geométrico con el carril.

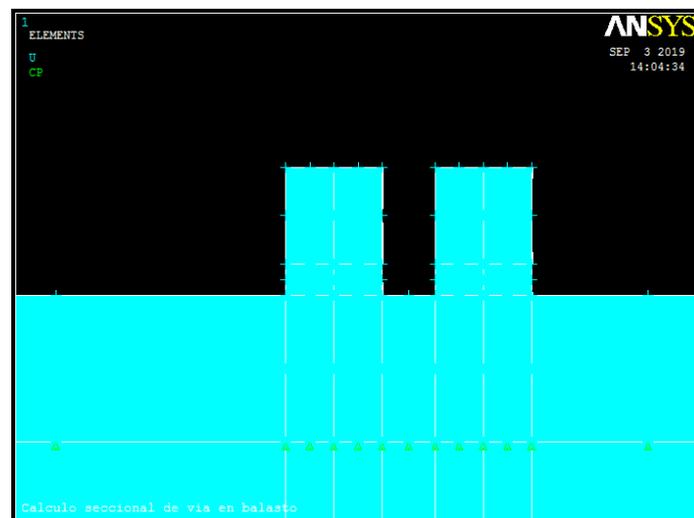


Figura 10. Carril básico.  
Fuente: Ansys APDL.

En la tercera imagen tenemos el modelo que hemos adoptado finalmente con un carril muy básico que constituye una solución de compromiso entre los dos modelos

anteriores. Este modelo es el que más nos convence pues se asemeja a un carril como en el primer modelo y también es bastante sencillo como en el segundo, lo cuál nos permite ahorrar nodos respecto al primer modelo.

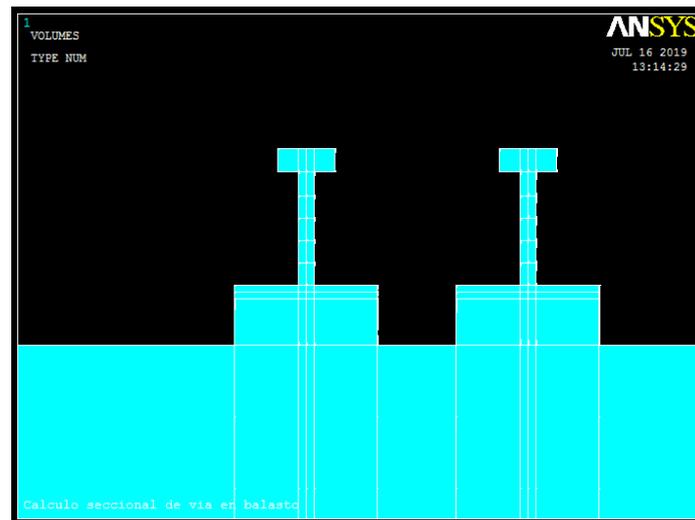


Figura 11. Solución de compromiso para la modelización del carril.  
Fuente: Ansys APDL.

#### 4.4.2. La placa de asiento

La medida de las placas de asiento es de 150 mm por 135 mm correspondiendo el ancho de la placa con el ancho del patín y el ancho de la traviesa. En la realidad las placas son 4 mm más estrechas que el patín y la traviesa para asegurar un mejor ajuste de las sujeciones. En cuanto al espesor de la placa se ha adoptado un valor de 10 mm para que el programa pueda calcular sin ningún tipo de error asociado a relaciones geométricas demasiado pequeñas entre elementos contiguos.

#### 4.4.3. Rigidez de la placa

A continuación, se detallan los cálculos previos a la obtención del módulo de elasticidad de la placa de asiento para el modelo de Ansys:

Tal y como podemos observar en el siguiente recorte de la especificación técnica ET 03.360.570.0 para placas elásticas de asiento de ADIF, las rigideces de placa para una vía convencional se sitúan en un valor comprendido entre 80 y 300 kN/mm en función de las cargas a las que esté sometida.

**RIGIDEZ VERTICAL SECANTE 20/95 KN**

Tras la aplicación de la carga vertical de compresión en las condiciones de ensayo definidas en el apartado 6.8, y antes de la realización del ensayo de resistencia a la fatiga sobre traviesa inclinada, se debe cumplir que la rigidez vertical secante  $K_s$  sea mayor o igual que 80 kN/mm y menor o igual que 125 kN/mm.

$$80 \leq K_s \leq 125 \text{ kN/mm}$$

**RIGIDEZ VERTICAL A 80 KN**

Una vez aplicada la carga vertical de compresión en las condiciones de ensayo definidas en el apartado 6.9, se debe cumplir que la rigidez vertical  $K_t$  en la sexta determinación sea menor o igual que 150 kN/mm.

$$K_t \leq 150 \text{ kN/mm}$$

**RIGIDEZ VERTICAL SECANTE 100/200 KN**

En las condiciones de ensayo definidas en el apartado 6.10, y después de la aplicación de la carga vertical de compresión, se debe cumplir que la rigidez vertical secante  $K_s$  sea menor o igual que 300 kN/mm.

$$K_s \leq 300 \text{ kN/mm}$$

*Figura 12. Valores de rigidez para distintas condiciones de carga  
Fuente: (ADIF, 2005)*

Siendo la rigidez de la vía K según:

$$K = \frac{E * A}{S_1}$$

Donde el área de la placa es de 30\*15 cm y el espesor S1 es de 10 mm.

Para K= 80 kN/mm (valor mínimo referente a cargas ferroviarias normales) - [20 KN]

$$E = \frac{80 * 10}{300 * 150} = 0.0178 \text{ KN/mm}^2 = 1,78 * 10^7 \text{ N/m}^2$$

Para K= 300 kN/mm (valor máximo referente a cargas ferroviarias extraordinarias) – [100-200 KN]

$$E = \frac{300 * 10}{300 * 150} = 0,067 \text{ KN/mm}^2 = 6,37 * 10^7 \text{ N/m}^2$$

El valor del módulo de Elasticidad E para la placa de asiento debería estar comprendido entre 1E7 y 7E7 N/m<sup>2</sup> aproximadamente. En nuestro caso la carga que pasa por encima de la placa es de 100.000 KN aproximadamente y la rigidez de la placa finalmente elegida es de 8E7 N/m<sup>2</sup>, que se corresponde con una rigidez de:

$$K = \frac{E * A}{S_1}$$

$$K = \frac{8E6 * 0,3 * 0,15}{10 * 1E3} = 36 \text{ kN/mm}$$

Que se corresponde con una placa de asiento poco rígida. Este valor es normal dado que la norma anterior no considera la rigidez que le aporta a la estructura el tercer carril. Normalmente se suele compensar una alta rigidez en la superestructura con una baja rigidez en la placa de asiento como pasa en vías en placa, cuyo valor de rigidez de placa de asiento es similar al obtenido en nuestro caso.

#### 4.4.4. La traviesa

La traviesa para ancho mixto, AM-05, monobloque de hormigón pretensado, se representa mediante un modelo paralelepípedo de 30 cm de ancho, 23 cm de alto y 265 cm de largo. Su representación está compuesta por tres submodelos con distinto módulo de elasticidad para emular las distintas secciones de la traviesa, zona central, zona de apoyo de los carriles y extremos (de una forma similar a la aplicada en el modelado de la placa de asiento). En la imagen anterior podemos observar el modelo geométrico empleado distinguiendo cada elemento por colores.

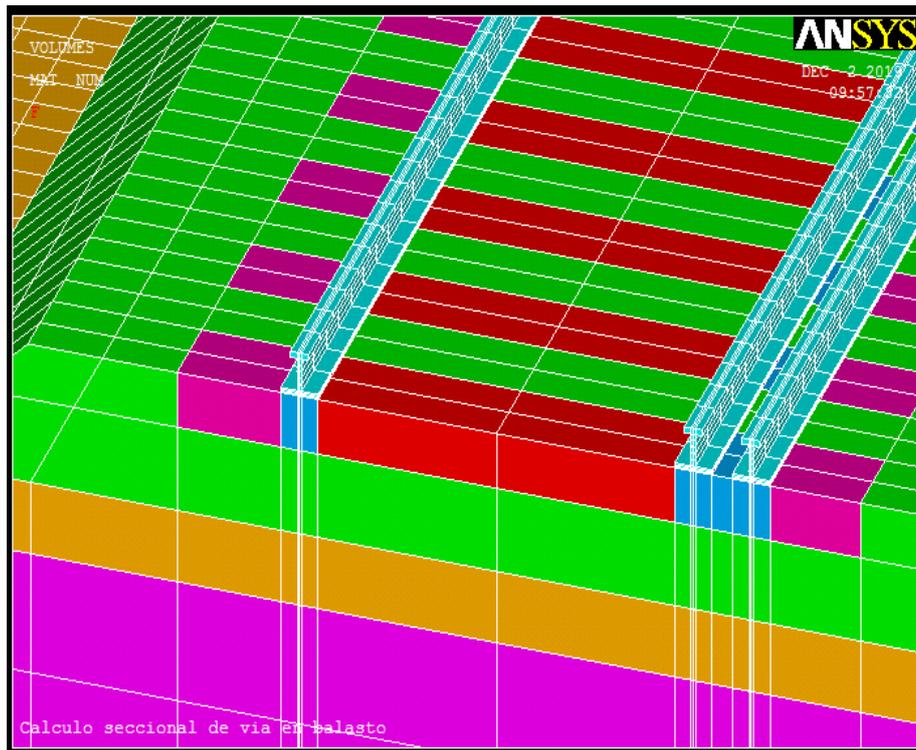


Figura 13. Distintas partes en que se divide la traviesa modelizada.  
Fuente: Ansys APDL.

En el mismo podemos observar que la traviesa se divide en tres partes, cada una de un color distinto correspondiente a la parte central, las partes bajo el carril y las partes extremas.

Esto se debe a la geometría de la misma como podemos observar en la imagen siguiente.

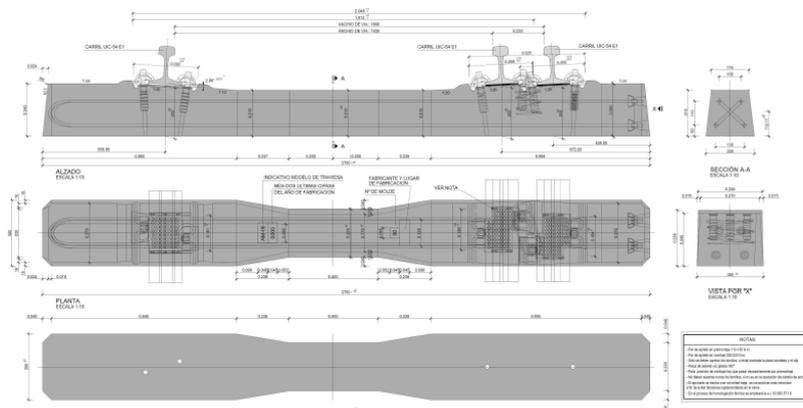


Figura 14. Traviesa polivalente.  
Fuente: (Abril Schliephake, 2013)

La traviesa que hemos modelizado es una traviesa polivalente empleada para el ancho mixto. En la anterior imagen podemos observar como hay una variación en la anchura en la zona central y unas zonas de transición hasta conseguir ese ancho.

#### 4.4.5. El balasto, subbalasto y terraplén

Para el balasto se ha tomado un espesor de capa de 30 cm con un módulo de elasticidad de  $1,3E8$  y un coeficiente de Poisson de 0,2. Para el subbalasto se ha tomado una capa de 30 cm con un módulo de elasticidad de  $1,2E8$  y un coeficiente de Poisson de 0,2. Para el terraplén se ha tomado una capa de 50 cm con un módulo de elasticidad de  $1,4E8$  y un coeficiente de Poisson de 0,4.

