



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ANÁLISIS DINÁMICO Y NUMÉRICO DE LA VÍA EN LAS ZONAS DE TRANSICIÓN. LA INFLUENCIA DE LA POSICIÓN DE LOS APOYOS.

Trabajo realizado por:

Mikel Cerrada Larrauri

Dirigido:

Roberto Sañudo Ortega

Titulación:

Grado en Ingeniería Civil

Santander, julio de 2016

TRABAJO FINAL DE GRADO

RESUMEN

El desarrollo de nuevos modelos de vía debido a la evolución del ferrocarril, especialmente el de alta velocidad, durante los últimos años han permitido una mayor implementación de los modelos de vía en placa en las redes ferroviarias de todo el mundo. Sin embargo, debido a la aún heterogeneidad de modelos de vía tanto tradicional (en balasto) como en placa hace necesaria la utilización de zonas de transición que como se verá en este estudio son zonas estructuralmente críticas que deben ser minuciosamente estudiadas.

Se han desarrollado modelos y soluciones para compatibilizar las transiciones de vía. Sin embargo, prácticamente no se ha estudiado cómo podría influir la posición de los apoyos en la transición, es decir, si una mayor o menor separación entre los apoyos y si la variación en la distancia entre la traviesa límite con el inicio o final de la losa de la vía en placa ayudaría a mitigar los esfuerzos producidos sobre la vía. El objetivo de este trabajo es estudiar dichos efectos para, en un futuro, poder ofrecer alguna solución más óptima con un determinado bajo coste que pueda implementarse de manera generalizada no solo en la red ferroviaria española, sino en distintas redes ferroviarias a lo largo y ancho del globo.

Inicialmente, se definirán los elementos empleados para la realización del análisis numérico de los datos.

Para la realización del estudio se ha empleado un software de modelización numérica de vía denominado DARTS con el que se modelizarán diferentes casos con la premisa de buscar la solución más adecuada. Así, en todos los casos se estudiarán una serie de parámetros de la vía y del vehículo ferroviario como los desplazamientos o asientos verticales de la vía, las tensiones, o las aceleraciones que se producen en diferentes partes de la misma.

Una vez realizados los cálculos, se representan de manera gráfica y se comentan los resultados obtenidos.

Tras estos estudios se llegó a la conclusión de que las peores opciones son aquellas en las que la traviesa se dispone pegada al borde de la losa de la vía en placa. También se llegó a la conclusión que aumentando la distancia entre los apoyos no se obtienen los resultados esperados.

PALABRAS CLAVE: Zonas de transición, dinámica vertical, elementos finitos, desplazamientos verticales, tensiones verticales, aceleraciones verticales.



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



DYNAMIC AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE TRACK IN TRANSITION ZONES. THE INFLUENCE OF SUPPORTS POSITION.

Work made by:

Mikel Cerrada Larrauri

Director:

Roberto Sañudo Ortega

Titulation:

Civil Engineering

Santander, july of 2016

FINAL DEGREE WORK

ABSTRACT

The development of new models of rail track due to the evolution of the railway, especially high speed trains, have allowed further implementation of slab track models on the railway networks worldwide during last years. However, due to the heterogeneity of models of traditional track (in ballast) and slab track, it is necessary to use transition zones because as it will be seen in this study they are structurally critical areas that must be thoroughly studied.

Models and compatible solutions for track transitions have been developed. However, practically it has not been studied how the position of the supports could influence in the transition performance, in other words, if a bigger or a smaller separation between the supports or if the variation in the distance between the boundary of the sleeper with the beginning or end of the slab track would help reduce the stresses on the track. The aim of this work is to study these effects to offer in the future a more optimal and low cost solution which can be implemented widely not only in the Spanish rail network, but in other countries around the world.

Initially, the elements used for performing the numerical analysis of the data will be defined.

For the study itself, a software for numerical modeling of the track called DARTS has been used with which different cases be modeled with the premise to find the most appropriate solution. Thus, in all cases, a number of parameters of the rail track and rail vehicle will be studied like vertical displacements, stresses, or accelerations occurring in different parts of the rail track.

After the calculations, the results are graphically presented and the results obtained are discussed.

The studies led to the conclusion that the worst cases are those where the sleeper has stuck to the edge of the slab track. It also came to the conclusion that increasing the distance between supports do not achieve the expected results.

KEY WORDS: Track transitions, vertical dynamics, finite elements, vertical displacements, vertical stresses, vertical accelerations.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO	6
1.2. VÍA EN BALASTO Y VÍA EN PLACA.....	7
1.3. CONCEPTO DE ZONA DE TRANSICIÓN	9
1.4. PROBLEMAS Y SOLUCIONES	11
2. ESTADO DEL ARTE	15
3. METODOLOGÍA	18
3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA	18
3.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE VÍA	21
3.3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE VEHÍCULO	23
3.4. CASOS DE ESTUDIO.....	25
4. RESULTADOS	28
5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	61
REFERENCIAS	71
ANEXO.....	74

Índice de figuras

Figura 1: Ejemplo de vía en balasto	7
Figura 2: Esquema de la sección tipo una vía en balasto	8
Figura 3: Ejemplo de vía en placa	9
Figura 4: Esquema de la sección tipo de vía RHEDA 2000	9
Figura 5: Ejemplo de transición en la línea de alta velocidad Córdoba – Málaga	10
Figura 6: Esquema de una cuña de transición típica, mostrando las funciones de los diferentes tipos de suelo	13
Figura 7: Ejemplo de cuña de transición a viaducto utilizado por Adif. (UIC-719R)	13
Figura 8: Traviesa cuadro. (López Pita, 2006)	16
Figura 9: Prototipo de transición en la Variante de Puebla de San Julián, Lugo	17
Figura 10: Esquema de campos de análisis del programa empleado en el estudio. (Kok, 1998)	19
Figura 11: Esquemas de modelos de vía en balasto y vía en placa. (Kok 1998)	19
Figura 12: Modelización del programa en vía en placa y en vía en balasto. (Kok, 1998)	20
Figura 13: Esquemas de soportes estructurales manejados por el programa. (Kok, 1998)	20
Figura 14: Esquema solicitaciones de una vía	21
Figura 15: Esquema carril UIC-60	23
Figura 16: Modelo de tres masas. (Kok, 1998)	24
Figura 17: Tren Thalys	24
Figura 18: Esquema CASO 1	26
Figura 19: Esquema CASO 2	26
Figura 20: Esquema CASO 3	26
Figura 21: Esquema CASO 4	27
Figura 22: Esquema CASO 5	27
Figura 23: Esquema CASO 6	27
Figura 24: Desplazamientos verticales máximos en la traviesa/losa CASO 1.I	29
Figura 25: Tensiones verticales máximas de compresión traviesa/losa CASO 1.I	29
Figura 26: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 1.I	30
Figura 27: Aceleraciones verticales máximas en la traviesa/losa CASO 1.I	30
Figura 28: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 1.I	31
Figura 29: Desplazamientos verticales máximos en la losa/traviesa CASO 1.V	32
Figura 30: Tensiones verticales máximas de compresión losa/traviesa CASO 1.V	32
Figura 31: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 1.V	32
Figura 32: Aceleraciones verticales máximas en la losa/traviesa CASO 1.V	33
Figura 33: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 1.V	33
Figura 34: Desplazamientos verticales máximos en la traviesa/losa CASO 2.I	34
Figura 35: Tensiones verticales máximas de compresión traviesa/losa CASO 2.I	34
Figura 36: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 2.I	35
Figura 37: Aceleraciones verticales máximas en la traviesa/losa CASO 2.I	35
Figura 38: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 2.I	36
Figura 39: Desplazamientos verticales máximos en la losa/traviesa CASO 2.V	37
Figura 40: Tensiones verticales máximas de compresión losa/traviesa CASO 2.V	37
Figura 41: Aceleraciones máximas verticales en el carril CASO 2.V	38
Figura 42: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 2.V	38
Figura 43: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 2.V	39
Figura 44: Desplazamientos verticales máximos en la traviesa/losa CASO 3.I	40
Figura 45: Tensiones verticales máximas de compresión traviesa/losa CASO 3.I	40
Figura 46: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 3.I	41
Figura 47: Aceleraciones verticales máximas en la traviesa/losa CASO 3.I	41
Figura 48: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 3.I	42

Figura 49: Desplazamientos verticales máximos en la losa/traviesa CASO 3.V	42
Figura 50: Tensiones verticales máximas de compresión losa/traviesa CASO 3.V	43
Figura 51: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 3.V	43
Figura 52: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 3.V	44
Figura 53: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 3.V	44
Figura 54: Desplazamientos verticales máximos en la traviesa/losa CASO 4.I.....	45
Figura 55: Tensiones verticales máximas de compresión traviesa/losa CASO 4.I	45
Figura 56: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 4.I	46
Figura 57: Aceleraciones verticales máximas en la traviesa/losa CASO 4.I	46
Figura 58: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 4.I	47
Figura 59: Desplazamientos verticales máximos en la losa/traviesa CASO 4.V	48
Figura 60: Tensiones verticales máximas de compresión traviesa/losa CASO 4.V	48
Figura 61: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 4.V	49
Figura 62: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 4.V	49
Figura 63: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 4.V	50
Figura 64: Desplazamientos verticales máximos en la traviesa/losa CASO 5.I.....	51
Figura 65: Tensiones verticales máximas de compresión traviesa/losa CASO 5.I	51
Figura 66: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 5.I	51
Figura 67: Aceleraciones verticales máximas en la traviesa/losa CASO 5.I	52
Figura 68: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 5.I	52
Figura 69: Desplazamientos verticales máximos en la losa/traviesa CASO 5.V	53
Figura 70: Tensiones verticales máximas de compresión losa/traviesa CASO 5.V	53
Figura 71: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 5.V	54
Figura 72: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 5.V	54
Figura 73: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 5.V	55
Figura 74: Desplazamientos verticales máximos en la traviesa/losa CASO 6.I.....	56
Figura 75: Tensiones verticales máximas de compresión traviesa/losa CASO 6.I	56
Figura 76: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 6.I	56
Figura 77: Aceleraciones verticales máximas en la traviesa/losa CASO 6.I	57
Figura 78: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 6.I	57
Figura 79: Desplazamientos verticales máximos en la losa/traviesa CASO 6.V	58
Figura 80: Tensiones verticales máximas de compresión losa/traviesa CASO 6.V	58
Figura 81: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 6.V	59
Figura 82: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 6.V	59
Figura 83: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 6.V	60
Figura 84: Desplazamientos verticales máximos de todos los modelos en sentido balasto - placa	61
Figura 85: Desplazamientos verticales máximos de todos los modelos en sentido placa - balasto	62
Figura 86: Valores máximos de los desplazamientos verticales de todos los modelos.....	62
Figura 87: Desviación típica de los desplazamientos en 100 metros de todos los modelos.....	63
Figura 88: Tensiones verticales de compresión de todos los modelos dirección balasto - placa	64
Figura 89: Tensiones verticales de compresión de todos los modelos dirección placa - balasto	64
Figura 90: Valor de la tensión vertical máxima de compresión de todos los casos	65
Figura 91: Aceleraciones verticales en el carril de todos los modelos dirección balasto - placa	66
Figura 92: Aceleraciones verticales en el carril de todos los modelos dirección balasto - placa	66
Figura 93: Aceleraciones máximas en la traviesa (primero) o en la losa (después) de todos los casos	67
Figura 94: Aceleraciones máximas en la losa (primero) o en la traviesa (después) de todos los casos	68

Figura 95: Aceleraciones verticales en la caja del tren de todos los modelos dirección balasto -
placa 69

Figura 96: Aceleraciones verticales en la caja del tren de todos los modelos dirección placa -
balasto 69

Índice de tablas

Tabla 1: Características geométricas de la vía modelizada.	22
Tabla 2: Propiedades mecánicas de los elementos que componen la vía modelizada.	23
Tabla 3: Propiedades mecánicas de la locomotora "Thalys"	25

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO

El desarrollo de la red de alta velocidad durante los últimos años se ha hecho palpable en el aumento de la inversión de la construcción de este tipo de infraestructuras, no solo en España sino también en muchos otros países sobretodo europeos. Durante los últimos años, los presupuestos del Ministerio de Fomento del Gobierno de España se han centrado en la inversión en Alta Velocidad, acaparando más de la mitad de las partidas asignadas al ferrocarril, a pesar que en los últimos años las inversiones se han ralentizado debido a la crisis.

Sin embargo, una importante parte del presupuesto de las líneas de alta velocidad va a parar a su mantenimiento. El coste por kilómetro de vía doble de alta velocidad es de aproximadamente 100.000 € y el aumento paulatino de la red de alta velocidad hace que cada vez sea necesario invertir más dinero en su mantenimiento. De ahí que interese reducir el coste de mantenimiento de las líneas de alta velocidad.

Estas infraestructuras ferroviarias llaman la atención ya que permiten el transporte de pasajeros a altas velocidades implementando lo mejor de la técnica actual ferroviaria. Sin embargo, no siempre se recurren a las mejores soluciones, normalmente por su elevado coste. Uno de ellos es la implementación de la vía en placa.

Si bien la vía en placa se lleva usando desde hace tiempo en especial en vías sobre túneles y/o viaductos, ha sido con la llegada de la alta velocidad cuando su uso se ha expandido más rápidamente. El principal motivo de uso es que permite solucionar algunos inconvenientes del uso de vías sobre balasto en alta velocidad, como la problemática del vuelo de balasto, o incluso la reducción de los costes y la necesidad de mantenimiento. A pesar de ello, muchos países han decidido limitar su uso debido no solo a su alto coste e instalación, sino a los requisitos de plataforma que son mucho más estrictos que en una línea con vía en balasto.

En España, se implementó la construcción de las líneas de alta velocidad con este tipo de vía, limitándose la vía en placa para túneles de gran longitud y viaductos. A pesar de que esta opción parecía más equilibrada, surgió un nuevo problema y es que era necesario establecer algunas zonas en las que se realizaba un cambio en la topología de la vía, y esas zonas daban bastante más problemas de lo que inicialmente se pensaba.