#### 4.4.6. Tabla Resumen

Número	Material	Módulo de Elasticidad (Pa)	Coefficiente de Poisson
1	Carril (Acero)	2,10E+11	0,3
2	Placa de asiento	8,00E+06	0,45
3	Traviesa, elemento 1	7,15E+10	0,25
4	Traviesa, elemento 2	5,00E+10	0,25
5	Traviesa, elemento 3	3,62E+10	0,25
6	Balasto	1,30E+08	0,2
7	Subbalasto	1,20E+08	0,3
8	Terraplén	14,00E+07	0,4

Tabla 1. Tabla resumen de las características de los materiales en el modelo  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.7. Las divisiones del terreno

Las divisiones del terreno constituyen una de las variables que podemos cambiar en nuestro modelo para conseguir más puntos donde se calculen los desplazamientos y aceleraciones. Es por ello que hemos hecho una comparativa entre nodos para los distintos carriles y números de divisiones del terreno.

- Número de Divisiones del terreno:

Divisiones terreno	Nº Nodos		
	Carril Básico	Carril sofisticado	Carril Intermedio
4	24491	98529	72282
5	27586	103956	78939
6	30681	109383	85596

*Tabla 2. Nº nodos según el nº divisiones del terreno  
Fuente: elaboración propia*

En la anterior tabla podemos observar como los cambios anteriormente citados respecto al carril suponen la mayor variación de nodos. En cuanto a las divisiones del terreno, no hay una gran variación por lo que será más conveniente elegir las divisiones necesarias que preocuparse por disminuir el número de nodos en este caso.

- Número de traviesas:

Respecto al número de traviesas, necesitamos una cantidad mínima para que el modelo pueda funcionar por lo que se ha elegido 9 como número inferior. El número de traviesas es algo que podemos ir variando con mayor frecuencia que las divisiones del terreno por lo que hemos elegido variarlas de dos en dos y podemos observar que tienen una mayor importancia respecto a las divisiones del terreno en cuanto a nodos se refiere.

Traviesas	Nodos		
	Carril Básico	Carril sofisticado	Carril Intermedio
9	24913	89107	69736
11	30681	109383	85596
13	36449	129659	101456

Tabla 3. Nº Nodos según el nº de traviesas

Fuente: elaboración propia

En la gráfica relativa a esta tabla podemos ver cómo va cobrando aún más importancia cuántos más nodos tiene el modelo. Así en el carril básico hay una variación respecto al número de nodos que se intensifica si nos fijamos en los dos otros modelos en los que la pendiente de la recta es mucho mayor.

#### 4.4.8. Los nodos

Dado que se trata de una estructura tridimensional, para obtener los resultados de los desplazamientos o aceleraciones debemos antes dividir la estructura en unidades más pequeñas para indicarle al programa dónde queremos que se calculen los mismos.

Respecto al número de nodos, es importante señalar que cuántos más se tengan mayor será la precisión en el resultado pero también será mayor el tiempo de cálculo.

Teniendo en cuenta esto, se ha intentado simplificar al máximo la estructura sin comprometer los resultados. Para ello hemos analizado la cantidad de nodos con variaciones en el modelo con tal de encontrar una solución que modelice la estructura sin aumentar en exceso el tiempo de cálculo de la misma.

#### 4.4.9. Mallado

El mallado del modelo es una de las partes más importantes. Antes de generar la geometría se ha de tener en cuenta que los nodos de los elementos están interconectados por líneas.

Las líneas de malla, por otra parte, están referenciadas a unas coordenadas de tal manera que el proceso de mallado busca la representación de cada segmento de la región física por medio de las citadas líneas coordenadas.

Ansys tiene un potente sistema de mallado que puede crear mallas automáticas de la región modelada geoméricamente.

A partir de este mallado, Ansys forma un elemento continuo, identificando a su vez todos los elementos en que se subdivide para afrontar el cálculo por elementos finitos.

#### 4.4.10. Dominio

El modelo actual está formado por 20 traviesas. Por una parte, el modelo no se comporta bien cerca de los contornos por lo que la carga se aplica de forma gradual hasta desarrollarse y se atenúa de la misma manera antes de salir del modelo. En su parte central, según la teoría de Pandolfo, las cargas de los vehículos ferroviarios sobre una traviesa afectan a las 4 traviesas siguientes y las 4 anteriores a la traviesa aplicada.

De esta manera tenemos 8 traviesas en la parte central más 6 a cada lado para poder desarrollar la carga sin problemas en el modelo.

#### 4.4.11. Condiciones de contorno

La traviesa en la realidad está apoyada sobre el balasto, que es un elemento discreto y tiene libres los movimientos en las tres direcciones, a pesar de que está encajonada en el balasto, el cual impide en parte estos movimientos.

En Ansys es posible materializar esas condiciones de contorno, sin embargo, existen varios factores limitantes a tener en cuenta.

En primer lugar, el cálculo del modelo aumenta hasta el punto de no converger.

En segundo lugar, Ansys no permite modelos discretos y continuos a la vez por lo que el balasto no podría modelizarse de acuerdo a la realidad.

Por último, se estima que el balasto que rodea a la traviesa lateralmente contacta con ella alrededor de un 10% y su rozamiento con la misma se desconoce y depende de las condiciones del balasto.

La solución adoptada es la de compatibilizar los materiales en los desplazamientos perpendiculares a las caras de la traviesa sin haber rozamiento entre los desplazamientos contenidos en las caras de la misma. De este modo conseguimos algo más parecido a la realidad, pero sin ser un elemento continuo.

Respecto al resto de condiciones de contorno, se han impedido los desplazamientos verticales en la base del modelo y los desplazamientos en las direcciones de la directriz de la vía y transversales en los contornos. Esta es la razón por la cual la carga se incrementa progresivamente hasta la zona central del modelo y se atenúa antes de salir del mismo.



Figura 15. Condiciones de contorno del modelo.  
Fuente: Ansys APDL.

## 4.5. El modelo de Cargas

### 4.5.1. Parámetros del modelo de carga

Dependiendo de cada tipo de tren se ha de modificar algunos parámetros iniciales del propio modelo de cargas como son la distancia entre ejes, velocidades o carga dinámica (A pesar de que este valor es desconocido y varía mucho los resultados). Otro parámetro fundamental es el timestep, que regula el transcurso de tiempo entre saltos de carga.

### 4.5.2. Aplicación de la carga en el modelo

El modelo de carga modeliza el movimiento de las cargas por rueda de un boggie mediante aplicaciones de la misma en distintos puntos e instantes determinados por la velocidad de cada composición.

Para ajustar la posterior extracción de datos del modelo, de forma que de cada composición se obtengan resultados en los mismos instantes, se ha bloqueado el timestep, correspondiente al incremento de tiempo de salto de la carga de manera que para las distintas composiciones y velocidades se mida siempre a la misma frecuencia, sin cambiar la velocidad de las mismas, con lo que se obtienen registros más largos y más cortos según las velocidades de cada composición.

Para determinar este incremento de tiempo se ha llevado a cabo un ajuste de sensibilidad de la frecuencia de muestreo en el programa, ajustando el orden de magnitud de la frecuencia al medido en campo y comprobando los órdenes de magnitud de las aceleraciones.

Una cuestión importante es que la carga se ha de aplicar en un nodo. Para resolver este problema, en el código de carga se ha programado que en caso de que la carga no caiga sobre un nodo se distribuya proporcionalmente la misma entre los nodos anterior y posterior. Dado

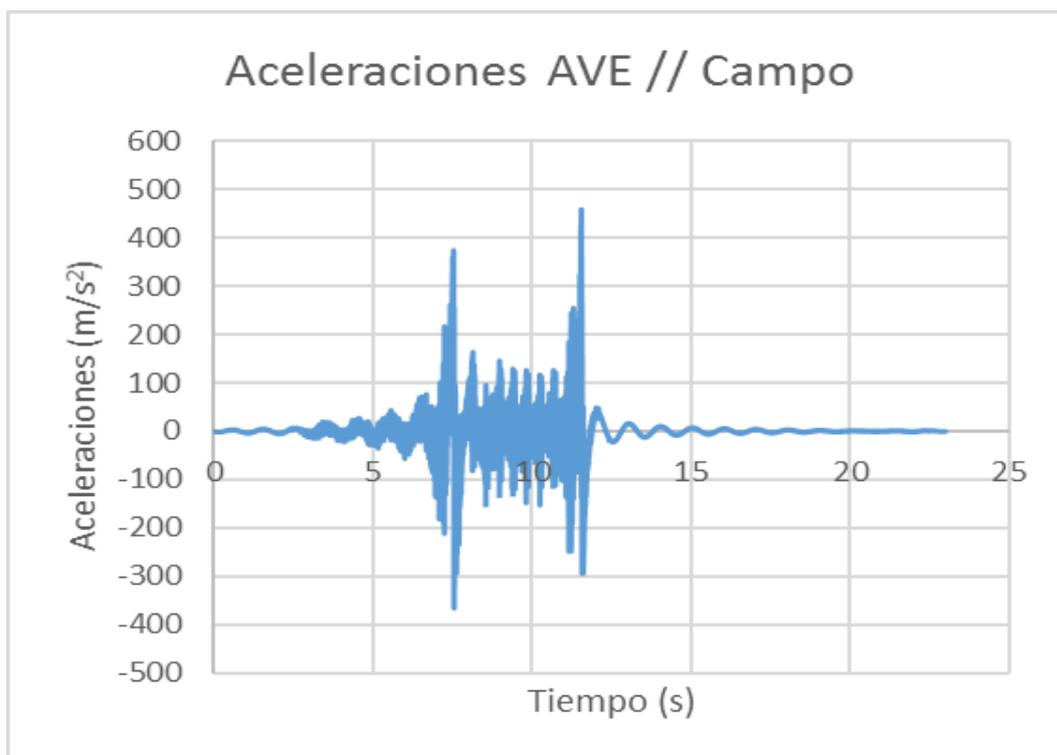
que la velocidad no es un valor proporcional a la separación de los nodos, siempre ocurre que la carga no cae encima de un nodo entre los distintos substeps y ha de dividirse proporcionalmente a la distancia.

### 4.5.3. Tratamiento de Datos medidos en campo

Las señales medidas en campo constituyen registros de 35 segundos de duración a 4.000 Hz de frecuencia con lo que se miden un total de 140.000 datos de aceleraciones por registro.

Estos registros los cortamos en Matlab y los filtramos para eliminar aceleraciones correspondientes a frecuencias muy altas o muy bajas (no características de los elementos de la vía).

En el caso del AVE lo hemos cortado pasando de 35 a 23 segundos, representando un total de 92.000 puntos.



*Figura 16. Aceleraciones para el AVE medidas en campo  
Fuente: Elaboración propia*

Para poder realizar la transformada de Fourier, Excel nos permite un máximo de 4096 puntos por lo que ajustamos el registro para poder obtener el espectro de aceleraciones del paso de

un boggie sobre la vía y poder compararlo con el registro que se obtiene de Ansys; también de un solo boggie.

En la siguiente ilustración hemos seleccionado el paso de un boggie intermedio de 0,5 s de duración (desde el segundo 9,1 al segundo 9,6) teniendo un total de 2400 datos medidos a 4.000 Hz, con lo que ya podemos obtener su correspondiente espectro.