Por ese motivo, se desarrollaron muchos estudios en busca de soluciones para disminuir estos efectos perniciosos. Algunas de estas soluciones basan, como se verá en el apartado 1.3, en la instalación de carriles adicionales, o en la instalación de traviesas más largas. Sin embargo, no se ha estudiado como podría influir la instalación de los apoyos en la zona de transición, y la distancia que debería haber entre la última traviesa y la losa de la placa.

Y es que a lo largo de los años se han intentado buscar diferentes soluciones a un problema que lleva presente desde que se apostó por la vía en placa en líneas de alta velocidad. Como se ha mencionado se han realizado numerosos estudios pero, sin embargo, aún no se encuentra la solución “mágica” que permitiría resolver este problema definitivamente. Y, al menos de momento, no parece fácil de solucionar,

El objetivo de este estudio es, por tanto, el poder servir de base en cara a una solución sencilla y barata que pudiera aplicarse no solo a nivel estatal sino a nivel mundial. Este estudio se basará en la simulación numérica mediante una serie de modelos en aras de poder establecer una base para futuras investigaciones más profundas. Estos estudios, tal y como se verá en el Capítulo 3.1, se

realizarán con el software denominado DARTS_NL (desarrollado por la Universidad de Delft, en los Países Bajos). Concretamente, los objetivos específicos del estudio son:

- Buscar la disposición más óptima de los apoyos y de las traviesas de la transición de cara a estudiar que modelos son más susceptibles de poder deteriorarse antes y cuales serían compatibles para su posible instalación. Es decir, estudiar cómo afecta la distancia entre apoyos en las tensiones y los desplazamientos verticales bajo traviesa.
- Estudio de las transiciones en ambos sentidos. Comparación de los resultados obtenidos y discernir acerca del sentido de circulación más crítico (si lo hubiera).
- Posible búsqueda de soluciones más sencillas y económicas.

Tal y como se verá en el Capítulo 3.4, se han propuesto varios casos de estudio teniendo en cuenta varias variables. Los resultados, como se verá más adelante, demuestra que existen modelos cuyos resultados obtenidos no son aceptables para su instalación en una red ferroviaria funcional, mientras que otras soluciones sí podrían ser aplicables.

1.2. VÍA EN BALASTO Y VÍA EN PLACA

En este apartado definiremos los dos tipos de vía más empleados en la actualidad.

La vía en balasto es la concepción clásica de vía ferroviaria que se conoce. Consiste en dos carriles (normalmente) que se apoyan sobre una serie de traviesas alineadas a lo largo de la plataforma ferroviaria. Estas traviesas se asientan sobre una capa de balasto, cuyo cometido es el de dar estabilidad a la vía además de absorber los esfuerzos producidos.

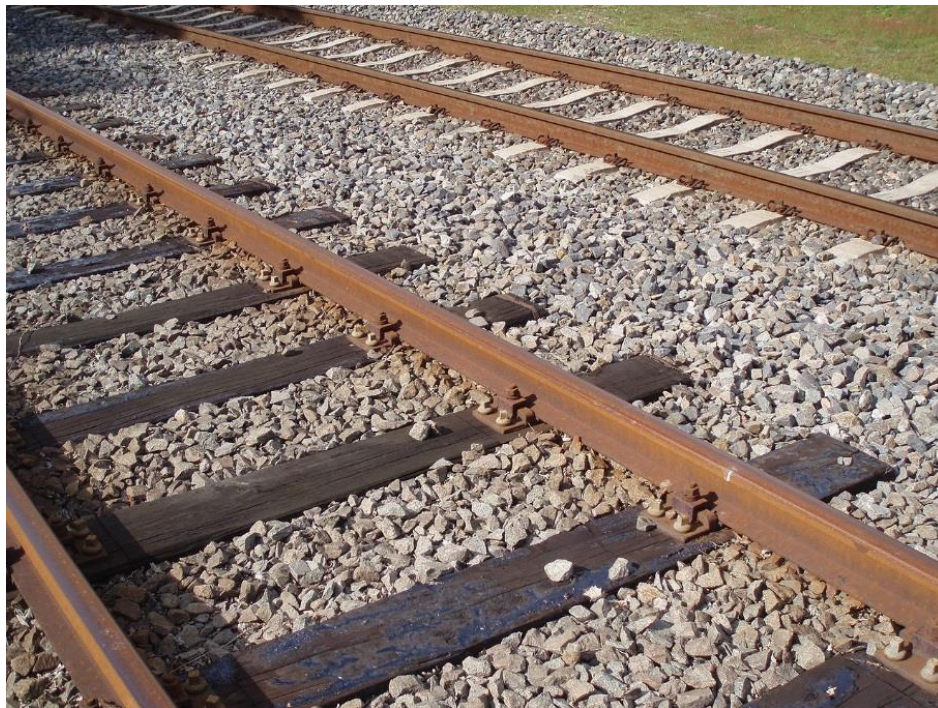


Figura 1: Ejemplo de vía en balasto

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/88/Railroad_tieswoodconcrete.jpg

En el siguiente esquema podemos apreciar las partes de las que se compone la superestructura de vía en balasto, su sección tipo:

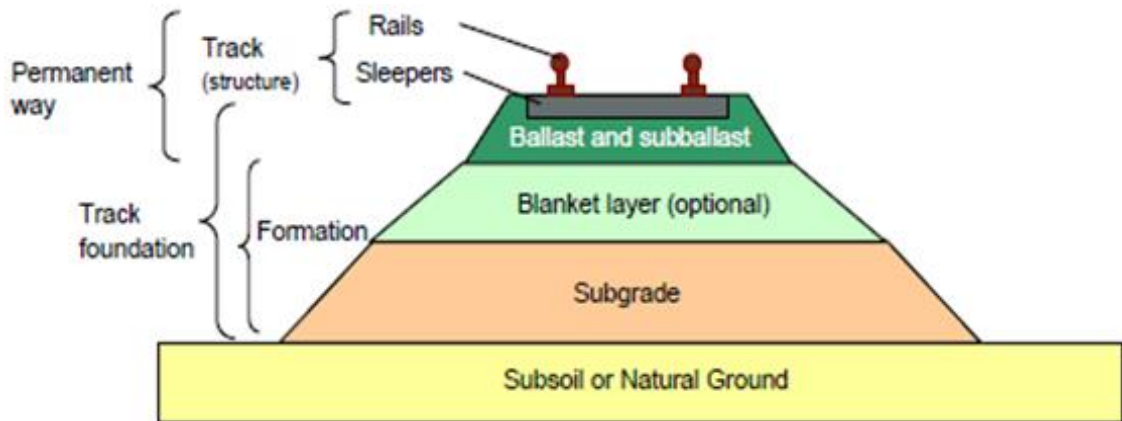


Figura 2: Esquema de la sección tipo una vía en balasto

Las partes de la vía en balasto son:

- La vía propiamente dicha (carril, pads de apoyo y traviesas). Las traviesas pueden ser de diferentes materiales, siendo las más comunes las de madera y las de hormigón pretensado.
- La capa de balasto: esta se debe ajustar a una granulometría adecuada para asegurar el arrostramiento de las traviesas.
- La capa de forma.
- La subbase.

Entre las ventajas de la vía en balasto es que es la opción más barata de colocar, no es tan estricta en cuanto a la calidad del suelo donde se puede instalar y es la solución que se lleva utilizando toda la vida. Por el contrario, los costes de mantenimiento son mayores con respecto a otras alternativas, ya que requiere labores de bateo, alineación y nivelación con cierta frecuencia, y al paso de trenes con velocidad elevada se produce el desprendimiento del balasto (a este fenómeno se le denomina “vuelo del balasto”).

Por otro lado tenemos la vía en placa. Esta consiste en una placa de hormigón (generalmente, también puede emplearse hormigón bituminoso) donde se depositan las traviesas y el carril. A diferencia de las vías en balasto, existen múltiples soluciones de vía en placa dependiendo de cómo se apoyen las traviesas o incluso si el carril se encuentra embebido o no.



Figura 3: Ejemplo de vía en placa
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/36/RHEDA_2000_-_10.JPG

Existen varios modelos de vía en placa. Algunos de los más utilizados son: RHEDA 2000, STEDEF, ATD, GETRAC...

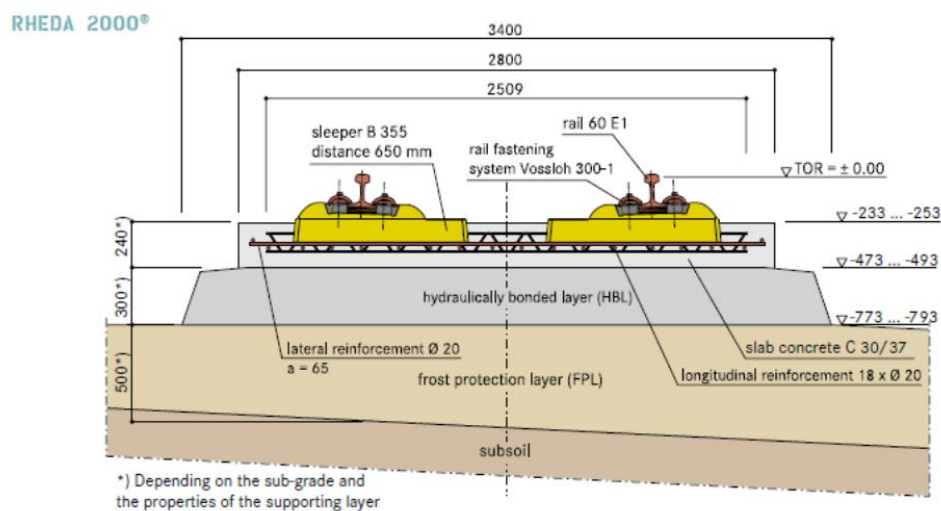


Figura 4: Esquema de la sección tipo de vía RHEDA 2000

Entre las ventajas de la vía en placa encontramos que su vida útil es mucho mayor, soporta mejor los esfuerzos que la vía en balasto ya que transmite mejor las cargas al terreno, se reduce considerablemente el mantenimiento necesario y soporta mejor el paso de trenes de alta velocidad. Entre sus inconvenientes destacan un mayor coste de instalación, el suelo requiere de una mayor capacidad portante que en la vía en balasto además que su calidad debe ser mayor ya que tolera peor los asentamientos en la vía que en la vía en balasto y las labores de mantenimiento aunque inferiores son más costosas.

1.3. CONCEPTO DE ZONA DE TRANSICIÓN

El concepto de zona de transición es bastante más complejo de lo que un principio podría parecer ya que realmente podría definirse de diferentes maneras según a lo que nos atengamos.

Geométricamente una zona de transición de tipología de vía es, como su nombre indica, un tramo de vía donde se procede a cambiar de manera más o menos gradual una tipología de vía por otra diferente. Ejemplos encontramos en los cambios de plataforma al pasar de una vía en terraplén a una vía situada en una estructura elevada, o al pasar de vía en balasto a una vía en placa. En este estudio cuando hablamos de “zonas de transición” nos estaremos refiriendo al último caso en particular. No obstante, en este Capítulo 1 se tratará el tema de las transiciones en general.



Figura 5: Ejemplo de transición en la línea de alta velocidad Córdoba – Málaga

Sin embargo, la zona de transición es en realidad una solución de tipo estructural que se implementa ante un cambio repentino en la mecánica vertical de la vía. Tal y como se ha comentado, al cambiar la tipología de la vía se producen unos cambios repentinos en las tensiones sufridas por la vía, en los desplazamientos producidos y en las aceleraciones soportadas

Así, podemos definir una zona de transición en una línea ferroviaria es un área destinada a la adaptación de rigidez entre dos tipos distintos de configuración de vía contiguos (Sañudo, 2013).

Las zonas de transición, debido a su comportamiento mecánico, pueden considerarse también como discontinuidades a lo largo de la plataforma ferroviaria donde pueden producirse problemas geométricos y estructurales que pueden aumentar los costes de mantenimiento de la línea ferroviaria.

La longitud de las zonas de transición viene determinada por la velocidad de proyecto del tramo en la que se encuentre. Normalmente, las zonas de transición deben de tener los siguientes valores:

- Para $V \leq 220$ km/h, la longitud será de al menos 30 metros.
- Para $V > 220$ km/h, la longitud será de al menos 50 metros.

La longitud de las zonas de transición viene dada por la siguiente fórmula (1) (Mendoza, 2012):

$$L (m) = 0,5 \cdot V (m/s) \quad (1)$$

Siendo L la longitud de la zona de transición en m y V la velocidad de circulación del tren en m/s.

1.4. PROBLEMAS Y SOLUCIONES

Como se ha comentado, la zona de transición como solución estructural intenta paliar algunos efectos que se producen cuando se produce un cambio en la topología de la vía. (Sañudo et al. 2016).

Los problemas que encontramos normalmente en las zonas de transición son dos:

- Cambios repentinos en la rigidez de la vía debido al uso de materiales con diferentes propiedades tanto en la superestructura como en la infraestructura.
- Asientos diferenciales debidos a la inestabilidad de las cimentaciones. En general estos asientos son superiores en tramos de vía asentados en terreno (ya sea en terraplén, en desmorte o a media ladera) que en aquellos tramos de vía discurren en túnel o en viaducto. En el peor de los casos estos asientos no son nada despreciables.

Una zona de transición no ejecutada correctamente es un futuro foco de problemas de la vía, incrementando los costes de mantenimiento para paliar los defectos y, en el peor de los casos, requerir de algunas soluciones más drásticas.