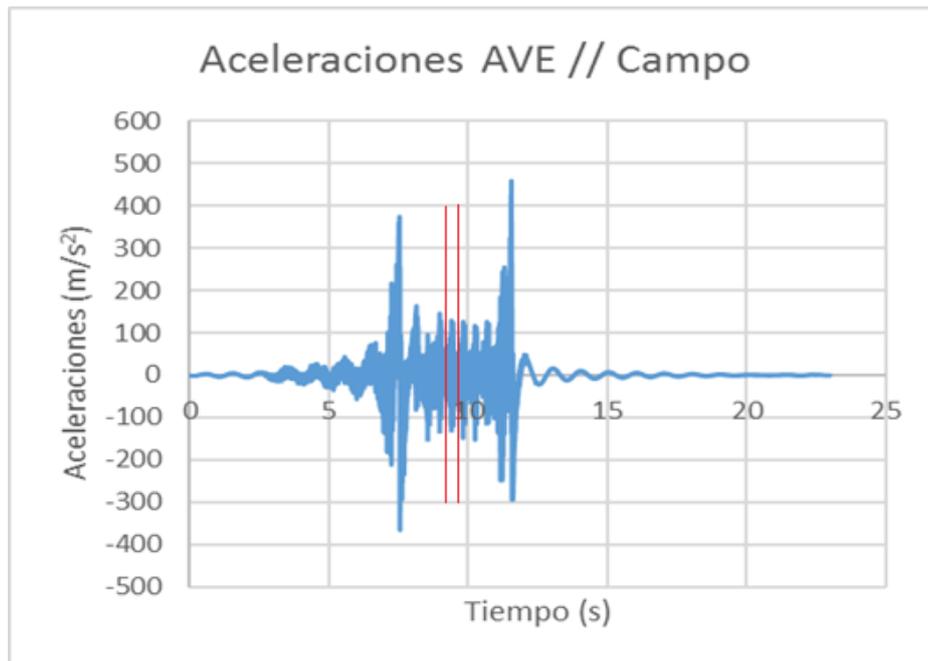


Figura 17. Tiempo de comparación para las aceleraciones en el caso del AVE medidas en campo  
Fuente: Elaboración propia

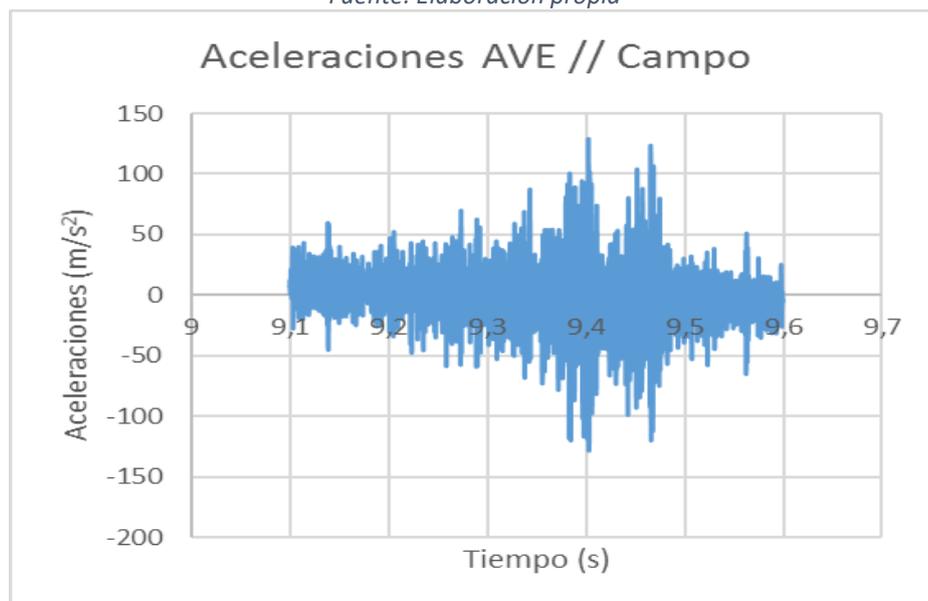
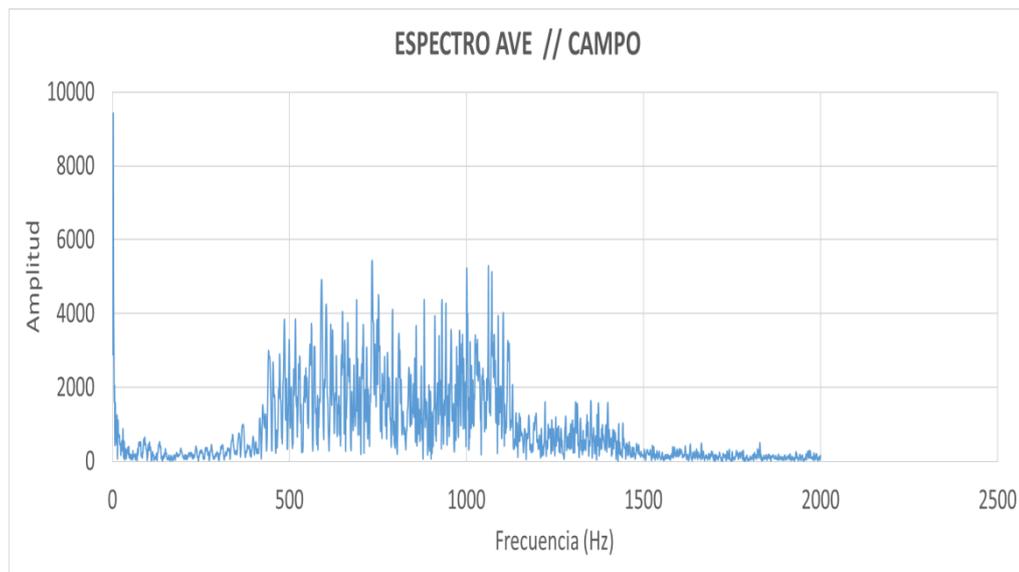


Figura 18. Aceleraciones para el AVE medidas en campo entre los segundos 9,1 y 9,6.  
Fuente: Elaboración propia



*Figura 19. Espectro de frecuencias para las aceleraciones de AVE medidas en campo  
Fuente: Elaboración propia*

Tal y como vemos en el espectro no hay aceleraciones con frecuencias representativas entre 1500 y 2000Hz con lo que podemos comparar los resultados medidos en Campo a 4000Hz con los obtenidos del programa a 3000Hz.

## 5. Campaña de mediciones

En este capítulo se describe la campaña de mediciones que se llevó a cabo en el Corredor Mediterráneo en un tramo situado entre las estaciones de Massalfassar y El Puig, en la vía de ancho mixto correspondiente al tramo más alejado a la costa. La campaña se realizó durante los días 12 y 13 de junio de 2019.

El objetivo del conjunto de mediciones es obtener datos reales relativos a aceleraciones y desplazamientos inducidos al paso de distintas composiciones en una vía de ancho mixto.

El fin último de estas mediciones es calibrar y validar los modelos analíticos y numéricos realizados, con el fin de estudiar los efectos que producen estas vibraciones y sobrecargas dinámicas en la infraestructura.

En los posteriores apartados se describe de manera más detallada la campaña de mediciones ya introducida y, por otro lado, se presentan aspectos relacionados con la instrumentación empleada en el transcurso de estos trabajos.

## 5.1. Emplazamiento

Las mediciones se llevaron a cabo en el tramo comprendido entre las estaciones de Massalfassar y el Puig, más concretamente en las inmediaciones del PK 20+000 km situado en las proximidades de la estación de Massalfassar.



*Figura 20. Emplazamiento de la zona de mediciones.  
Fuente: Google Earth*

## 5.2. Tipo de trenes

Se llevaron a cabo mediciones para las siguientes composiciones, siendo sus principales características las indicadas en la siguiente tabla:

TRENES	CARACTERÍSTICAS		
	Vmáx (km/h)	Distancia entre ejes (empate)(m)	Peso por eje (t)
Ave (Serie 100)	300	3	17,2
Civia (Serie 462)	120	2,5	13
Euromed (Serie 130)	220	2,8	18
Mercancías (Serie 335)	120	2,5	20,8
Cercanías (Serie 447)	120	2,5	14

Tabla 4. Características técnicas de los trenes medidos en campo.

Fuente: Elaboración propia

Trenes	v [km/h]
AVE1 SERIE 100	158
CIVIA	119
Euromed	163
Mercancías	100
Cercanías 447	28

Tabla 5. Velocidades medidas en campo para los distintos trenes.

Fuente: Elaboración propia

En la segunda tabla podemos ver las velocidades que se midieron para las distintas composiciones. En el caso del cercanías, tiene una velocidad tan baja porque paraba en la estación contigua a la zona de medición.

Las limitaciones de velocidad son de 160 km/h para el AVE y Euromed, 100 km/h para el mercancías y 120km/h para el cercanías.

### 5.3. Evaluación de las acciones dinámicas: Criterio de Eisenmann

La evaluación de las acciones dinámicas a altas velocidades en una vía de ferrocarril supone uno de los principales problemas en el dimensionamiento de estructuras ferroviarias. Para estimar las cargas a las que está sometida la estructura, se ha de considerar el peso de los vehículos (con la incertidumbre que supone cuanta carga

están transportando) y velocidad de los mismos, ya que se produce una variación de la sobrecarga sobre la estructura debida a la interacción dinámica entre la vía y las composiciones.

La razón de estas variaciones en la sobrecarga se debe a irregularidades en el perfil de rodadura y el estado de las composiciones.

En 1969, Eisenmann asoció la dispersión de los valores medios de las cargas dinámicas a una distribución normal, introduciendo el factor de seguridad estadística como una variable más a tener en cuenta y propuso una formulación que determina el coeficiente de mayoración dinámica, considerando el estado de la vía y el intervalo de confianza asociado a la distribución.

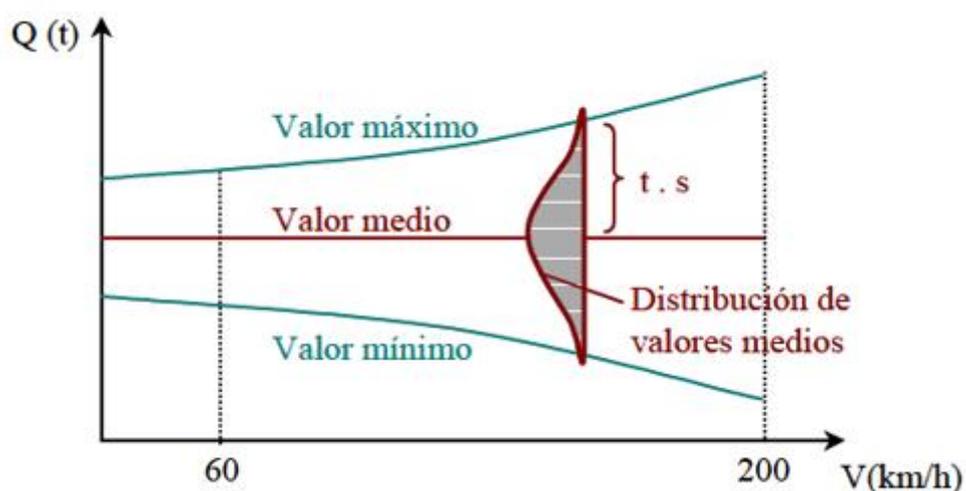


Tabla 6. Dispersión de los valores medios de carga dinámica.  
Fuente: Eisenmann (1970)

La formulación propuesta por Eisenmann para el cálculo del coeficiente de mayoración es la siguiente:

$$C_d = 1 + t \cdot s \cdot \phi$$

Siendo:

t, el factor de seguridad estadística, que puede tomar los siguientes valores dependiendo del intervalo de dispersión máxima al que se pretende calcular.

- $t = 1$  para un 68,3% de valores medidos.
- $t = 2$  para un 95,9% de valores medidos.
- $t = 3$  para un 99.7% de valores medidos.

s, el factor dependiente de la calidad de la infraestructura de la vía, que puede tomar los siguientes valores:

- $s = 0,1$  para una vía en muy buen estado.
- $s = 0,2$  para una vía en buen estado.
- $s = 0,3$  para una vía en mal estado.

$\phi$ , el factor dependiente de la velocidad de circulación, que puede tomar los valores siguientes:

- $\phi = 1$  para  $V \leq 60$  km/h.
- $\phi = 1 + \frac{V - 60}{140}$  para  $60 < V < 200$  km/h.
- $\phi = 1 + \frac{V - 60}{380}$  para  $V > 200$  km/h.

$C_d$ , el factor de amplificación dinámica de la carga

La carga dinámica  $Q_d$  se obtiene multiplicando el factor de amplificación dinámica  $C_d$  obtenido anteriormente por la carga estática  $Q_e$ :

$$Q_d = C_d * Q_e$$

## 5.4. Cálculo de la carga dinámica

Para el cálculo de la mayoración de la carga estática debemos conocer las velocidades de cada composición para obtener el factor dependiente de la velocidad de circulación  $\phi$  y la carga estática por rueda  $Q_e$ .

Para no obtener un valor demasiado elevado en cuanto a la dispersión de los valores medios de carga dinámica hemos decidido aplicar el intervalo de seguridad estadística correspondiente al 63% de los valores ya que no nos interesa la carga dinámica pico

que podamos tener en la vía sino la carga dinámica media asociada a la carga estática de cada composición.

El estado de la infraestructura era bueno, por lo que hemos aplicado el factor  $s$  para vías en buen estado. El factor dependiente de la velocidad de circulación se ha calculado teniendo en cuenta que las velocidades no sobrepasaban los 200 km/h y es que estaban restringidas a 160 km/h por tratarse de una vía de ancho mixto.

Criterio Eisenmann	
$t$	1
$s$	0,1
$\phi$	1,7375
$C_d$	1,17375

Tabla 7. Valores para el criterio de Eisenmann  
Fuente: Elaboración propia

Con todo esto las cargas dinámicas por rueda quedarían como se muestra en la siguiente tabla, siendo estas un 17% mayor que las cargas estáticas por rueda.

Tipo Tren	$v$ (km/h)	Peso por eje (t)	$Q_e$ /rueda (KN)	$Q_d$ /rueda (KN)
AVE	158	169	85	99
Civia	119	128	64	75
Euromed	163	177	89	104
Mercancías	100	204	102	120
Cercanías 447	28	139	70	82

Tabla 8. Valores de carga dinámica para cada composición  
Fuente: Elaboración propia

## 5.5. Rigidez de la placa de asiento asociada

Para la obtención de la rigidez de la placa de asiento medida en campo dividimos la carga dinámica por rueda correspondiente a cada composición obtenida anteriormente por el asiento de la placa correspondiente.

Tipo Tren	Qd/rueda (KN)	Asiento Placa (mm)	Kplaca (KN/mm)
AVE	99	0,45	220
Civia	75	0,8	94
Euromed	104	0,6	173
Mercancías	120	0,9	133
Cercanías 447	82	-	-

Tabla 9. Valores de rigidez de la placa para cada composición.

Fuente: Elaboración propia

Para el caso del Cercanías 447 no se obtuvo un buen registro de los asientos y por tanto no se ha podido determinar la correcta rigidez de la placa.

## 5.6. Instrumentación

La instrumentación empleada fue la siguiente:

Acelerómetros piezoeléctricos:

Compuestos por un disco formado por un cristal con características piezoeléctricas. Dicha característica dota al cristal de la propiedad de generar un diferencial de potencial entre sus dos superficies proporcional a la tensión mecánica a la que esté sometido.

Acelerómetros capacitivos:

Se construyen de manera que una de las dos placas de los condensadores pueda moverse de forma proporcional a la fuerza externa. De esta forma se obtienen variaciones en la señal eléctrica proporcionales a la fuerza aplicada y, por lo tanto, a la aceleración. Tienen la ventaja de poder medir aceleraciones desde 0Hz hasta varios cientos de Hz, por lo que se suelen emplear para aplicaciones de baja o muy baja frecuencia.

Distanciómetros:

Miden el diferencial de longitud entre su posición inicial y en la posición en cada instante.

Tienen un ajuste electromagnético que nos permite colocarlos en el alma del carril y una punta telescópica que mide el desplazamiento. Registran dichos valores a una frecuencia de 4000Hz.

De cada uno de los sensores parte un cable de unos 20 m de longitud que transfiere los registros al sistema de adquisición de datos, que se haya conectado a un ordenador portátil.



Figura 21. Acelerómetros piezoeléctricos en carril y traviesa  
Fuente: Elaboración propia

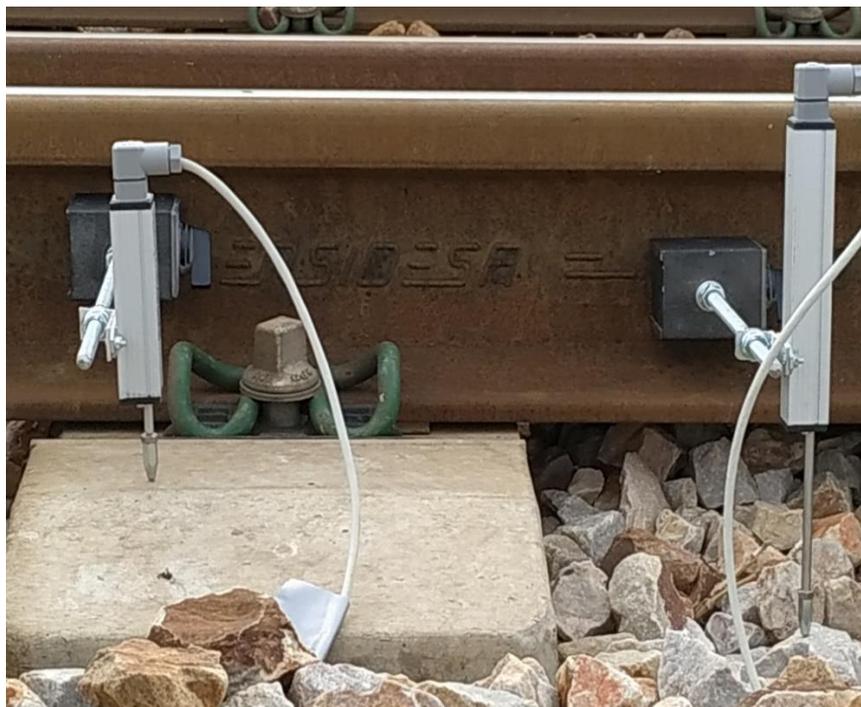
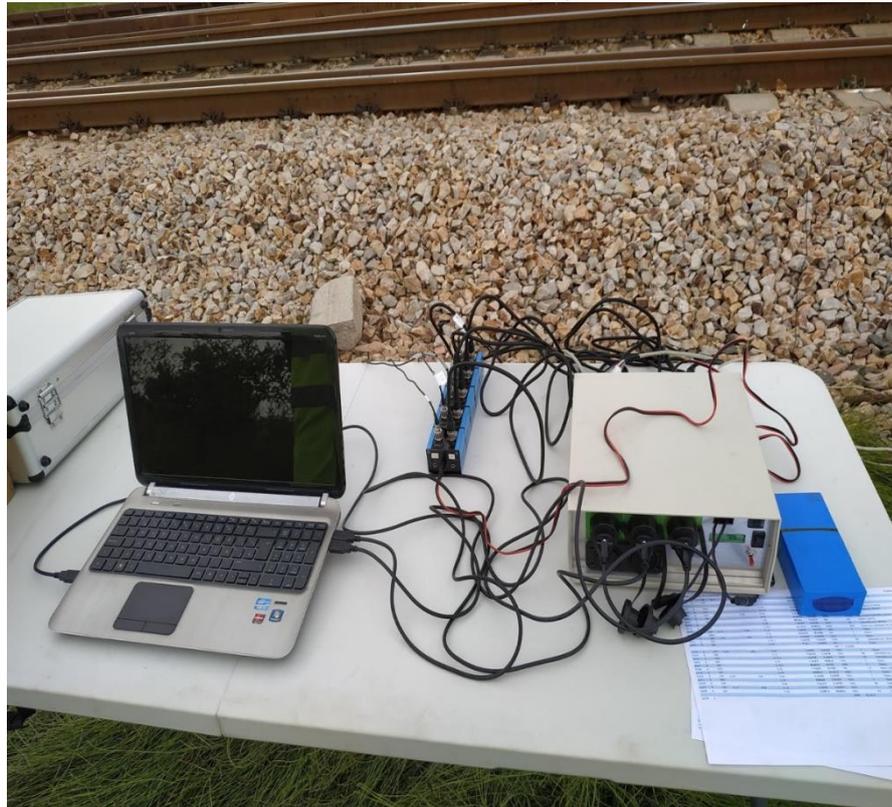


Figura 22. Distanciómetros carril-traviesa y carril-balasto

*Fuente: Elaboración propia*



*Figura 23. Equipos de medición complementarios.  
Fuente: Elaboración propia*

## 5.7. Extracción de datos

Para la extracción de datos se usó primeramente un programa específico para la transformación del formato de datos medidos de formato BIN a ASCII. El programa en cuestión es el DAQ-NAQ. Esta transformación nos permite la manipulación de los datos tanto en Matlab para su filtrado como en Excel para su representación.

Análisis del comportamiento estructural de una vía de doble ancho. Aplicación al Corredor Mediterráneo, en la línea de cercanías C5 y C6 entre las estaciones Massalfassar y El Puig.

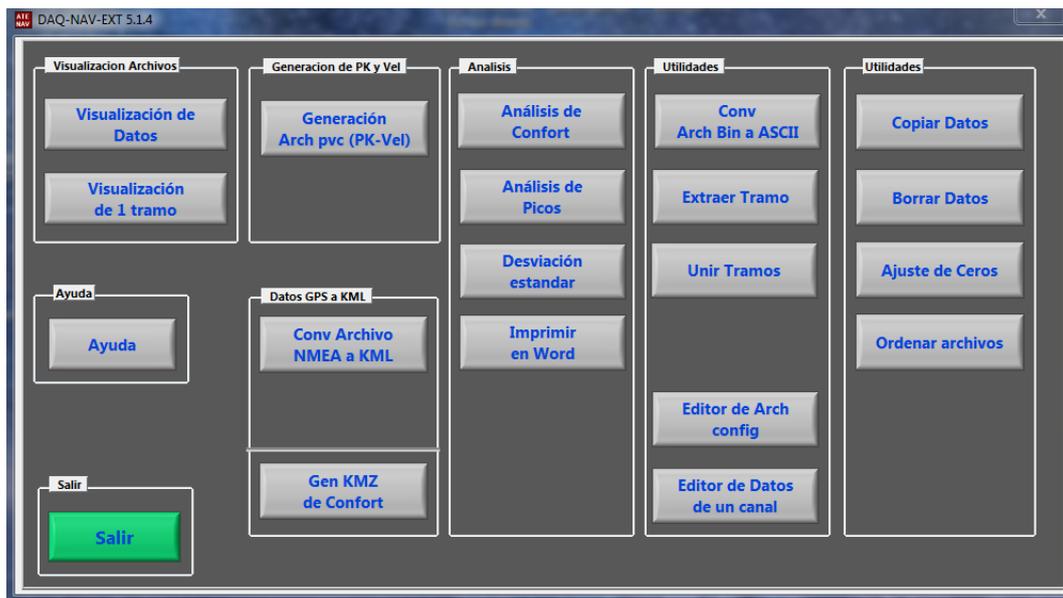


Figura 24. Programa para la conversión de datos a formato texto  
Fuente: DAQ-NAV

## 5.8. Tratamiento de datos

Una vez obtenidos dichos datos se han filtrado según la problemática detectada mediante filtros de frecuencias que eliminan frecuencias asociadas a ondas no relacionadas con la vía como puede ser el ruido o interferencias con ondas de baja o alta frecuencia, usando filtros de paso alto o paso bajo respectivamente.