Los problemas estructurales que pueden surgir son los siguientes:

- Los desplazamientos producidos en la vía pueden ser muy grandes, lo que puede producir saltos importantes en la cota del plano de rodadura que en cualquier caso es perjudicial para el carril y puede ser peligroso. Existen valores umbrales que deben respetarse de cara a mantener la seguridad y confort necesarios para un funcionamiento óptimo de la vía (evitar las traviesas bailarinas o danzarinas, es decir, aquellas que no están apoyadas).
- Las tensiones producidas justo en la transición pueden ser muy elevadas. Estas pueden producir la aparición de grietas en la placa o rotura de traviesas, entre otros defectos. Es necesario que estos valores se encuentren por debajo de un umbral que permita la circulación segura sin riesgo de que se produzcan situaciones de ELS (estado límite de servicio).
- Las aceleraciones producidas pueden ser un problema, ya que si las aceleraciones son muy elevadas pueden además de producir daños en la vía ser sufridos por los pasajeros, ya que existen ciertas tolerancias que el cuerpo humano puede aguantar (en casos extremos). En ningún caso, el cuerpo del tren puede experimentar aceleraciones superiores a 1 m/s^2 .

Y como consecuencia de lo anterior, se producen los siguientes efectos perniciosos:

- Degradación de la estructura de vía (rotura y fatiga de carriles, traviesas, losa de vía en placa, etc.).
- Desnivelación de la vía y pérdida de su debida alineación.
- Debido a todo ello, se produce un aumento en la periodicidad de las labores de mantenimiento que suponen mayor cantidad de cortes, mayor duración de tiempo sin la posibilidad de realización de servicios en ese periodo de tiempo (si no hay alternativas) y aumento de los costes de mantenimiento.
- Desgaste en el material rodante, debido a la sobreexcitación dinámica que sufre por la alteración de la deformabilidad vertical de la vía.

Es sencillo de razonar que, a mayor velocidad de circulación del tren, más fácil es que se produzcan problemas en las zonas de transición. Por lo tanto, y aunque las zonas de transición siempre han sido estudiadas, al aumentar la velocidad de paso de los trenes estos problemas se han acentuado, para perjuicio de administradores ferroviarios y usuarios de los diferentes servicios. De ahí que los problemas relativos a los mismos hayan aumentado y se estén buscando diferentes soluciones para mitigarlos.

Además de provocar problemas estructurales y como se ha expuesto en la explicación de dichos problemas, una zona de transición también puede ser un foco de problemas para los servicios ferroviarios de pasajeros (y en menor medida para el tráfico de mercancías). El paso por zonas de transición a ciertas velocidades puede disminuir los niveles de confort de los viajeros e incluso poner en peligro su seguridad. Por este motivo se toman soluciones drásticas como el establecimiento de LTVs (límites temporales de velocidad, usados normalmente en tramos con defectos geométricos que no permiten el paso de los trenes a la velocidad máxima de circulación del tramo) para poder realizarse el paso por la zona manteniendo un nivel de seguridad aceptable.

Durante los últimos años se han intentado encontrar diferentes soluciones para el problema. Hay que tener en cuenta que las soluciones empleadas para mitigar los problemas ocurridos en las zonas de transición suelen actuar en puntos muy específicos. Así, encontramos soluciones que mejoran aspectos geotécnicos para evitar la formación de asentamientos en la medida de lo posible; otras soluciones pasan por variar las disposiciones de los elementos de las capas bajo la vía; también soluciones que actúan en las traviesas, apoyos e incluso carriles.

Sin embargo, hoy en día la mayoría de las soluciones buscan conseguir una variación gradual de la rigidez en estas zonas, pero es bastante complicado y a día de hoy no se han conseguido los resultados esperados.

Globalmente, se pueden identificar tres tipos de soluciones que se basan en (Sañudo et al. 2016):

- Actuar en la infraestructura
- Actuar en la superestructura
- Actuar en ambas

Como ejemplo de solución actuando en la infraestructura encontramos las cuñas de transición. Su principal función, entre otras, es la de graduar la variación de rigidez vertical de la vía, de manera que se consiga una transición “progresiva” conforme el vehículo se aproxima a la estructura. Esto se realiza variando los materiales que componen la plataforma disponiendo progresivamente de materiales de mayor dureza hasta que finalmente se realiza la transición completa a hormigón, que es el que mayor dureza tiene.

En el siguiente caso se muestra un esquema del funcionamiento de una cuña de transición.

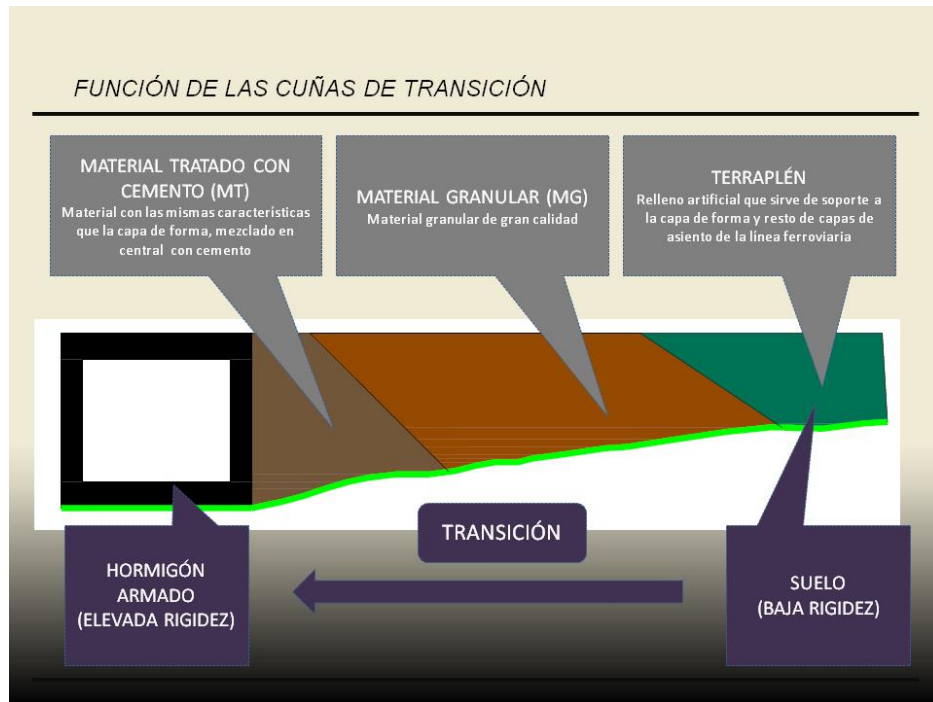


Figura 6: Esquema de una cuña de transición típica, mostrando las funciones de los diferentes tipos de suelo.
https://construblogspain.files.wordpress.com/2013/09/1_imagen.jpg

La norma IGP-I.2. de Adif establece algunas recomendaciones para la instalación de cuñas de transición. Se establecen diferentes casos según el tipo de transición que encontremos. Por ejemplo, de túnel a viaducto (y estableciendo dos casos según la longitud de ambas infraestructuras). También se establecen casos en los que se establece una transición con otros tipos de obras de fábrica (como redes de drenaje).

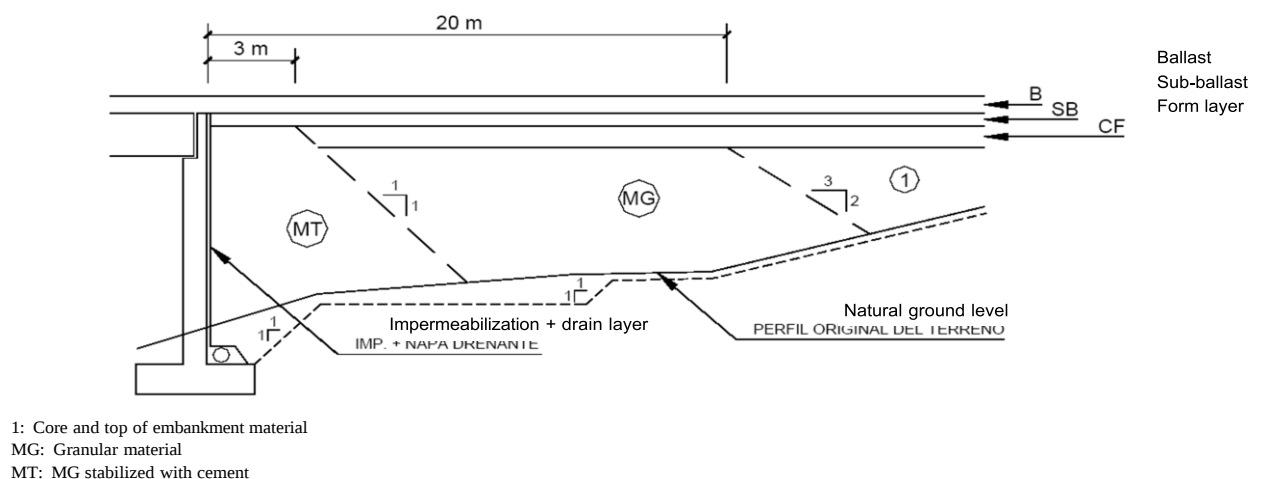


Figura 7: Ejemplo de cuña de transición a viaducto utilizado por Adif. (UIC-719R)

Otros países también han propuesto soluciones de cuñas de transición. Algunos países como Alemania, Francia o Italia han desarrollado sus propias soluciones. Estas vienen recogidas en la norma UIC 719-R.

Actuando en la superestructura encontramos diversos tipos de soluciones de zonas de transición:

1. INTRODUCCIÓN

- Aumentando gradualmente la longitud de las traviesas.
- Disminuyendo el espaciamiento de las traviesas en la zona de la transición (desde los 60 cm hasta los 53 cm).
- Colocando raíles adicionales, tanto entre los carriles de circulación como en el lateral de las traviesas.

2. ESTADO DEL ARTE

Como se han comentado anteriormente, el problema de las zonas de transición se lleva estudiando desde hace tiempo y aún no encuentra una solución del todo satisfactoria. Y es que muchas veces los problemas que pueden acarrear estas zonas no son visibles a simple vista (Wang et al. 2015). Por ejemplo, la aparición de traviesas bailarinas que, aunque a simple vista pueden parecer apoyadas, en realidad no se encuentran apoyadas y producen no solo desplazamientos importantes sino cambios en la rigidez.

Otro de los problemas mencionados es el de la gran variación de rigidez de la vía al cambiar entre dos tipos de vía con comportamientos mecánicos muy diferentes. Y es que la rigidez vertical de la vía es un parámetro muy importante ya que influye en el futuro mantenimiento de la vía, pudiendo una vía con malas propiedades aumentar su ciclo de mantenimiento y sus costes asociados como se ha visto en el capítulo anterior. Sin embargo, existe en la actualidad equipos de mantenimiento destinados a medir estas propiedades por lo que puede ser un buen punto de partida de cara a probar in situ diferentes rigideces para las transiciones de vía. (Berggren et al. 2009).

Así, queda demostrado que la rigidez como principal propiedad mecánica de la vía afecta al comportamiento de esta, y no solo depende de parámetros geométricos como inicialmente se pensaba (Puzabac, 2012). Además, lo que se debe buscar no solo es una graduación de la rigidez de la vía, sino que también se debe evitar que no se produzca la rotura de la vía ni tampoco deformaciones permanentes en ella (Banimahd et al, 2012).

Otras soluciones mencionadas consistían en actuar sobre la infraestructura. Las cuñas de transición son una de las principales soluciones para paliar los efectos cuando la vía se encuentra con diferentes tipos de infraestructuras. Algunos trabajos han versado sobre la búsqueda de criterios que permitan optimizar su funcionamiento y diseño.

Precisamente la influencia de las infraestructuras es muy importante, y existen estudios que demuestran la existencia de una estrecha relación entre la calidad de la infraestructura y de la calidad final de la vía (De Man, 2002). Hay que tener en cuenta que las propiedades de la cimentación de la vía no son iguales sobre el terreno natural que sobre una infraestructura, y en muchas ocasiones las características del terreno pueden ser tan complejas que dificultan la labor de estudio y simulación del comportamiento de una vía; de ahí que los estudios sobre cuñas de transición cobren especial relevancia y que deban estudiarse las medidas mitigadoras acordes al problema que se presenta (Gallage et al. 2013).

Otros estudios comparan ciertas soluciones que se pueden o se han aplicado a nivel de superestructura en zonas de transición. Entre ellas se mencionan algunas como la instalación de carriles adicionales para mejorar la rigidez o la instalación de traviesas de longitud variable (Namura et al. 2004). Según Read and Li (2006), el comportamiento mecánico mejora más al realizarse esta última solución.

También se ha propuesto el uso de traviesas cuadradas. Estas conllevan una serie de ventajas como un aumento de la rigidez de la vía y la disminución de los desplazamientos.

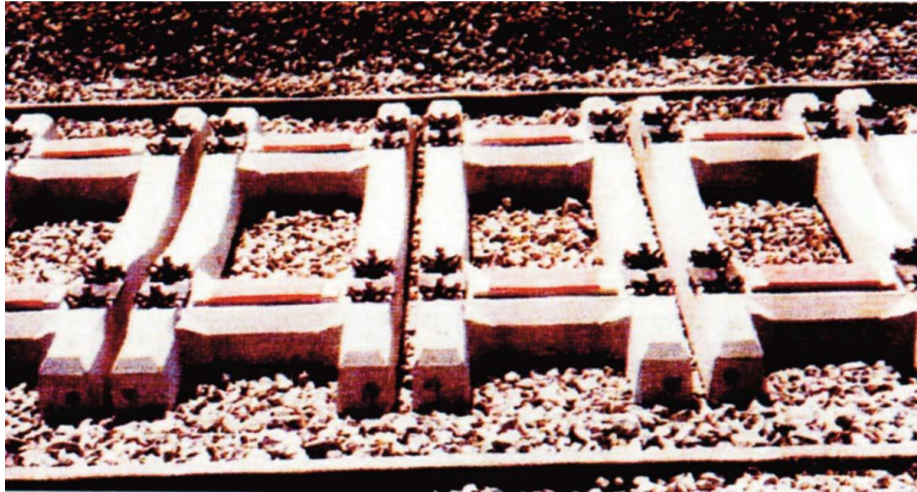


Figura 8: Traviesa cuadro. (López Pita, 2006)

Por otro lado se propone en vías en balasto aumentar progresivamente la rigidez de los pads de cara a ir aumentando la rigidez de la vía (Arlaud et al. 2016)

Algunos investigadores han ido más allá y han decidido realizar un análisis más completo de qué es lo que ocurre en las zonas de transición y han recopilado una variedad de modelos para diferentes casos en busca de la solución más óptima para caso en concreto (Sañudo et al. 2016, a)).