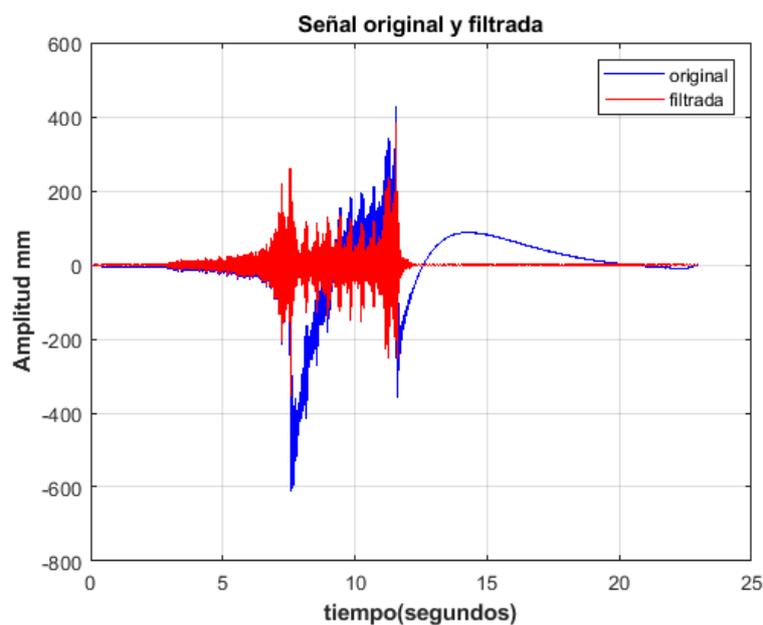


Figura 25. Filtrado de señal  
Fuente: Matlab

### 5.8.1. Duración y tamaño de los registros

Cuando calculamos por elementos finitos un modelo de una gran cantidad de nodos, el tiempo de cálculo y la capacidad de los ordenadores con los que trabajamos son una variable más a tener en cuenta.

Para nuestro ajuste de timestep (incremento de tiempo de salto de la carga) y las diferentes composiciones hemos obtenido los siguientes resultados:

Tipo Tren	Duración de cálculo (horas)	Tamaño (GB)	v (km/h)
AVE	3	87	158
Civia	4	111	119
Euromed	3	84	163
Mercancías	4,5	130	100
Cercanías 447	16,5	480	28

*Tabla 10. Duración de cálculo del modelo y tamaño de los archivos de resultados*

*Fuente: Elaboración propia*

Como podemos observar la capacidad de un cálculo a una velocidad normal en este tipo de vías ronda los 90 GB. En el caso del cercanías cuya velocidad, que paraba en la estación de Massalfassar, el cálculo conlleva alrededor de 16 horas y una capacidad aproximada de medio TB.

## 6. Cálculo Mediante Ansys

### 6.1. Análisis de sensibilidad

Teniendo en cuenta el funcionamiento del modelo anteriormente explicado, el hecho de que podamos aumentar los substeps y llegar a frecuencias de muestreo mayores no nos aportará información relevante para nuestro estudio ya que las aceleraciones que se obtendrían corresponderían a frecuencias muy elevadas no significativas.

Antes de proceder con el cálculo de desplazamientos y aceleraciones mediante Ansys APDL es necesario afinar los resultados que extraeremos del programa. Para ello calcularemos unos primeros resultados moviendo la carga con la mayor continuidad posible sobre la vía, de modo que la gráfica resultante de desplazamientos o aceleraciones tenga suficientes puntos como para representar la mayor parte de valores extremos con la suficiente precisión.

## 6.2. Ajuste de los Substeps

La oscilación de los desplazamientos verticales en una vía de ferrocarril se comporta como una onda y por tanto sigue la siguiente expresión:

$$y = \text{sen} (wt)$$

Donde  $w$  es la frecuencia angular de valor:

$$w = 2\pi f$$

Y  $f$  es la frecuencia de muestreo, que depende del timestep en nuestro modelo.

El timestep es un parámetro que ajusta el incremento de tiempo entre saltos de carga en el modelo. En cuanto al espacio, la carga salta al espacio correspondiente determinado por la velocidad de cada composición.

Dado que la velocidad es la variación del espacio respecto del tiempo y la aceleración es la variación de la velocidad respecto al tiempo,

$$v = \frac{dy}{dt} = w \cdot \cos (wt)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -w^2 \cdot \text{sen} (wt)$$

Tenemos que:

$$a = -w^2 \cdot y$$

Y por tanto el desplazamiento y es igual a:

$$y = \frac{a}{-w^2}$$

Es decir, si la frecuencia asociada a una aceleración es muy elevada, esta produce un desplazamiento muy pequeño. En nuestro caso, dado que los desplazamientos no varían con un aumento de frecuencia (ver gráfica siguiente), significa que con un SUBSTEP de 100 en nuestro modelo ya somos capaces de captar los desplazamientos significativos. Las aceleraciones a baja frecuencia son las que producen desplazamientos significativos (véase la fórmula anterior).

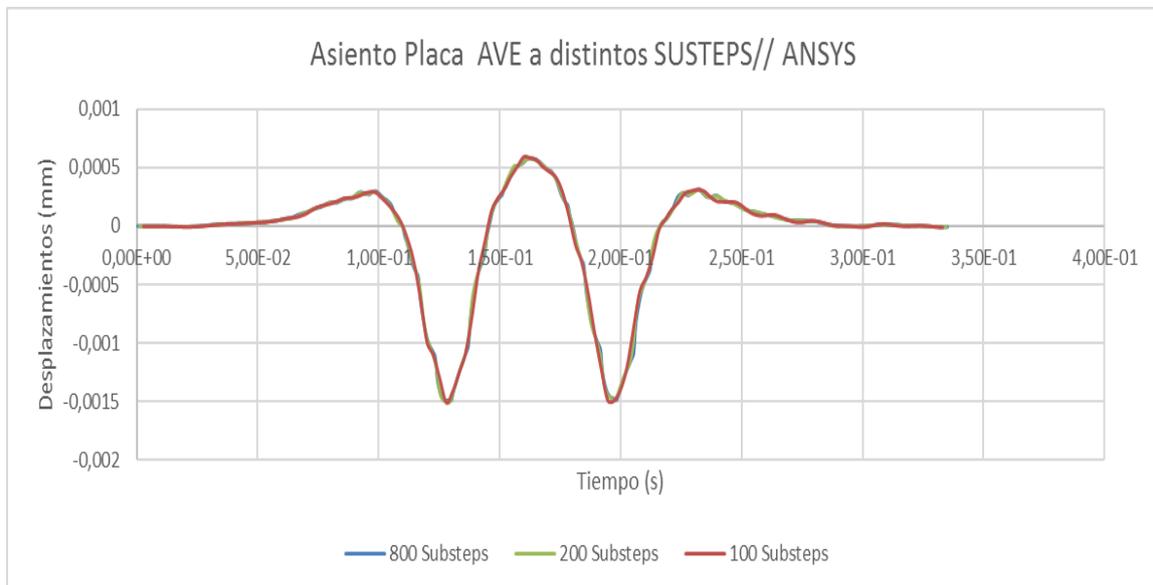


Figura 26. Asiento de placa para el AVE a distintos Substeps  
Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, a pesar de que 100 SUBSTEPS son suficientes para captar todos los desplazamientos significativos, para ajustar la frecuencia debemos fijarnos en qué queremos analizar y en la información que nos dan las aceleraciones y sus respectivos espectros ya que a una frecuencia muy baja no podríamos identificar fenómenos de resonancia o como se excitan los distintos armónicos correspondientes a cada componente de la vía.

Es importante resaltar que cada aceleración tiene una frecuencia y que subiendo los substeps obtendremos picos de aceleración cada vez mayores. Para saber que aceleraciones son representativas y poder comparar aceleraciones debemos hacerlo a la misma frecuencia.

### 6.3. Ajuste de la placa

A continuación se procede a la comparativa de deformaciones entre placas con distintas rigideces:

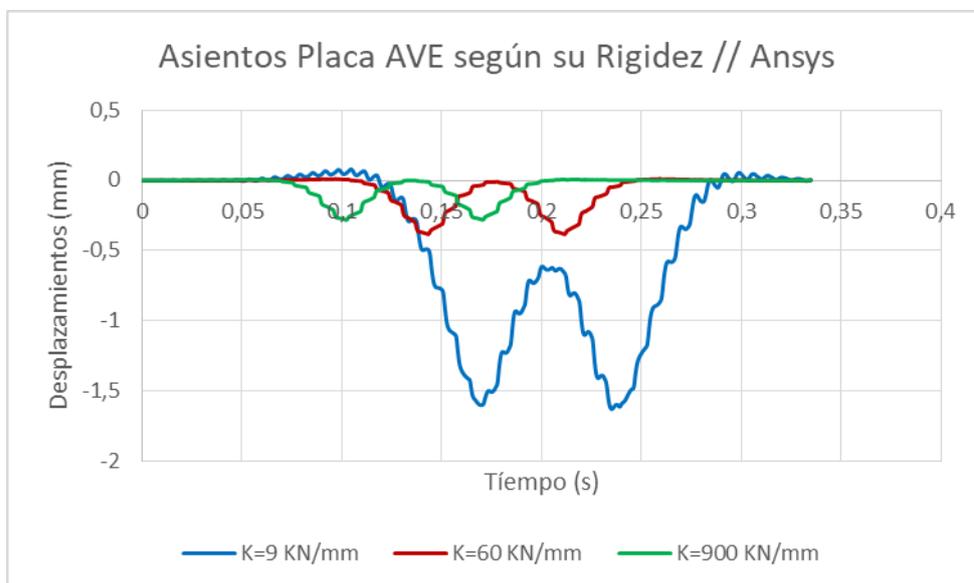


Figura 27. Asientos placa AVE según distintas rigideces  
Fuente: Elaboración propia

La deformación total de una vía de doble ancho ante el paso de un tren de alta velocidad ronda 1 mm de deformación total (1,2 mm medido por ADIF) siendo la deformación de la capa de balasto de un 50% y otro 50% la de la placa de asiento.

Como podemos observar, la placa de asiento con una rigidez de 5,4 KN/mm da unas deformaciones de 1,6 mm que son demasiado elevadas, por otro lado, la rigidez considerada de la placa de asiento también es muy baja.

Con una placa de 54 KN/mm las deformaciones son de 0,3 mm aproximadamente, lo cual está dentro del orden de magnitud, aunque la placa considerada es más rígida de

lo normal y las deformaciones a su vez son más pequeñas, lo cual indica que el modelo tiende a unas deformaciones y placas razonables.

Finalmente, para una rigidez de 36 KN/mm obtenemos unas deformaciones razonables y dentro del orden de magnitud que concuerdan con el hecho de que emparrillados más rígidos deben tener placas de asiento más flexibles para un buen funcionamiento de la vía.

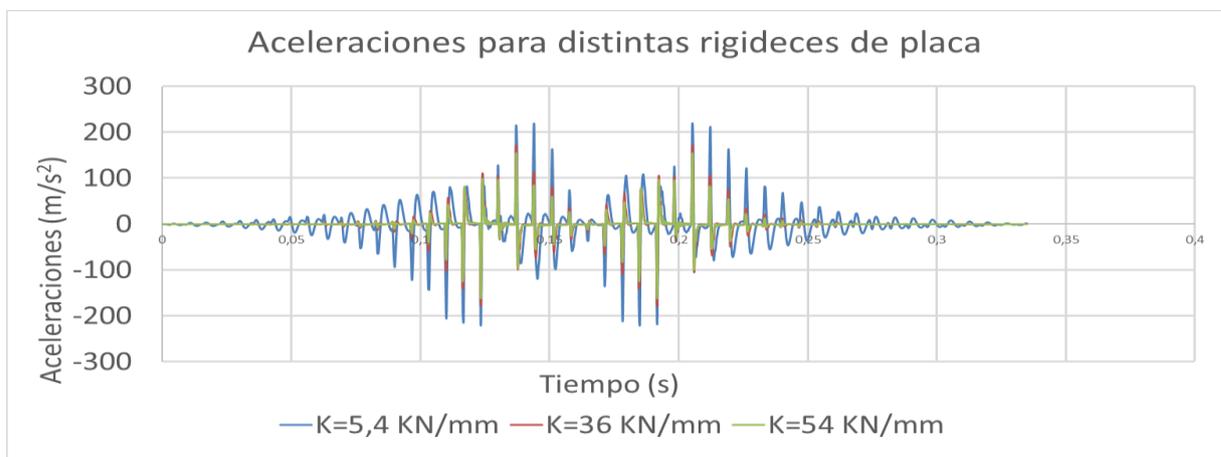


Figura 28. Aceleraciones AVE para distintas rigideces de placa  
Fuente: Elaboración propia

Respecto a las aceleraciones para las distintas placas, la placa de rigidez 54 KN/mm tiene valores más próximos a las aceleraciones medidas en campo, sin embargo, no funciona bien para los desplazamientos con lo que nos decantamos por la placa de rigidez intermedia que da buenos valores tanto para desplazamientos como para aceleraciones.

## 6.4. Tensiones en el balasto

Las tensiones en la capa de balasto obtenido mediante Ansys se pueden observar de forma gráfica en la siguiente imagen. La pisada sobre el balasto es irregular debido al tercer carril y, por tanto, debido a esta asimetría, las

tensiones en la capa de balasto son asimétricas, provocando un desgaste mayor en el lado donde se encuentran los dos carriles.

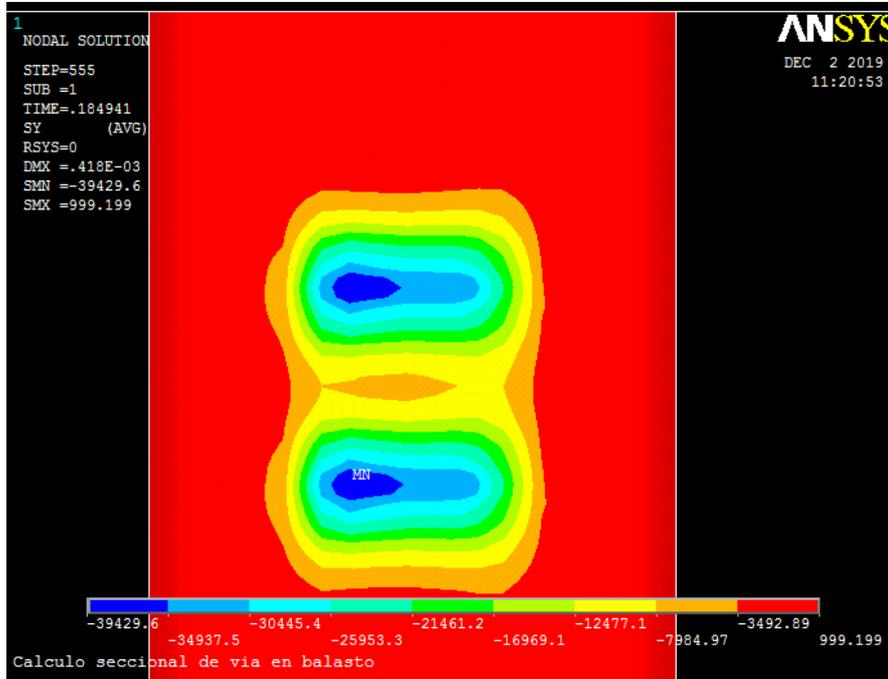


Figura 29. Tensiones en el balasto para el AVE  
Fuente: Ansys APDL.

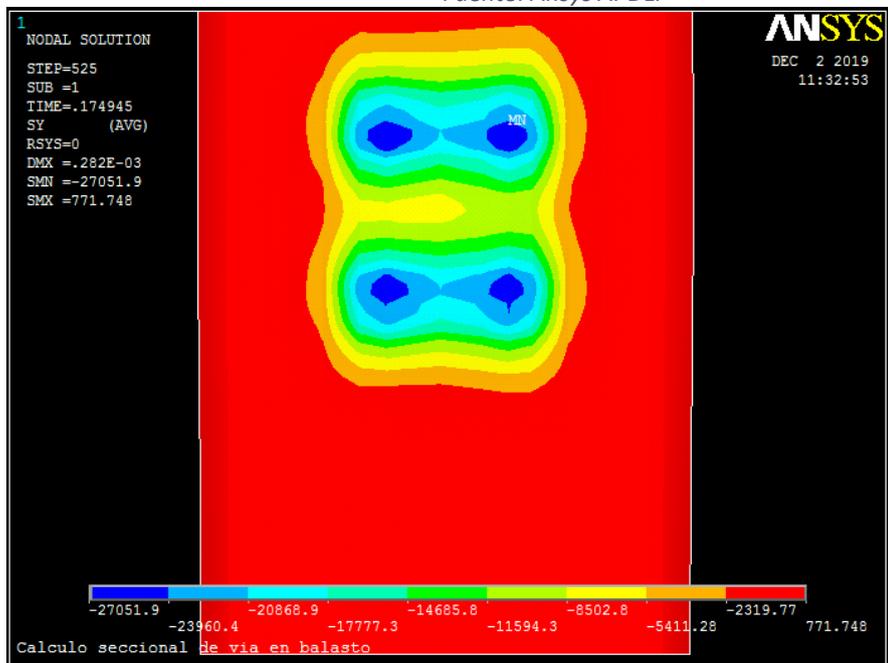


Figura 30. Tensiones en el balasto para el Civia  
Fuente: Elaboración propia

## 6.5. Medición en Ansys

# 7. Comparativa de resultados Campo-Modelo

En el siguiente apartado se presentarán y explicarán los resultados fruto de la comparación de las aceleraciones en el carril y los asientos de la placa de asiento para las distintas composiciones medidas en campo con las obtenidas mediante el modelo de Ansys.

Las gráficas obtenidas representan en naranja la medición en campo y en azul la del modelo tal y como se indica en la leyenda. La señal de campo fue medida como comentamos en apartados anteriores en registros de unos 35 segundos.

Cuando observamos una señal sin ampliar podemos ver algunos defectos asociados a ondas de baja frecuencia o defectos en la medición de desplazamientos como puede ser apoyo deficiente de la instrumentación.

En los siguientes casos hemos recortado las señales medidas en campo, representado alrededor de 1 segundo de medición, que se corresponde con el paso de un par de boggies y se ha comparado con los resultados obtenido de Ansys para un solo boggie, con lo que se ha duplicado la señal correspondiente a los resultados de Ansys para adaptarla a la de campo y simular un registro continuo. No es posible obtener mediante Ansys señales de tanta duración como las de campo (registros completos del paso de las composiciones) debido al tiempo de cálculo del programa y el tamaño de los archivos de resultados.

## 7.1. AVE

En el caso de trenes de alta velocidad se ha medido en campo datos de aceleraciones en la parte superior del patín del carril, más concretamente en la cara interior del carril internacional, y desplazamientos entre el alma del carril en su cara interior y la cara superior de la traviesa, de modo que las variaciones medidas se corresponden con el asiento de la placa.

Respecto a las aceleraciones podemos observar cómo se comportan de la misma manera y están dentro del orden de magnitud de las aceleraciones medidas en campo. El modelo se comporta adecuadamente. No tiene sentido entrar a comparar magnitudes y medir

posibles errores del modelo respecto a la realidad ya que existe una gran incertidumbre con respecto a la magnitud de la carga de las composiciones y el estado real de la vía, apriete de las sujeciones, etc.

Respecto a la diferencia de frecuencia de medición en campo y la de Ansys (4000 y 3000Hz respectivamente), podemos observar del espectro de aceleraciones como en el rango de frecuencias entre 1500 Hz y 2000 Hz correspondientes a la frecuencia máxima no se obtienen amplitudes significativas. Esto significa que no hay aceleraciones significativas asociadas a dichas frecuencias y podemos comparar ambos registros a pesar de la diferencia de frecuencia de muestreo

En cuanto a los desplazamientos, se ha obtenido un buen registro de campo y se han podido comparar sin problemas. El modelo reproduce bien los desplazamientos y está dentro del orden de magnitud. Se han medido unos asientos de alrededor de 0,4mm que se ajustan a los asientos medidos pos ADIF para una vía convencional.

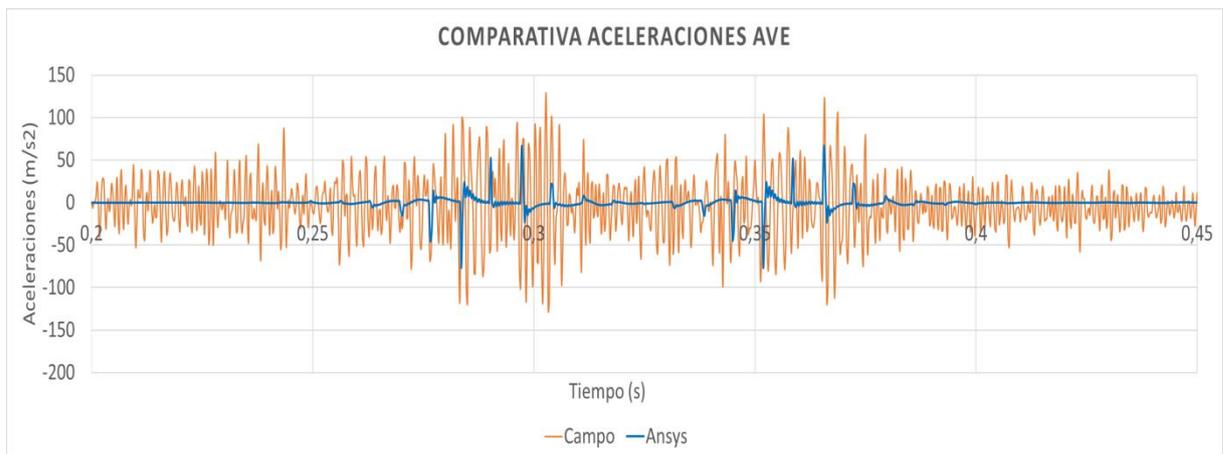


Figura 31. Comparativa aceleraciones AVE  
Fuente: Elaboración propia



Figura 32. Comparativa asientos de placa AVE  
Fuente: Elaboración propia

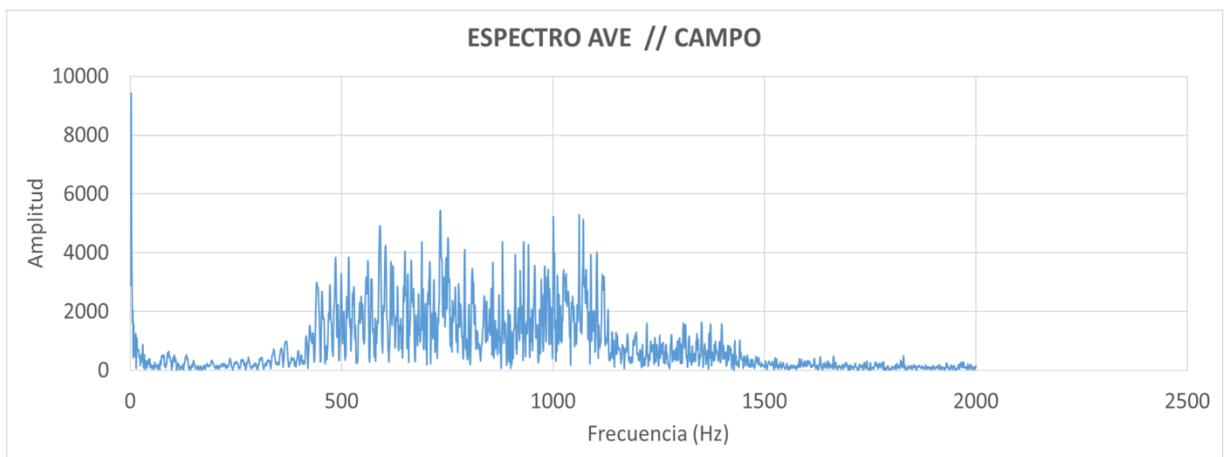


Figura 33. Espectro de frecuencia AVE medido en campo  
Fuente: Elaboración propia

## 7.2. CIVIA

En este caso las mediciones se han realizado de la misma manera que hemos comentado en el Civia pero esta vez desde la cara exterior del carril ibérico. Las aceleraciones en este caso mediante Ansys no están bien calibradas en sus valores extremos. Los valores medios sí que están dentro del orden de magnitud, sin embargo los picos de aceleraciones obtenidos son del orden del doble de los registrados en campo.