También se debe considerar la dirección a la que circula el tren, ya que la vía no va a estar sometida a las mismas solicitaciones dinámicas si el tren circula en un sentido o en el otro (Sañudo et al. 2016, b)).

A la hora de encontrar diversas soluciones se ha decidido lanzar propuestas investigadoras que en un futuro próximo podrían dar frutos.

Por ejemplo, se han lanzado estudios de cómo mejorar la modelización de las interacciones entre el vehículo y la vía de cara a un estudio más real y de la obtención de resultados más realistas.

En países como Reino Unido se han lanzado trabajos de investigación oficiales con el objetivo de mejorar el comportamiento de las vías como superestructura (INNOTRACK). También encontramos trabajos a nivel europeo (SUPERTRACK), en constante desarrollo y como manera de mejorar las redes ferroviarias del continente.

Uno de los proyectos nacionales de mayor importancia en este campo es el proyecto DINATRANS, llevado a cabo por la Universidad de Cantabria junto a Ferrovial como empresa líder del proyecto e impulsado por Adif, Precon y Ci3. Se trata de un proyecto que prevé una serie de actuaciones tanto a nivel de infraestructura como a nivel de superestructura.



Figura 9: Prototipo de transición en la Variante de Puebla de San Julián, Lugo

Con respecto a la influencia de los apoyos, no se han realizado a penas estudios que corroboren cómo podrían afectar diferentes disposiciones de los mismos o las diferencias entre instalar la traviesa más cercana a un tramo de vía en placa a una distancia o a otra. Sin embargo, se advierte sobre la influencia negativa que tiene el aumento de la distancia entre apoyos cuando el tren va de vía en placa a vía en balasto (Sañudo, Markine and Luigi, 2016). También se analizaron la distribución de apoyos al final de la losa y a 20 cm del borde dando mejores resultados en tensiones y desplazamientos esta última disposición (Sañudo et al. 2016, a))

3. METODOLOGÍA

En este apartado se plantea el cómo se va abordar el estudio previsto. Se explicará y se detallará el programa empleado y los modelos utilizados en la realización de los cálculos, incluyendo las variables implicadas en el proceso. Además, se explicarán los diferentes casos de estudio que se abordarán en este trabajo.

El objetivo de todo ello es explicar todos los elementos involucrados antes de exponer los resultados obtenidos en sí mismos.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

El mantenimiento y diseño de las diferentes estructuras ferroviarias depende de su resistencia y de su rigidez. Para predecir el comportamiento de las estructuras debemos analizar mediante cálculos estructurales los esfuerzos y deformaciones a los que estas están sometidos. La precisión de los análisis realizados para el cálculo dependerá básicamente de la precisión los modelos utilizados y de las cargas que consideremos.

Con los modelos actuales de cálculo por elementos finitos podemos obtener analizar complicados casos de cálculo de modelos en 3D, incluso con propiedades no lineales. Aunque en ocasiones estos modelos pueden ser útiles sobre todo cuando existe cierta incertidumbre con algunos de las características y propiedades de los materiales empleados, estos modelos son complicados de programar y requieren de una inversión de tiempo importante. Además, suelen ser más complicados de lo que realmente se necesita en la práctica.

Sn embargo, pueden también emplearse modelos de vigas con un grado de libertad (*Simple single degree of freedom*) que son modelos bastante más sencillos en cuanto a su manejabilidad. Permiten tanto el cálculo de cargas estáticas como dinámicas.

El programa DARTS podría englobarse dentro de este último tipo de programas. Con relativa sencillez en cuanto a programación nos permite obtener unos resultados bastante completos y con una precisión bastante buena si los comparamos con modelos mucho más complejos.

simple models
linear theory
limited number of parameters

model analysis	SDOF	1-D beam models	2-D FEM models	3-D FEM models
linear statics				
dynamics				GTSTRUDL
nonlinear				ANSYS ABACUS
nonlinear + dynamics				DIANA

complex models
complex theories
unknown material parameters

Figura 10: Esquema de campos de análisis del programa empleado en el estudio. (Kok, 1998)

El programa DARTS se desarrolló para el análisis de vías ferroviarias sobre una cimentación elástica. Estas vías se pueden construir de maneras diversas, ya sea como una vía clásica con carriles, traviesas y sujeciones entre ambos, o como una losa de hormigón con el carril embebido en ella.

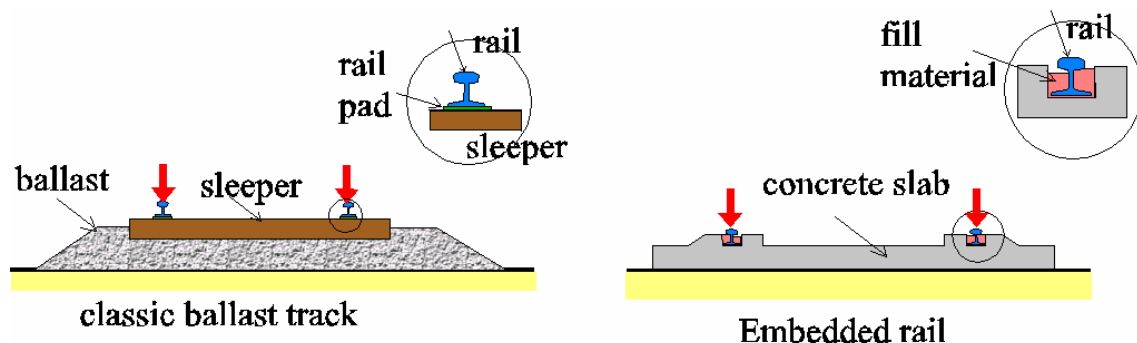


Figura 11: Esquemas de modelos de vía en balasto y vía en placa. (Kok 1998)

Las estructuras embebidas se modelan como una viga simple sobre una cimentación elástica (el material de relleno). Si la placa soporte posee un comportamiento flexible entonces se modela como un sistema de dos o tres vigas con material de relleno entre ellas.

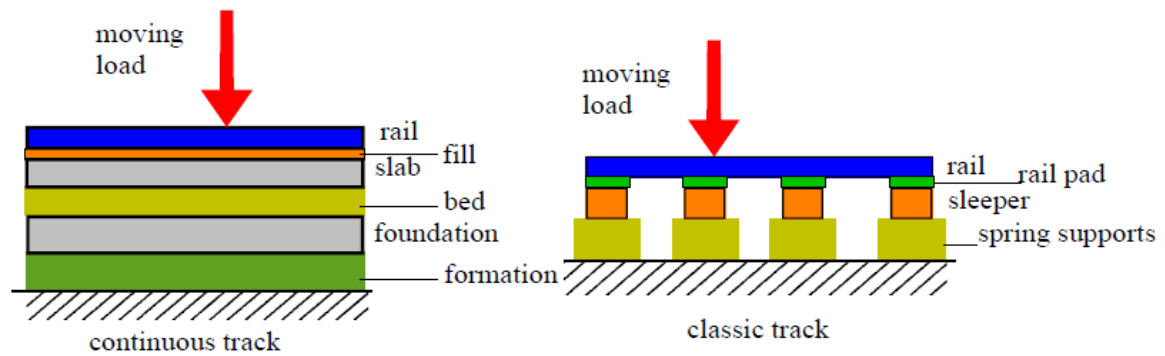


Figura 12: Modelización del programa en vía en placa y en vía en balasto. (Kok, 1998)

Las estructuras embebidas pueden ser apoyadas de manera continua sobre una cimentación elástica, pero también sobre puntos de soporte rígidos. Las condiciones de apoyo elástico pueden variar a lo largo de la dirección de la vía.

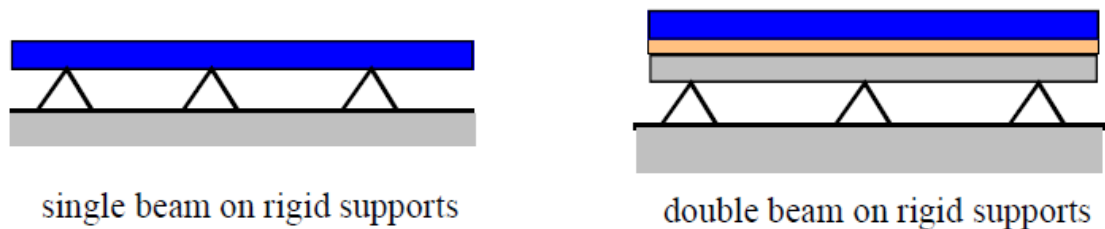


Figura 13: Esquemas de soportes estructurales manejados por el programa. (Kok, 1998)

Las propiedades de rigidez de la cimentación elástica se modelan a partir de la teoría de Winkler o de Zimmerman. Las propiedades dinámicas se caracterizan por el amortiguamiento y las propiedades de inercia.

El sistema permite la introducción tanto de cargas estáticas (fijas) como de cargas dinámicas (ya estén en movimiento o cuyo valor sea variable). A efectos de análisis se considerarán las cargas dinámicas producidas por el paso de un tren en un tramo de 200 metros de vía (ver capítulos 3.2 y 3.3).

El sistema posee una interfaz gráfica a partir de la cual se van añadiendo todos los elementos de los que se compone la vía a modelizar. Sin embargo, existe la opción de modelizar la vía a partir de ficheros de comandos, que es como realmente trabaja el programa. Esta última opción nos permitirá regular mejor la vía a nuestro gusto y es más flexible que las opciones dadas por la interfaz gráfica.

Los resultados, una vez analizados, se pueden exportar para su posterior tratamiento. Estos ficheros, en formato ASCII, pueden emplearse tanto en MATLAB como en EXCEL. Entre los resultados obtenidos encontramos: esfuerzos soportados, aceleraciones, desplazamientos... para cada elemento de la vía. También pueden estudiarse los efectos que produce nuestra vía sobre el tren.

En resumidas cuentas, el DARTS permite hacer lo siguiente:

- Ajustar propiedades de los materiales: permite el estudio de materiales a partir de ensayos realizados en el laboratorio, y la comprobación de que los valores obtenidos son los esperados antes de poder ensayarlos en campo.

3. METODOLOGÍA

- Análisis de la resistencia y rigidez en la vía: el análisis se realiza ejecutando una serie de contactos dinámicos entre el carril y la rueda, para evaluar las tensiones del carril y las deformaciones del carril y de las estructuras de soporte.
- Simulación del comportamiento dinámico del vehículo: el confort de los pasajeros depende de las aceleraciones sufridas por la caja del tren (el límite de confort se considera en 1 m/s^2). La seguridad depende del desplazamiento transversal de las ruedas.
- Permite el cálculo dinámico de vía y permite ver el funcionamiento desde el punto de vista dinámico de una zona de transición.

El programa posee unas limitaciones. Se explican en la siguiente sección.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE VÍA

En este apartado se procederá a explicar los modelos de vía (entiéndase como las características de las diferentes tipologías de vía utilizadas y no como los modelos numéricos empleados).

La vía estará sometida a una serie de esfuerzos que se definirán a continuación:

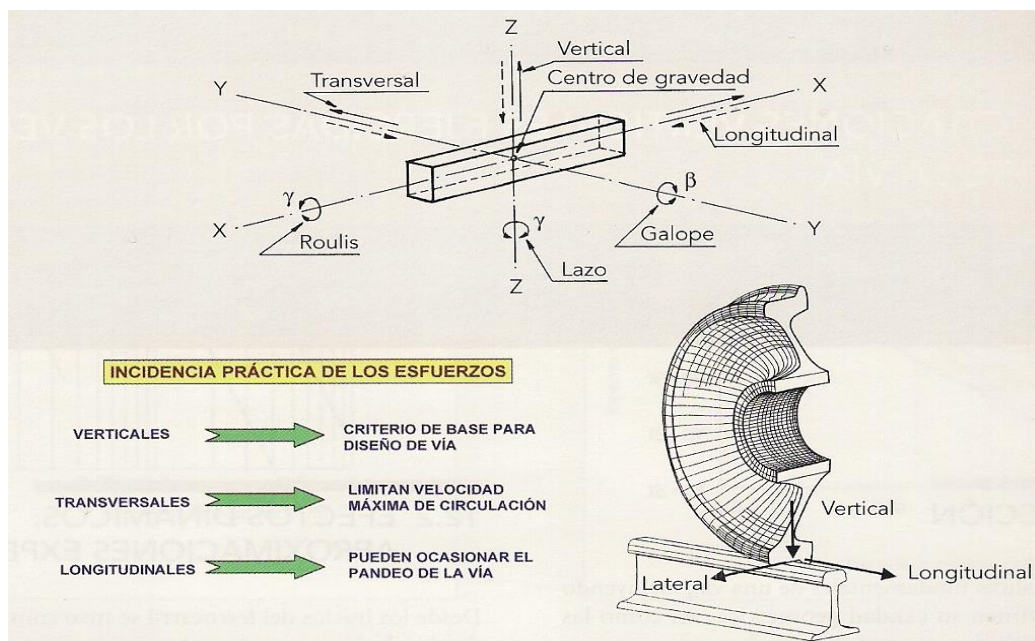


Figura 14: Esquema solicitaciones de una vía.

Estos esfuerzos son importantes de cara a la estabilidad de la vía. Sin embargo, DARTS no permite la simulación de la mecánica transversal de la vía, además que para el análisis de las transiciones son los esfuerzos verticales los que realmente interesan.