En cuanto a los desplazamientos, la medición no ha salido bien, registrando picos positivos cuando deberían ser negativos en la parte correspondiente al eje del primer boggie.

Además de esto la señal no registra nada en 4 segundos de diferencia entre boggie y boggie lo cuál nos da a entender que ha habido algún problema en la medición de desplazamientos.

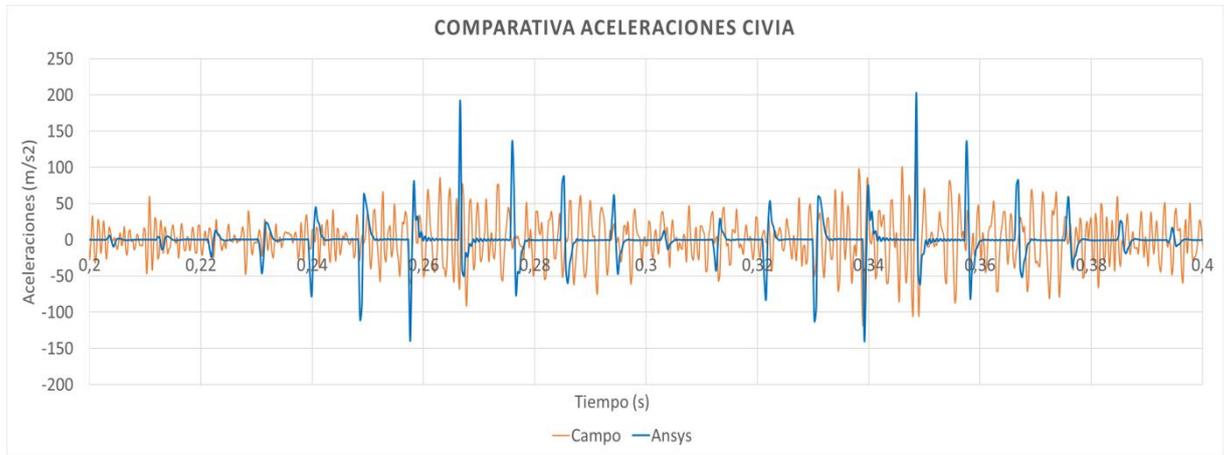


Figura 34. Comparativa aceleraciones Civia  
Fuente: Elaboración propia

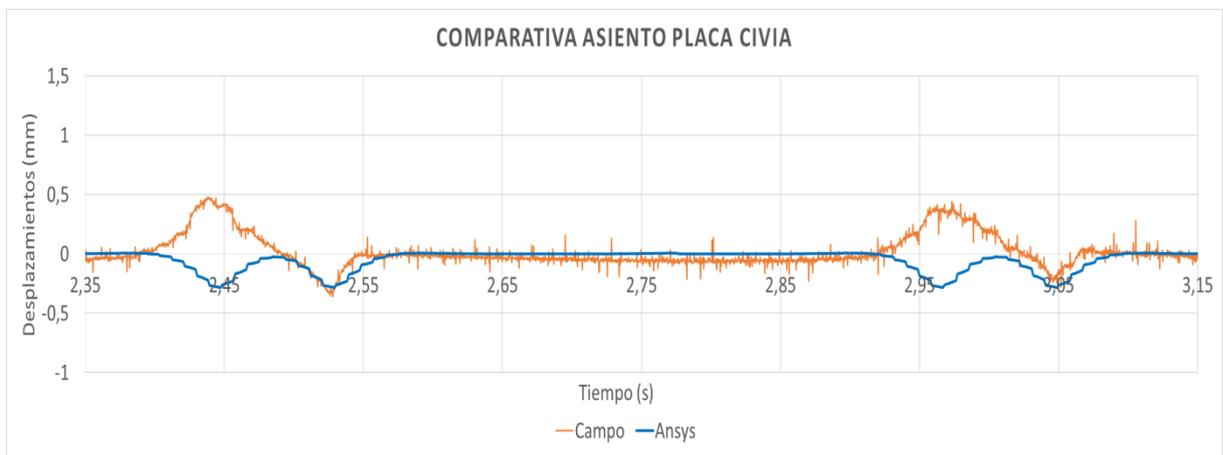


Figura 35. Comparativa asientos Placa Civia  
Fuente: Elaboración propia

### 7.3. EUROMED

En este caso hemos obtenidos buenos valores de aceleraciones, dentro del orden de magnitud y medidos en el mismo punto que en el caso del Civia por lo que se entiende que la medición en el caso del Civia no fue buena.

Respecto a los desplazamientos, el primer eje del boggie produce un desplazamiento mayor al segundo, además, la placa de asiento no llega a recuperarse en el primer boggie y el segundo eje produce un desplazamiento mucho menor.

Esto podría atribuirse a las condiciones del material rodante o a una mala medición. A pesar de esto, los asientos de la placa están dentro del orden de magnitud.

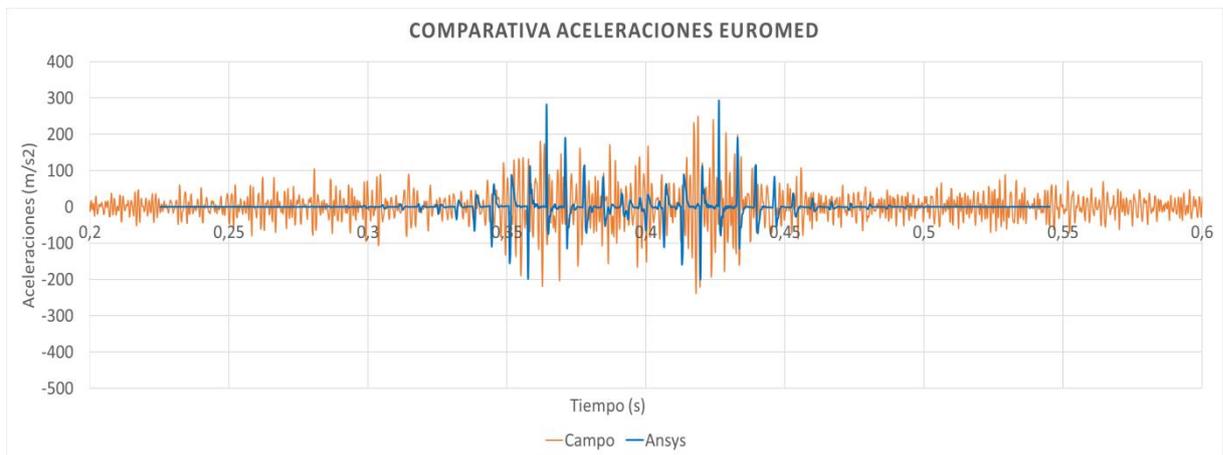


Figura 36. Comparativa aceleraciones Euromed  
Fuente: Elaboración propia

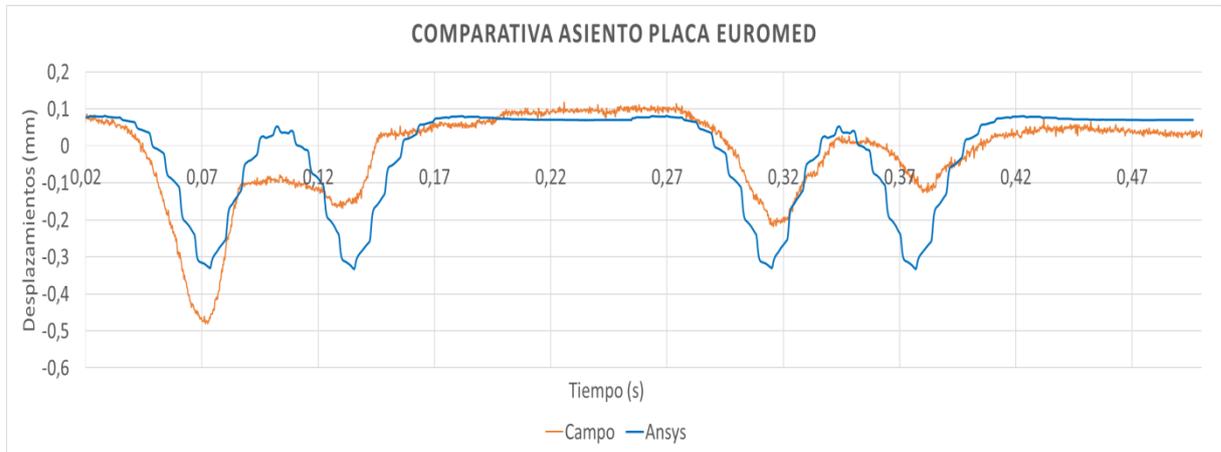


Figura 37. Comparativa asiento placa Euromed  
Fuente: Elaboración propia

## 7.4. MERCANCÍAS

En este caso llama la atención el registro de aceleraciones y es que el sensor satura y deja de medir buscando estabilizarse en el cero. Sin embargo antes de esto hemos podido comparar aceleraciones, que en este caso están dentro del orden de magnitud siendo algo mayores las registradas en campo.

Los desplazamientos en este caso son desiguales con picos de asiento en el segundo eje del boggye. La explicación de esto podría ser que la velocidad de recuperación de la placa no fuera suficiente para llegar al cero antes del paso del segundo eje del boggye y en consecuencia el pico de asiento al paso del segundo eje sea mayor al partir la placa de una posición deformada inicial.

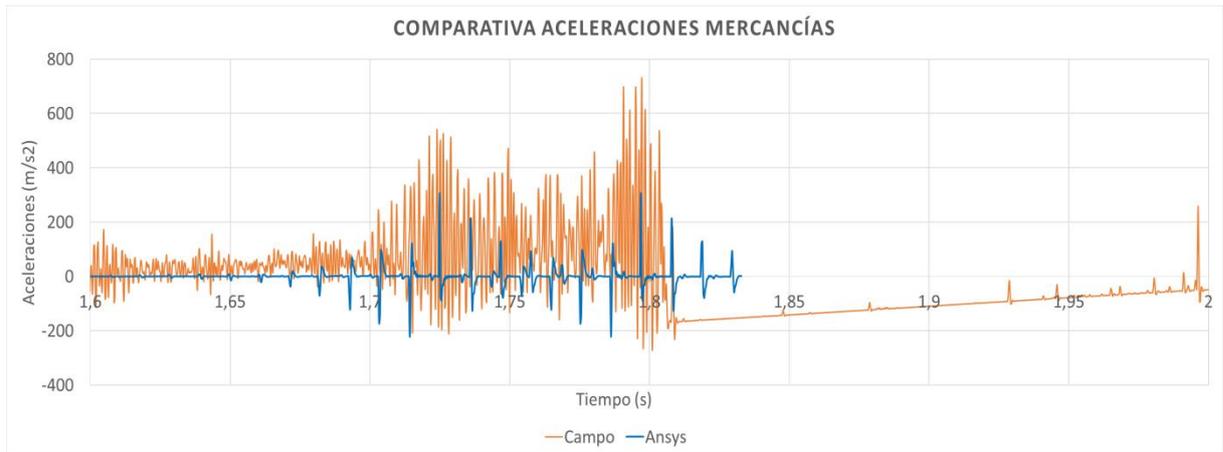


Figura 38. Comparativa aceleraciones Mercancías  
Fuente: Elaboración propia



Figura 39. Comparativa asientos Placa Mercancías  
Fuente: Elaboración propia

## 7.5. CERCANÍAS 447

Para el caso del cercanías se han obtenido valores muy dispersos de aceleraciones. El modelo no ha reproducido aceleraciones menores a pesar de que la velocidad era mucho menor ya que el tren paraba en la estación. Puede haber sido debido a un fallo en el modelo o en el registro de campo ya que en el caso de los desplazamientos el sensor saturó y no se obtuvo ningún resultado. Los desplazamientos en Ansys para este caso son parecidos en orden de magnitud al resto de las composiciones.

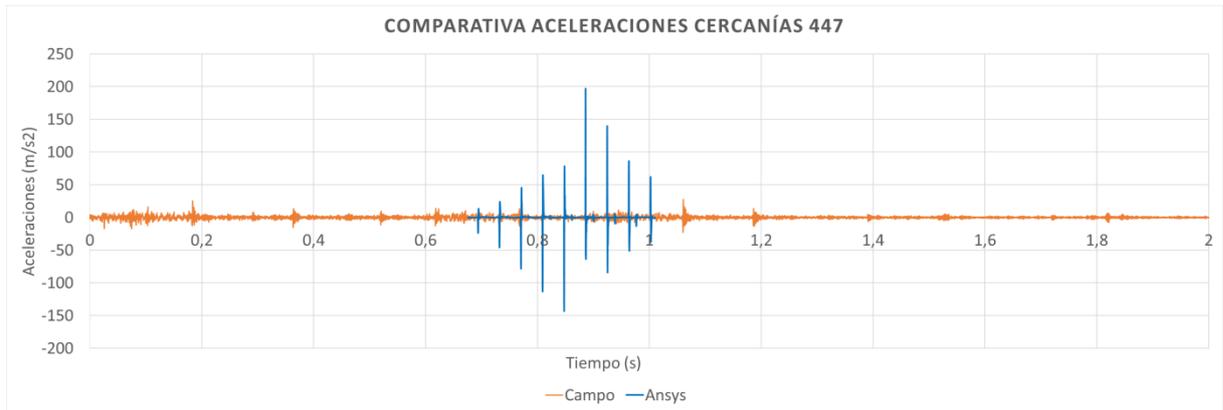


Figura 40. Comparativa aceleraciones Cercanías  
Fuente: Elaboración propia

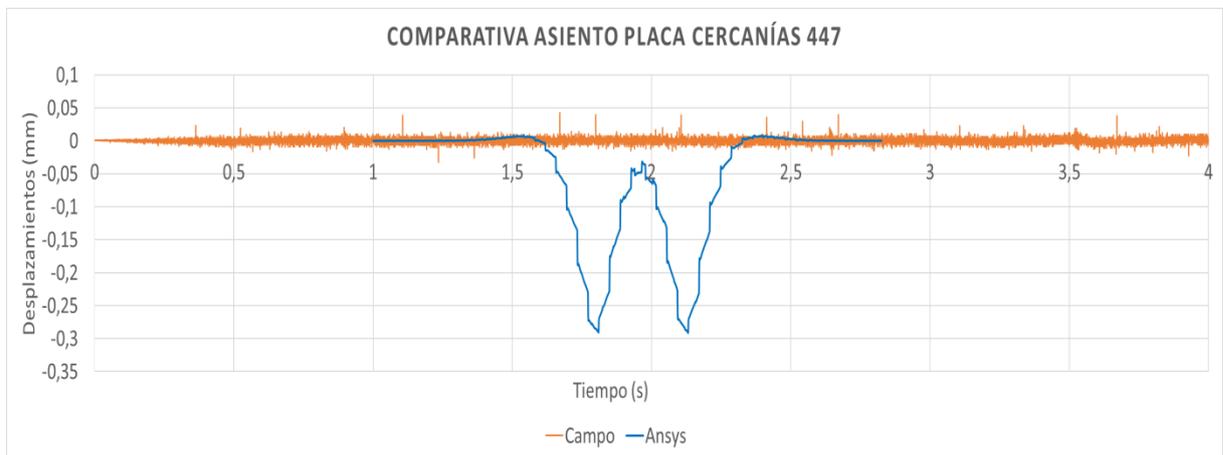


Figura 41. Compartiva placa asiento Cercanías 447  
Fuente: Elaboración propia

## 7.6. Consideraciones

Debido a las incertidumbres que supone un estudio sin precedentes como este, se anotan en este apartado algunas impresiones o consideraciones relacionadas con mediciones obtenidas.

En el caso de los asientos de la placa para distintas composiciones, podemos atribuir en el caso de los vehículos más rápidos y con más carga dinámica, una recuperación más lenta de la placa de asiento que podría estar relacionada con aumentos del mismo al paso del segundo eje de un boggie.

También, debido a las diferencias en el número de veces que pasan trenes de alta velocidad con respecto a trenes que circulan por el ancho ibérico, la placa de asiento en el caso del carril ibérico debe estar en peores condiciones y requiere un mayor mantenimiento a la vez que puede ser de importancia dada la importancia de la rigidez de la placa en las mediciones.

Debido a la diferencia de peso que supone un carril de más sobre la traviesa en el lado de dos carriles se intuye un giro relativo de las traviesas que aumentaría el desgaste de las mismas y de las placas de asiento en el lado mixto y que podría ser algo a tener en cuenta en estudios posteriores ligados al descarrilamiento.

## 8. Conclusiones

El modelo se comporta bien, obteniendo buenos resultados para el cálculo de desplazamientos y aceleraciones. Sin embargo, podría ser que no fuera así para el cálculo de tensiones, dilatación del carril u otros aspectos por lo que habría de analizarse más exhaustivamente para validarlo y obtener más conclusiones.

Los valores de desplazamientos del modelo son más fiables que los de aceleraciones debido a que no dependen tanto de la continuidad de la carga, ya que por encima de 100 Substeps no se apreciaban variaciones en los mismos.

Respecto a las aceleraciones, éstas dependen en gran medida de la rigidez de la placa de asiento por lo que se ha dado un valor a la rigidez de la placa del modelo acorde a la magnitud de desplazamientos esperables.

Respecto al tercer carril, es esperable que conlleve un desgaste mayor en la zona de dos carriles de las placas de asiento, así como una mayor consolidación de la plataforma y un mayor machaqueo del balasto bajo la traviesa debido a la asimetría de la plataforma y la pisada sobre el balasto como hemos podido observar en apartados anteriores.

Los equipos de medición de desplazamientos y aceleraciones fallan y las señales no siempre pueden filtrarse como esperamos.

La modelización de este tipo de estructuras es muy complejo y en ocasiones puede dar fallos que no podemos solucionar. En el caso de

Respecto a la colocación de los sensores, es necesario, dado la complejidad de realizar una buena medición llevar a cabo un pequeño análisis de cómo pretende medirse e incluso podría

ser interesante comparar distintas mediciones con métodos de colocación distintos con el objetivo de crear conocimiento sobre cómo realizar de forma óptima estos procedimientos, sujetos por otra parte a un porcentaje de fallo bastante elevado.

En cuanto al mantenimiento, es esperable que las traviesas, placas de asiento y balasto correspondientes al lado de dos carriles sufran un desgaste mayor que en vías convencionales debido al aumento de peso del emparrillado.

## 9. Futuras líneas de investigación

Respecto a las futuras líneas de investigación destacan las siguientes:

- Estudio de los valores para la beta de amortiguamiento del modelo:

Dado que las aceleraciones en el caso del cercanías no están dentro del orden de magnitud es posible que para unas velocidades más lentas el modelo no se comporte bien. Esto podría deberse al parámetro de la beta de amortiguamiento, ya que es un parámetro muy sensible en el modelo y del que no se dispone apenas bibliografía relacionada.

- Estudio de las tensiones inducidas con el modelo :

A pesar de que el modelo se comporta bien para los desplazamientos y aceleraciones, es posible que no sea así para las tensiones.

- Estudio de modelos para desvíos con Ansys:

Esta línea de investigación es bastante complicada en cuanto a su modelaje debido a la complejidad de un desvío para doble ancho.

- Estudio de la velocidad máxima en una vía de ferrocarril frente al descarrilamiento:

Dado que la velocidad máxima permitida para el paso tanto del Euromed como de trenes de alta velocidad es de 160 km/h y se justifica debido al mayor riesgo de descarrilamiento en desvíos con tercer carril, un análisis en profundidad del riesgo y el funcionamiento del tren cuando pasa por estas zonas podría ayudar a ajustar más la velocidad, aumentándola y consiguiendo más rendimiento o disminuyéndola y consiguiendo más seguridad. Depende de los resultados.

- Estudio del comportamiento del carril ante variaciones de temperatura o en condiciones climáticas extremas:

Análisis del comportamiento estructural de una vía de doble ancho. Aplicación al Corredor Mediterráneo, en la línea de cercanías C5 y C6 entre las estaciones Massalfassar y El Puig.

---

Podría estudiarse qué efectos tiene el tercer carril sobre el pandeo en la estructura debido a la temperatura y si ayuda a rigidizar el carril contiguo ante condiciones climáticas extremas.

## 10. Bibliografía

Abril Schliephake, C. (2013). Proyecto constructivo del nuevo acceso ferroviario en ancho estándar en la estación de Puigcerdà.

ADIF. (2005). PLACAS ELÁSTICAS DE ASIENTO PARA SUJECCIÓN VM.

Asociación Valenciana de Empresarios. (Octubre de 2019). *El corredor Mediterráneo*. Obtenido de El corredor Mediterráneo: <https://elcorredormediterraneo.com/estado-de-las-obras/>

Mesa Hinarejos, J. (2009). *ASIENTO. Análisis estructural de secciones de vía ferroviaria con métodos numéricos*.

## 11. Bibliografía de consulta

[https://es.wikipedia.org/wiki/Corredor\\_Mediterr%C3%A1neo](https://es.wikipedia.org/wiki/Corredor_Mediterr%C3%A1neo)

[https://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADa\\_de\\_ancho\\_mixto](https://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADa_de_ancho_mixto)

<http://corredormediterraneo.es/>

<https://elcorredormediterraneo.com/>

<https://ingenierodelacrisis.wordpress.com/2012/08/28/tecnicas-de-mallado-de-modelos-para-el-analisis-por-m-e-f/>

<http://www.fomento.gob.es/MFOMBPremsa/Noticias/Entra-en-servicio-el-primer-corredor-de-mercanc%C3%ADas/6870f4d7-d9da-4b98-9d3d-3a49272f7734>

<http://www.fomento.gob.es/MFOMBPremsa/Noticias/Fomento-licita-por-236-millones-de-euros-obras-el/5d1e9705-b61f-4f78-96da-76a736d878bc>