Debido a que el cálculo de los esfuerzos puede ser bastante complejo, se ha decidido realizar los siguientes supuestos iniciales:

- La estructura está sujeta a cargas verticales.
- Se tiene en cuenta la simetría en el plano horizontal con respecto al eje de la vía, de cara a los datos introducidos (se meterá la mitad de la longitud real) y a las cargas producidas (las mismas en ambos lados del eje de la vía).

3. METODOLOGÍA

- Las contribuciones de las fuerzas axiales en las capas inferiores se han despreciado.
- La longitud de deflexión de la capa más rígida es mayor que el espesor de la capa rígida.

En los modelos se definirá un tramo de estudio de 200 metros, que contará de un tramo de vía en balasto y otro de vía en placa, ambos de 100 metros de longitud. De cara al estudio del modelo se dividirá el tramo de estudio en elementos de 0,1 metros. La separación normal entre apoyos es de 0,6 metros. Debido a limitaciones geométricas se considerarán traviesas completamente rectangulares y pads de apoyo de 0,3 metros de ancho.

Se definirán los elementos por dimensiones, y según sus propiedades físicas más importantes.

En la siguiente tabla se adjuntan las características geométricas de los elementos:

		VÍA EN BALASTO	VÍA EN PLACA
CARRIL		UIC-60 (dimensiones estándar)	
TRAVIESA	Longitud (m)	1,3	-
	Altura (m)	0,22	-
PLACA	Longitud (m)	-	1,2
	Altura (m)	-	0,246
CAPA DE FORMA	Longitud (m)	2,6	2,4
	Anchura (m)	0,6	0,75

Tabla 1: Características geométricas de la vía modelizada.

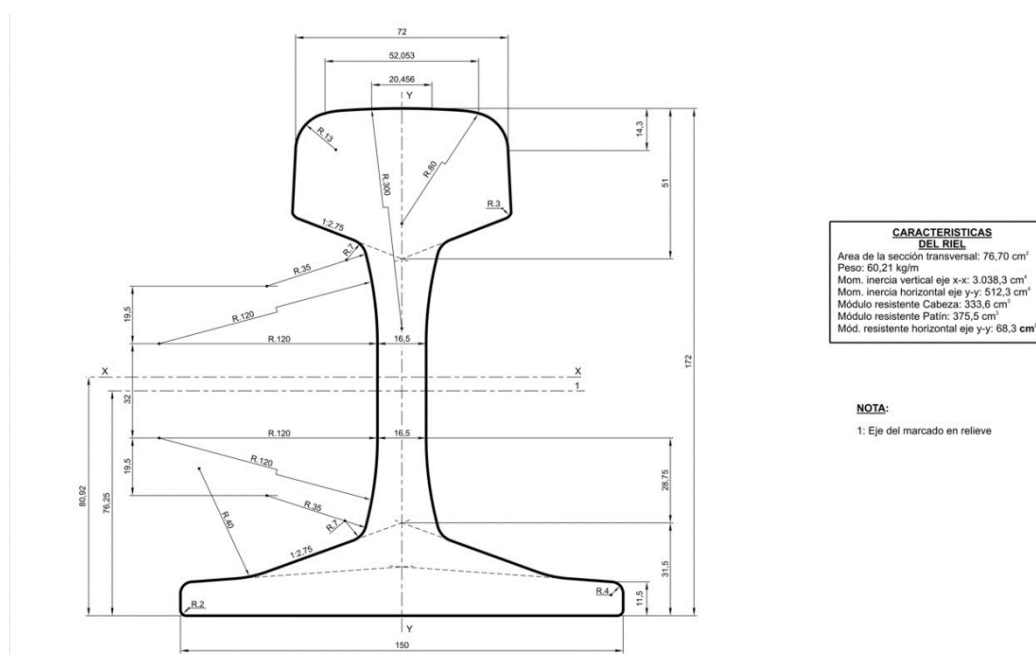


Figura 15: Esquema carril UIC-60

Características carril UIC-60:

- $AX = 76,56 \text{ m}^2$.
- $AY = 34,452 \text{ m}^2$.
- $I_{yy} = 3055$

La traviesa modelizada es la AI-04, comúnmente utilizada en vías de Alta Velocidad.

En la siguiente tabla se adjuntan las propiedades mecánicas de los modelos de vía usados como caso inicial o de referencia:

		VÍA EN BALASTO	VÍA EN PLACA
CARRIL		UIC-60 (ver arriba)	
PADS (por unidad de longitud)	K1 (kN/m)	500.000	165.000
	C1 (kN*s/m)	35	40
TRAVIESA	E (kN/m)	80.000.000	-
	Coef. De Poisson	0,2	-
PLACA	E (kN/m)	-	35.000.000
	Coef. De Poisson	-	0,2
SUBBASE (por unidad de área)	K2 (kN/m)	200.000	80
	C2 (kN·s/m)	24.000.000	200
CAPA DE FORMA	K (kN/m)	1.000.000	
	C (kN·s/m)	20	

Tabla 2: Propiedades mecánicas de los elementos que componen la vía modelizada.

De cara a los cálculos se considera que los valores de las tensiones no se admitirán valores superiores a los 300 kN/m^2 , ya que este es la tensión de rotura del balasto considerado. (Lichtberger, 2011)

3.3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE VEHÍCULO

Se ha visto anteriormente el modelo de vía, las propiedades mecánicas que definen cada uno de los elementos de la misma. La otra parte de la influencia sobre los resultados lo encontramos en el vehículo empleado y de sus propiedades intrínsecas.

En primer lugar se debe definir el modelo empleado para los cálculos efectuados en el tren. Para ello se modeliza el tren como un conjunto de tres masas (denominado sistema de tres masas).

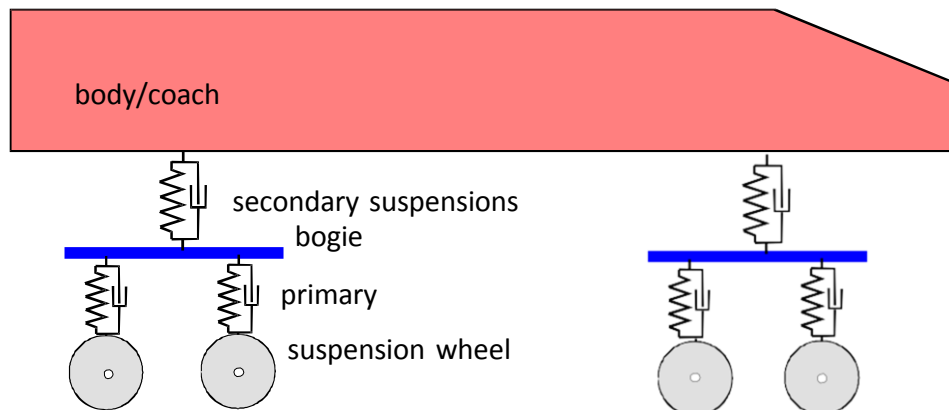


Figura 16: Modelo de tres masas. (Kok, 1998)

Las tres masas, como aparecen en la figura de arriba son:

- La caja del vehículo (en inglés, body) que es la masa suspendida.
- Los bogíes, que son la masa semi-suspendida.
- Las ruedas del vehículo que son las masas no suspendidas al estar en contacto con el carril.

El motivo de que se tome como referencia este modelo es que actualmente es el más empleado en el cálculo de las interacciones rueda – carril.

A efectos de análisis, el tren empleado es una locomotora del tren de alta velocidad Thalys, empleado habitualmente para los servicios de alta velocidad entre París y Bruselas, amén de otros destinos europeos. Se ha decidido emplear este tren debido a que está basado en el TGV y en uno de los modelos de vehículo de alta velocidad más empleados en Europa.



Figura 17: Tren Thalys

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Thalys_PBKA_Refurbished_Nederland.jpg

3. METODOLOGÍA

Debido a la longitud del tramo de estudio, se considerará únicamente la locomotora del tren y no todo el tren completo. El peso de la locomotora es superior al de resto de la composición así que se considera la parte del tren que se comporta de manera más desfavorable con la vía.

Se adjuntan las características de la locomotora Thalys empleada en la simulación, en base a los datos utilizados en la modelización del mismo en nuestras simulaciones:

- Longitud de la locomotora: 22 m.
- Distancia entre los ejes de los bogíes: 14 m.
- Offset de la locomotora (distancia a la referencia origen en la definición): 4 m.
- Propiedades mecánicas de la locomotora:

	Vehículo	Bogíe
K (kN/m)	600	1150
C (kN·s/m)	1,4	2,5

Tabla 3: Propiedades mecánicas de la locomotora "Thalys"

- Masa de la cabeza tractora: 54,1504 kN.
- Propiedades específicas de los bogíes:
 - Masa del bogíe: 2,799 kN.
 - Masa de la rueda: 1,0315 kN.
 - Radio de la rueda: 0,42 m.
 - Distancia entre ruedas (del mismo bogíe): 3 m.

Se considerará una velocidad de circulación del tren en la simulación de 300 km/h, velocidad comercial a la que suele circular este modelo. También se deberá tener en cuenta que se considerará el inicio de las simulaciones a 60 metros del inicio del tramo en estudio.

A efectos de cálculo, se limitarán las aceleraciones verticales al valor de $0,22 \text{ m/s}^2$, pudiendo excepcionalmente llegar a $0,44 \text{ m/s}^2$ (GIF, 2003).

3.4. CASOS DE ESTUDIO

El estudio de la influencia de los apoyos en las zonas de transición debe realizarse modelizando diferentes casos. En ellos se juega con la distancia entre la última traviesa del tramo en vía en balasto con el comienzo del tramo en vía en placa. También se jugará con la distancia entre apoyos, para estudiar los efectos que se producen al separar o juntar apoyos.

Para la modelización se prevén seis casos de estudios:

- CASO 1: en el primer caso se plantea la disposición contigua de una traviesa con el inicio del tramo en vía en placa. Además, los apoyos de ambos elementos estarán prácticamente contiguos (el programa lo modeliza como si fuera un gran apoyo).

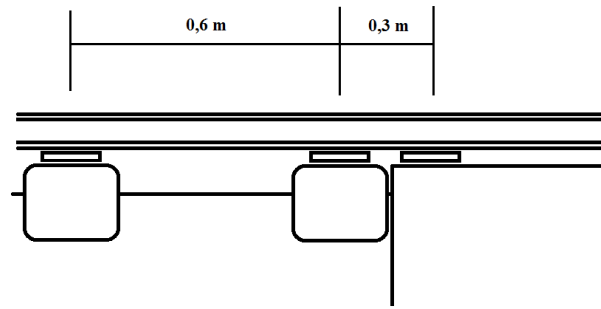


Figura 18: Esquema CASO 1

- CASO 2: en este caso se separa la traviesa de la placa en la longitud estándar, cumpliendo el límite de 60 centímetros de separación entre la última traviesa y el inicio de la zona en placa.

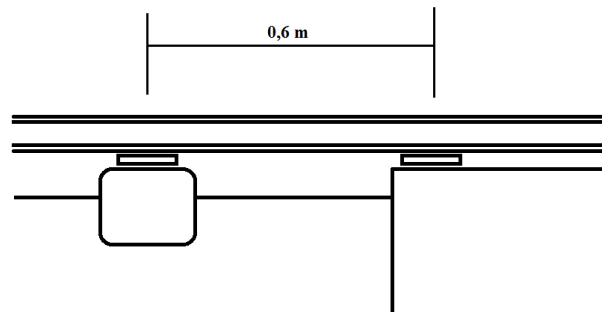


Figura 19: Esquema CASO 2

- CASO 3: este caso es similar al primero, es decir, existe una traviesa pegada al inicio del tramo en vía en placa. Sin embargo, el primer o último apoyo de la vía en placa no se situará al borde de la misma, sino a la separación máxima de 60 centímetros respecto al eje de la traviesa.

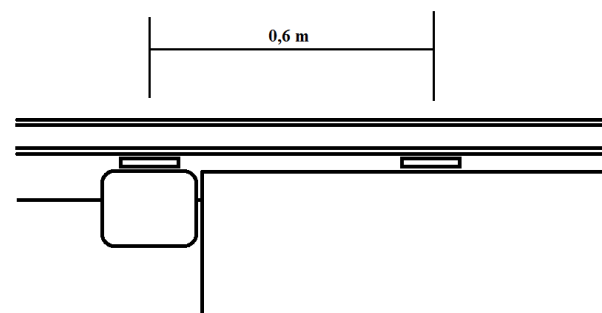


Figura 20: Esquema CASO 3

- CASO 4: en este caso la traviesa se separará de la placa una distancia de 20 centímetros respecto a los bordes de la misma. La distancia entre apoyos seguirá siendo de 60 centímetros entre sus ejes, por lo que el apoyo tampoco estará situado en el borde de la losa.

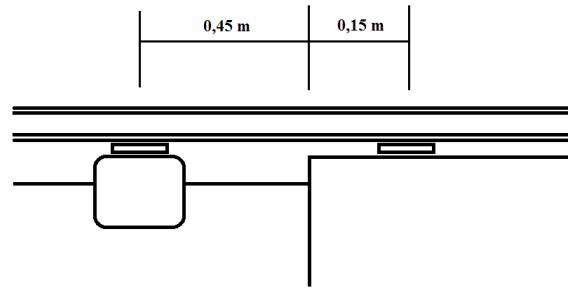


Figura 21: Esquema CASO 4

- CASO 5: se trata del CASO 2 considerando una superficie de apoyo completamente rígida. El objetivo de este caso es estudiar si existe una mejoría en la transmisión de cargas si aumentamos la rigidez de la infraestructura (como por ejemplo ocurre en viaductos).

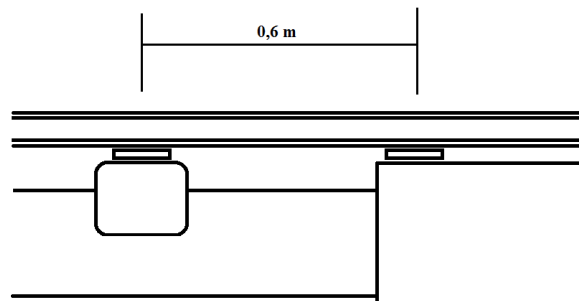


Figura 22: Esquema CASO 5

- CASO 6: es similar al CASO 2, pero considerando una distancia entre los apoyos de la transición de 1 m.

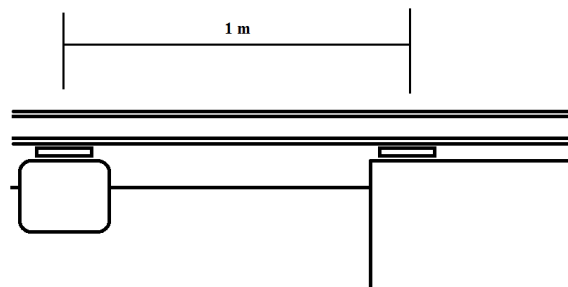


Figura 23: Esquema CASO 6

Para obtener un estudio más completo se considerarán además los dos sentidos de circulación posibles, es decir, se estudiarán las transiciones vía en balasto a vía en placa y viceversa.

Los modelos programados para cada caso de estudio podrán verse en el ANEXO.

4. RESULTADOS

El objetivo de este apartado es el de materializar los resultados obtenidos en el programa DARTS por cada uno de los casos de estudio mencionados anteriormente y para cada sentido de circulación.

Los resultados obtenidos se plasmarán sobre las gráficas. Se comentará brevemente los resultados obtenidos y se realizarán unas conclusiones parciales acerca del comportamiento de cada uno de los modelos.

Para el comentario acerca de los resultados se tomará como caso base el CASO 1, suponiendo que este caso va a ser el más desfavorable en cuanto a los resultados obtenidos.

Los resultados descritos son:

- Los desplazamientos verticales transitorios en las traviesas o en la placa. Además de los valores en sí, se calculará la desviación típica de los desplazamientos del tramo. Sin embargo, estos últimos resultados se expondrán en el siguiente capítulo.
- Las tensiones verticales transitorias de compresión a las que está sometida la vía. Además de ello la vía está sometida a esfuerzos verticales de tracción; sin embargo, se considerarán despreciables debido a su bajo valor y a que no afectan a nuestro estudio.
- Las aceleraciones sufridas en el carril, en las traviesas o en la placa y en la caja del vehículo.

A la hora de presentar los resultados se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones:

- De cara a establecer una nomenclatura de los modelos, a los modelos en los que el sentido de circulación sea vía en balasto a vía en placa se designarán con una I (de “ida”) mientras que en los casos en los que se circule de vía en placa a vía en balasto se les designará con una V (de “vuelta”).
- Los desplazamientos medidos, si bien aparecen en sentido positivo, son descensos de los apoyos.
- Las tensiones medidas, que son de compresión, se han decidido mostrar con su respectivo signo negativo.
- Todos los resultados obtenidos se considerarán transitorios debido a que los datos se obtienen en un intervalo de tiempo pequeño (2 segundos).

CASO 1.I – DE BALASTO A PLACA

DATOS SIGNIFICATIVOS

- Desplazamientos traviesa/placa: valores aproximados de 0,45 mm en balasto. En las proximidades de la transición el valor baja de manera rápidamente progresiva. Después, en la zona de vía en placa los desplazamientos son inferiores a 0,1 mm.

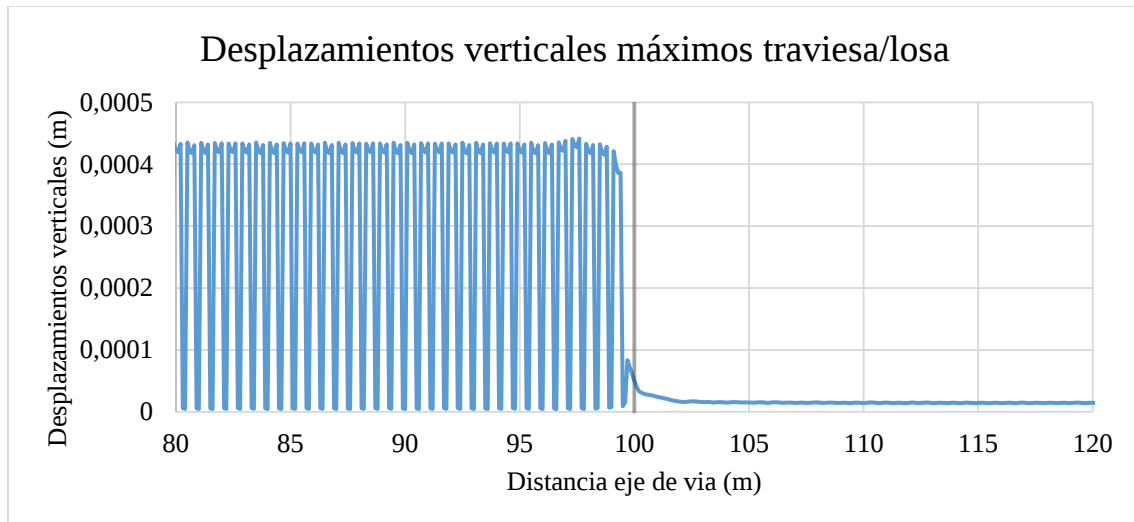


Figura 24: Desplazamientos verticales máximos en la traviesa/losa CASO 1.I

- **Tensiones traviesa/placa:** en la zona de balasto se producen tensiones cercanas a los 300 kN/m^2 . En la zona de vía en placa las tensiones se reducen a aproximadamente 100 kN/m^2 . Sin embargo, en la transición y justo en el comienzo de la vía en plaza, se produce un pico de más de 1000 kN/m^2 que puede ser muy peligroso para la estabilidad de la vía (supera por mucho el límite de 300 kN/m^2).

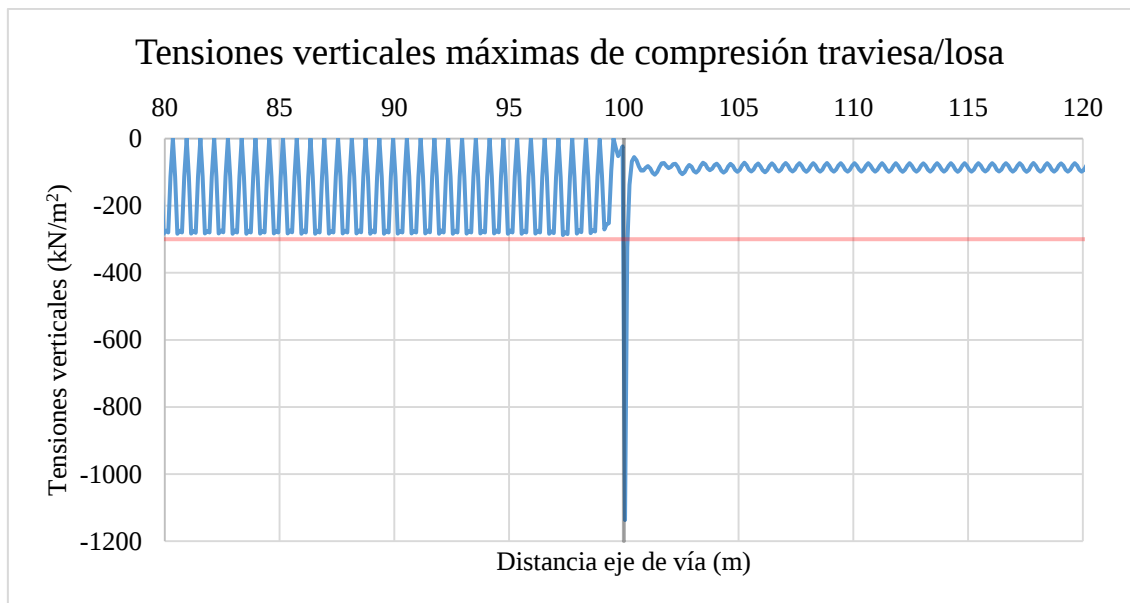


Figura 25: Tensiones verticales máximas de compresión traviesa/losa CASO 1.I

- **Aceleraciones carril:** valores más o menos constantes de 7 m/s^2 en la zona de vía en balasto, y valores variables entre 7 y 9 m/s^2 en la zona de vía en placa. En la transición se producen una serie de picos, alguno de los cuales alcanza valores superiores a los 15 m/s^2 (en la zona de vía en balasto).

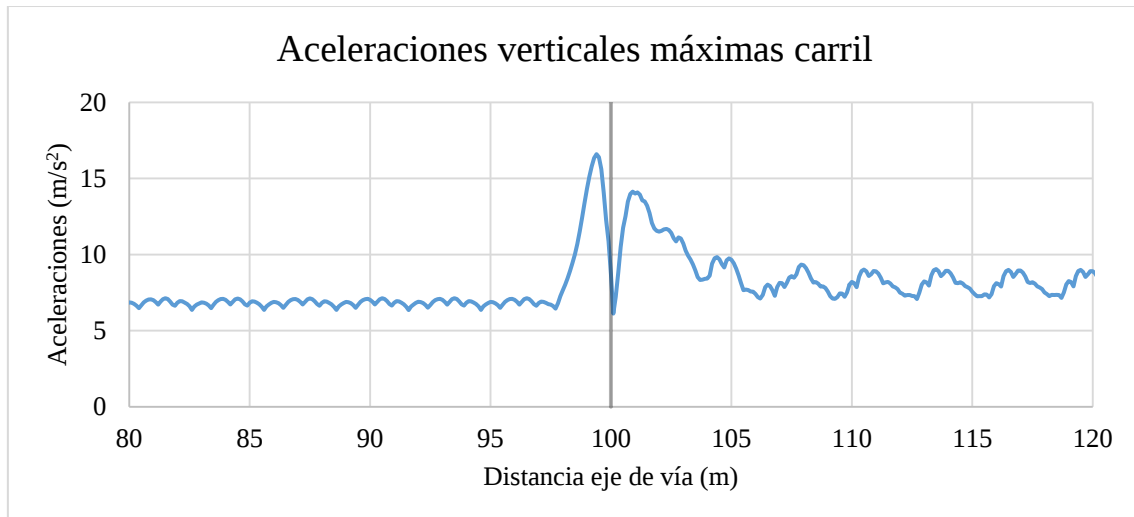


Figura 26: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 1.I

- Aceleraciones traviesa/placa: valores variables alcanzando picos de 11 m/s^2 en la zona de vía en balasto, alcanzándose picos de casi 13 m/s^2 en las proximidades de la zona de transición. Tras empezar el tramo de vía en placa, las aceleraciones disminuyen de manera exponencial, situándose posteriormente y de manera constante por debajo de 1 m/s^2 .

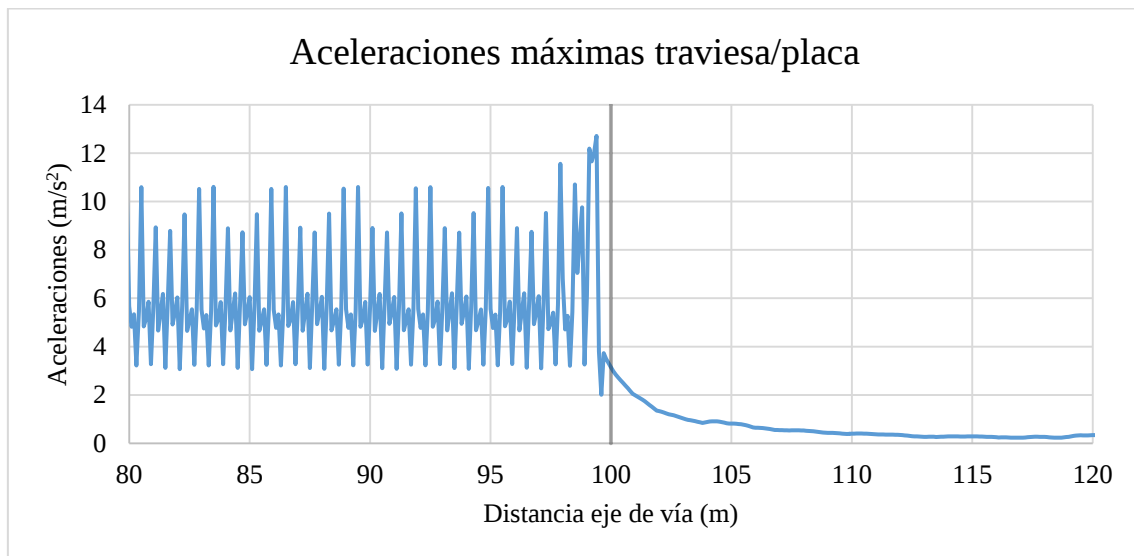


Figura 27: Aceleraciones verticales máximas en la traviesa/losa CASO 1.I

- Aceleraciones tren: se mantienen en valores correctos, variando entre aproximadamente $0,004 \text{ m/s}^2$ para aceleraciones positivas y $0,002 \text{ m/s}^2$ para aceleraciones negativas.

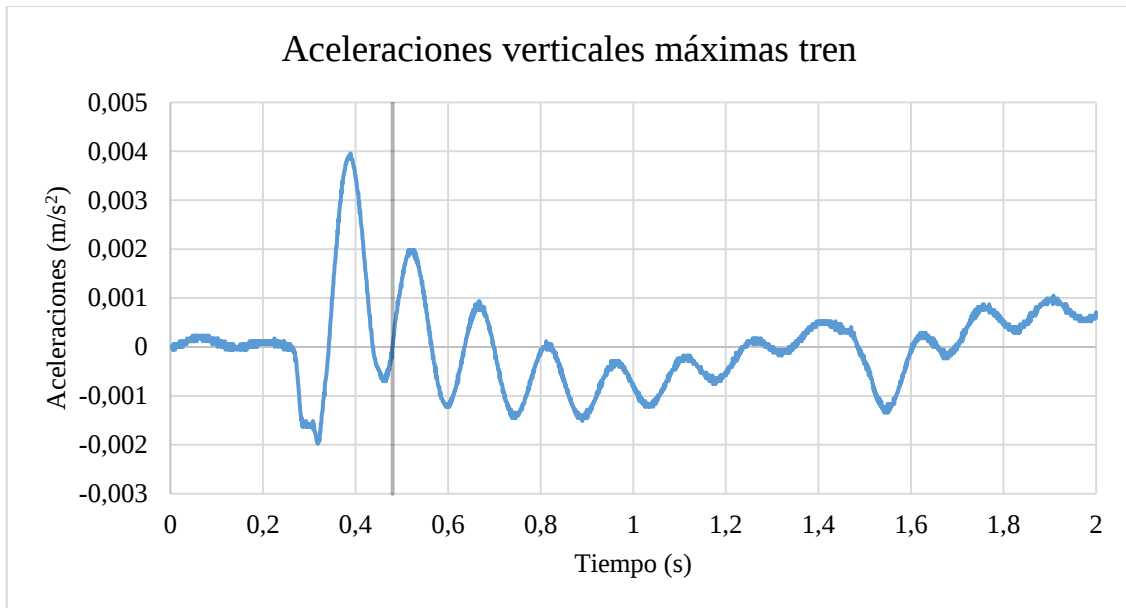


Figura 28: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 1.I

COMENTARIOS

Esta disposición permite cierta progresividad en cuanto a los valores de los desplazamientos. Sin embargo, este caso es el más peligroso estructuralmente ya que el comienzo de la losa debe aguantar unas tensiones muy elevadas que pueden provocar su rotura. Respecto a las aceleraciones no hay nada que destacar, salvo que se mantienen dentro de valores correctos.

CASO 1.V - DE PLACA A BALASTO

DATOS SIGNIFICATIVOS

- Desplazamientos traviesa/placa: valores muy inferiores a 0,1 mm en placa. Valores aproximados de 0,45 mm en balasto. Justo después de la transición se produce un rápido aumento progresivo de los desplazamientos hasta un pico máximo de casi 0,55 mm antes de establecerse en los 0,45 mm mencionados.

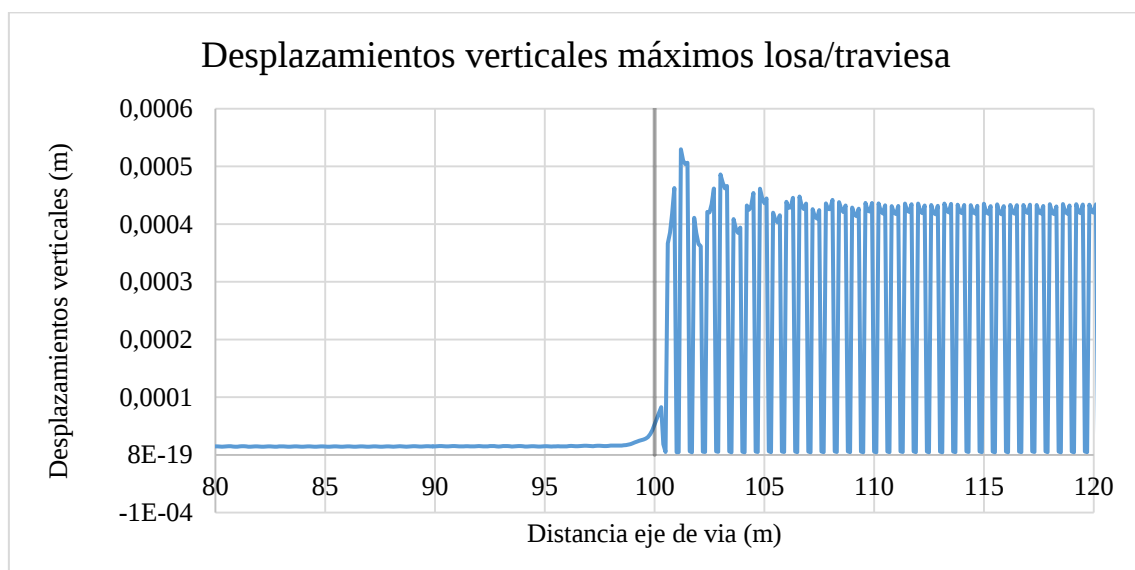


Figura 29: Desplazamientos verticales máximos en la losa/traviesa CASO 1.V

- Tensiones traviesa/placa: en la zona de vía en placa se producen tensiones cercanas a los 100 kN/m². En la zona de vía en balasto las tensiones se amplían a aproximadamente 300 kN/m². Sin embargo, en la transición y justo al final de la vía en placa, se produce un pico de casi 600 kN/m² que puede ser peligroso para la estabilidad de la vía.

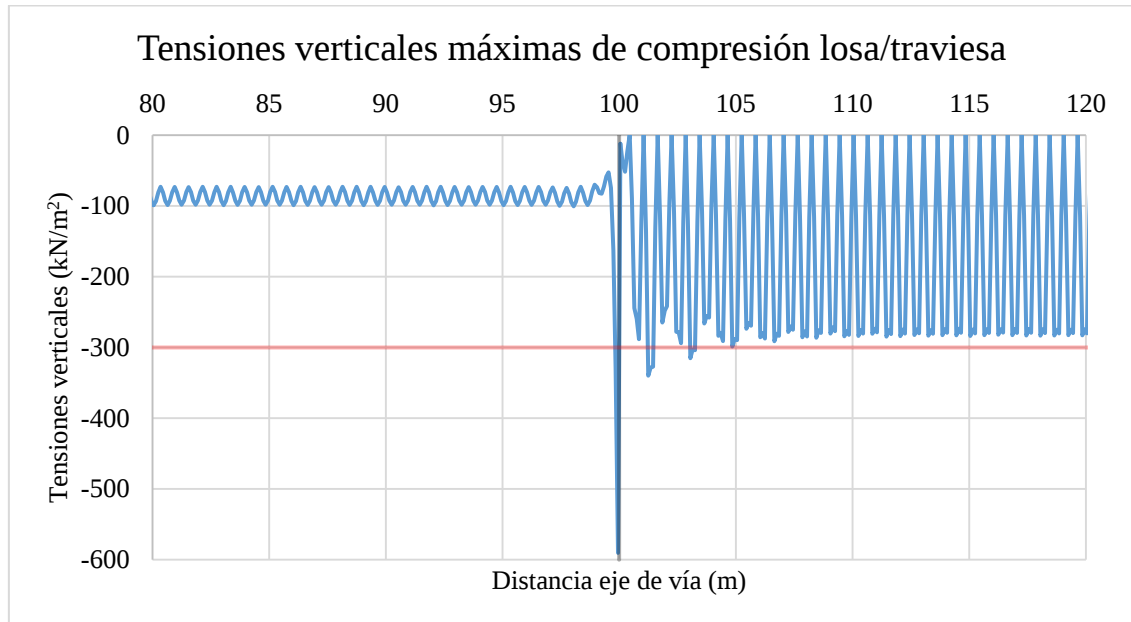


Figura 30: Tensiones verticales máximas de compresión losa/traviesa CASO 1.V

- Aceleraciones carril: valores más o menos variables entre 7 y 9 m/s² en la zona de vía en placa, y valor casi constante de 7 m/s² en la zona de vía en balasto. En la transición se producen una serie de picos, alguno de los cuales alcanza valores superiores a los 15 m/s² (en la zona de vía en placa).

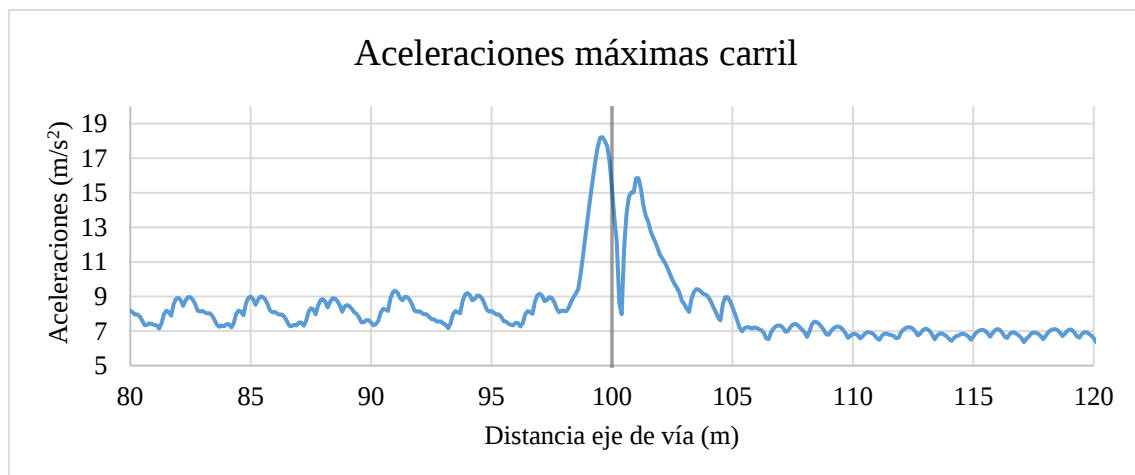


Figura 31: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 1.V

- Aceleraciones traviesa/placa: aceleraciones de casi 1 m/s² en el tramo de vía en placa. Valores variables alcanzando picos de 11 m/s² en la zona de vía en balasto. Justo antes de la transición los valores van aumentando exponencialmente. Justo después de la transición se produce un pico de 15 m/s².

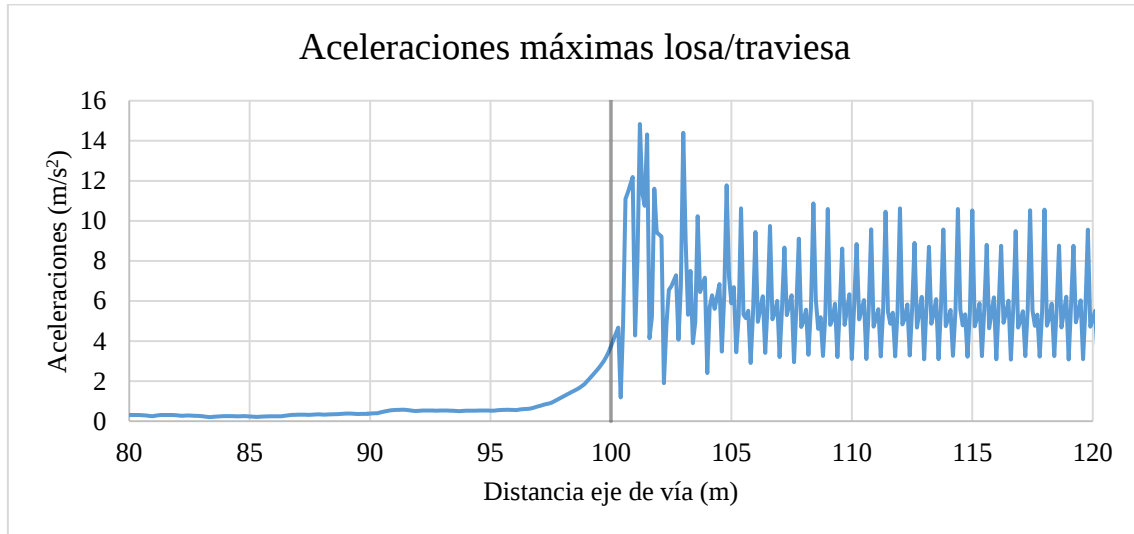


Figura 32: Aceleraciones verticales máximas en la losa/traviesa CASO 1.V

- Aceleraciones tren: se mantienen en valores correctos, variando entre aproximadamente 0,002 m/s² para aceleraciones positivas y 0,004 m/s² para aceleraciones negativas.

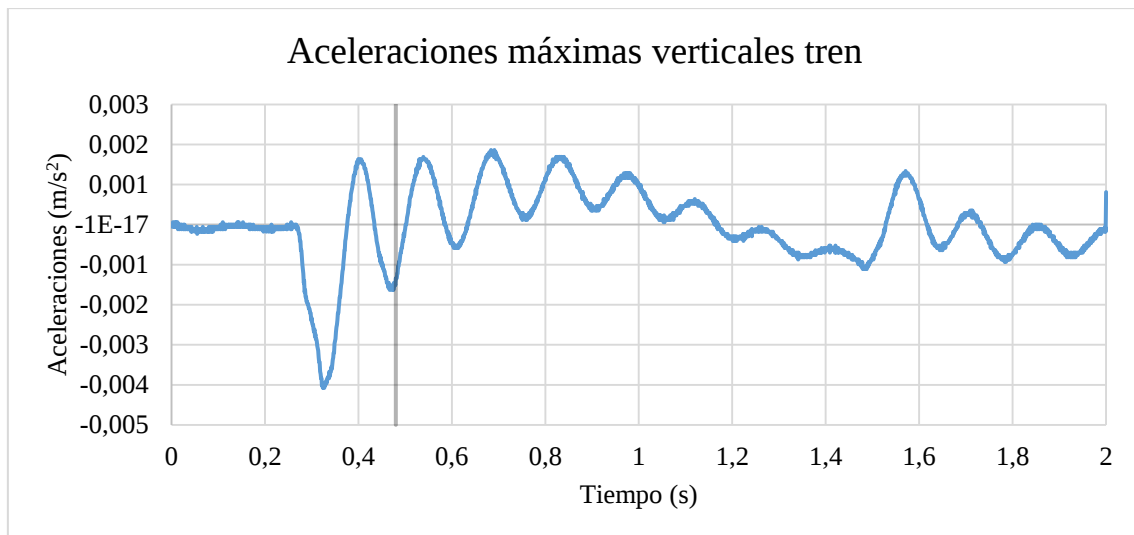


Figura 33: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 1.V

COMENTARIOS

Los desplazamientos son algo superiores a los sufridos por la vía con trenes circulando en sentido contrario en esta disposición, además de superar el límite de 0,5 mm contemplados en la norma. Las tensiones sufridas son similares, pero a destacar el pico máximo cuyo valor es aproximadamente la mitad que el sufrido en el caso de circulación en sentido opuesto al final (en este caso) de la losa de vía en placa, debido a que existe una mayor superficie de inicio que puede absorber los esfuerzos producidos, aunque sin cumplir por mucho el límite de tensiones admisibles. Destacar que se producen las mismas aceleraciones en el carril en un sentido u en otro. Las aceleraciones en traviesa/placa son, sin embargo, diferentes, destacando el punto inmediatamente posterior a la transición donde las aceleraciones pico son superiores al caso de circulación en sentido opuesto.

CASO 2.I – DE BALASTO A PLACA**DATOS SIGNIFICATIVOS**

- Desplazamientos traviesa/placa: valores aproximados de 0,45 mm en balasto. Después, en la zona de vía en placa los desplazamientos son inferiores a 0,1mm. Entre ambos valores se produce un salto.

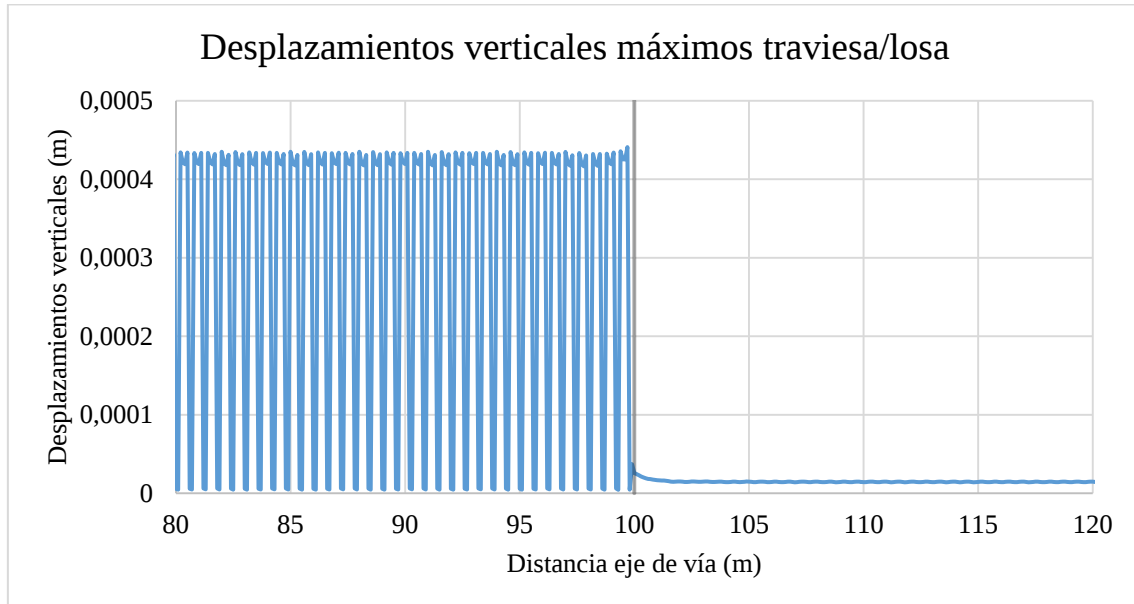


Figura 34: Desplazamientos verticales máximos en la traviesa/losa CASO 2.I

- Tensiones traviesa/placa: en la zona de balasto se producen tensiones cercanas a los 300 kN/m². En la zona de vía en placa las tensiones se reducen a aproximadamente 100 kN/m². En la transición y justo en el comienzo de la vía en plaza, se produce un pico de poco más de 300 kN/m².

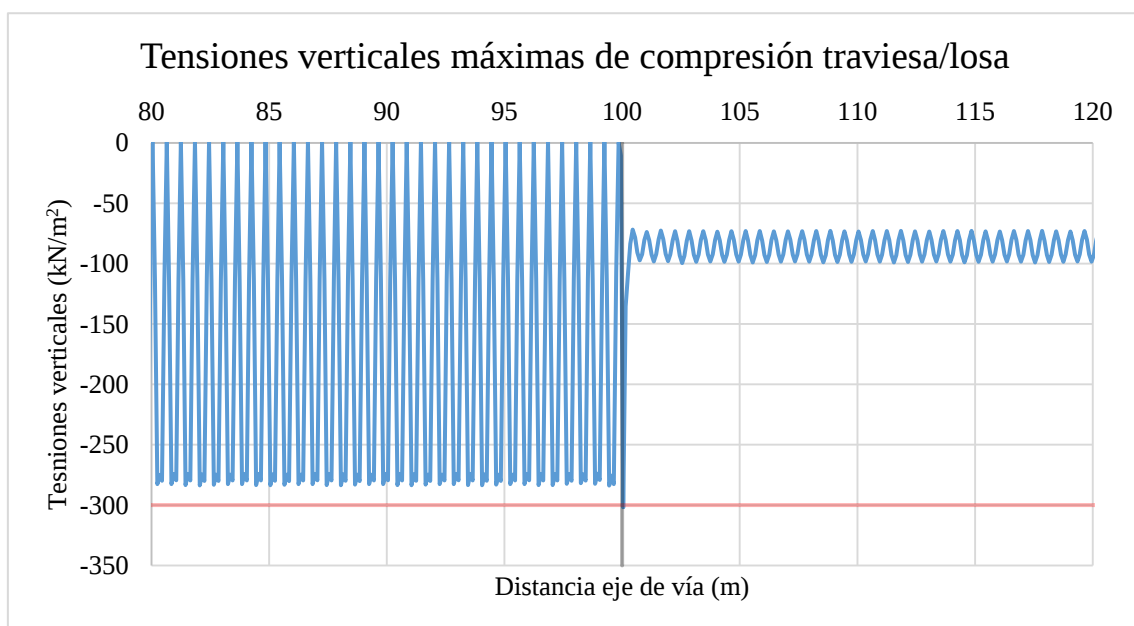


Figura 35: Tensiones verticales máximas de compresión traviesa/losa CASO 2.I

- Aceleraciones carril: valores más o menos constantes de 7 m/s^2 en la zona de vía en balasto, y valores variables entre 7 y 9 m/s^2 en la zona de vía en placa. No se producen picos en la transición, sino que simplemente el cambio se produce de manera inmediata.

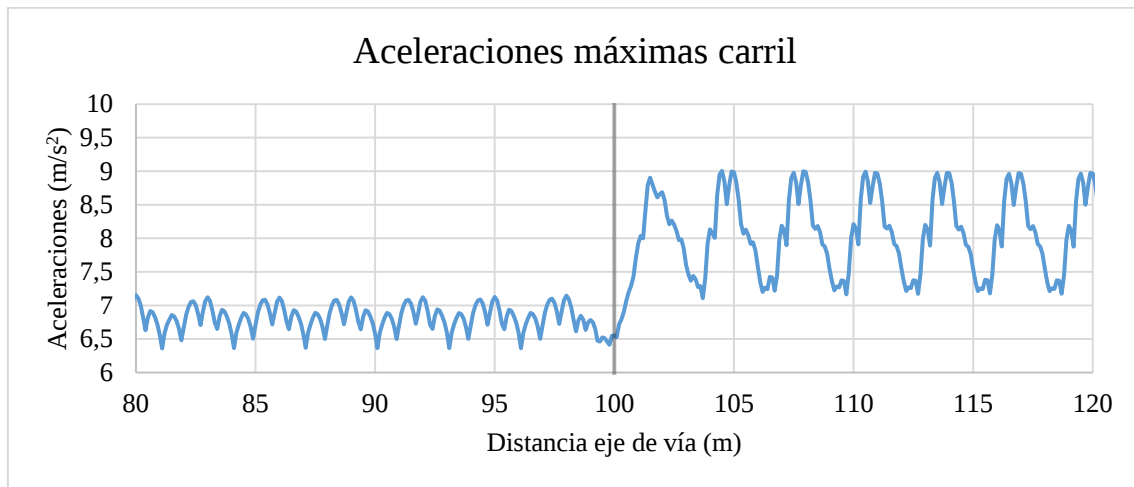


Figura 36: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 2.I

- Aceleraciones traviesa/placa: valores variables alcanzando picos de 11 m/s^2 en la zona de vía en balasto. Tras empezar el tramo de vía en placa, las aceleraciones bajan bruscamente a valores de menos de 1 m/s^2 .

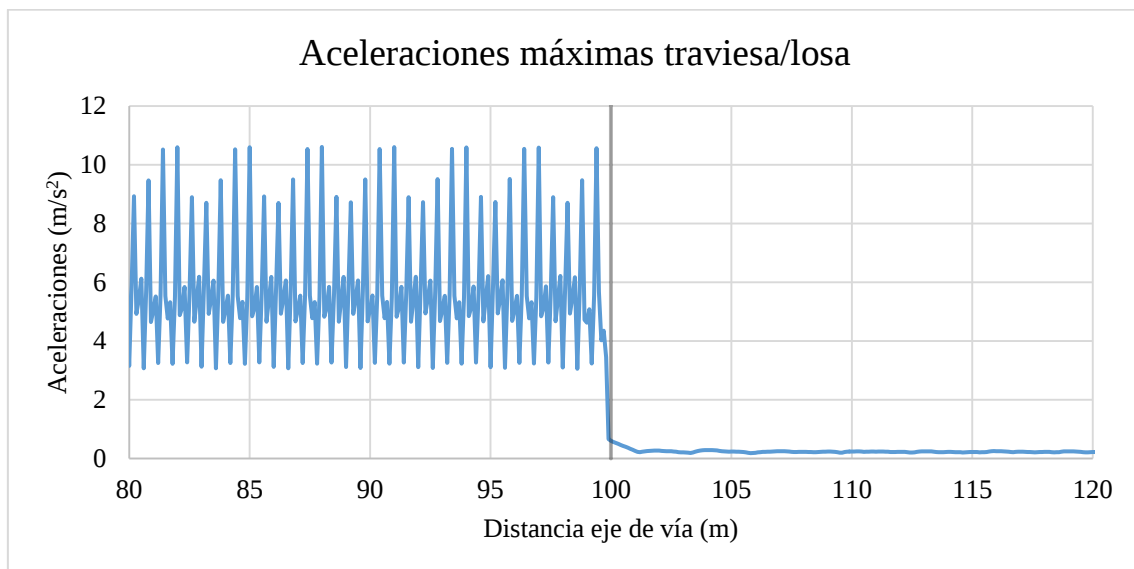


Figura 37: Aceleraciones verticales máximas en la traviesa/losa CASO 2.I

- Aceleraciones tren: se mantienen en valores correctos, variando entre aproximadamente $0,002 \text{ m/s}^2$ para aceleraciones tanto positivas como negativas.

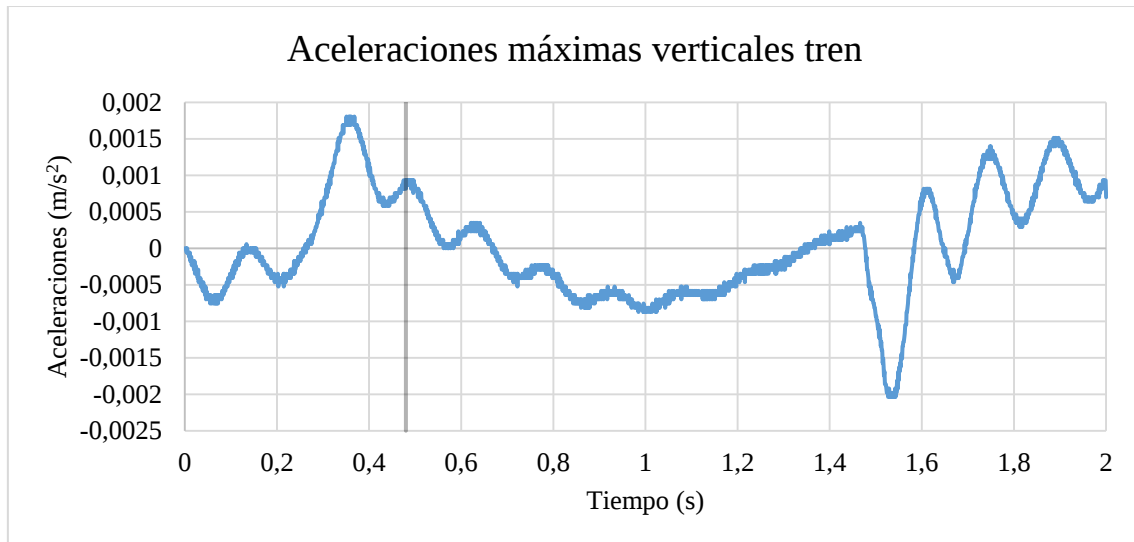


Figura 38: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 2.I

COMENTARIOS

Los cambios en los desplazamientos con esta disposición son un poco más bruscos, aunque con valores un poco inferiores con respecto al primer modelo. Sin embargo, esta disposición produce tensiones pico muy inferiores a los de los anteriores modelos, de manera que la losa de la placa debe aguantar valores similares a los que sufren las traviesas de un tramo de vía en balasto. Los valores de las aceleraciones tanto en el carril como en las traviesas/placa son similares a los anteriores pero sin producirse picos, aunque el valor máximo obtenido supera ligeramente el umbral establecido de 300 kN/m^2 de tensión máxima de compresión. Sin embargo, en la transición no se produce una disminución relativamente gradual de las aceleraciones, sino que este cambio se realiza de manera aún más brusca. Los valores de aceleración sufridos por el tren son, sin embargo, prácticamente idénticos. Destacar además una reducción en las aceleraciones del cuerpo del tren, concretamente la aceleración positiva es entorno a la mitad que en el primer modelo.

CASOO 2.V – DE PLACA A BALASTO

DATOS SIGNIFICATIVOS

- Desplazamientos traviesa/placa: valores aproximados de 0,45 mm en balasto. Después, en la zona de vía en placa los desplazamientos son inferiores a 0,1mm. Entre ambos valores se produce un salto, habiendo un pequeño pico tras la transición de poco más de 0,45 mm.

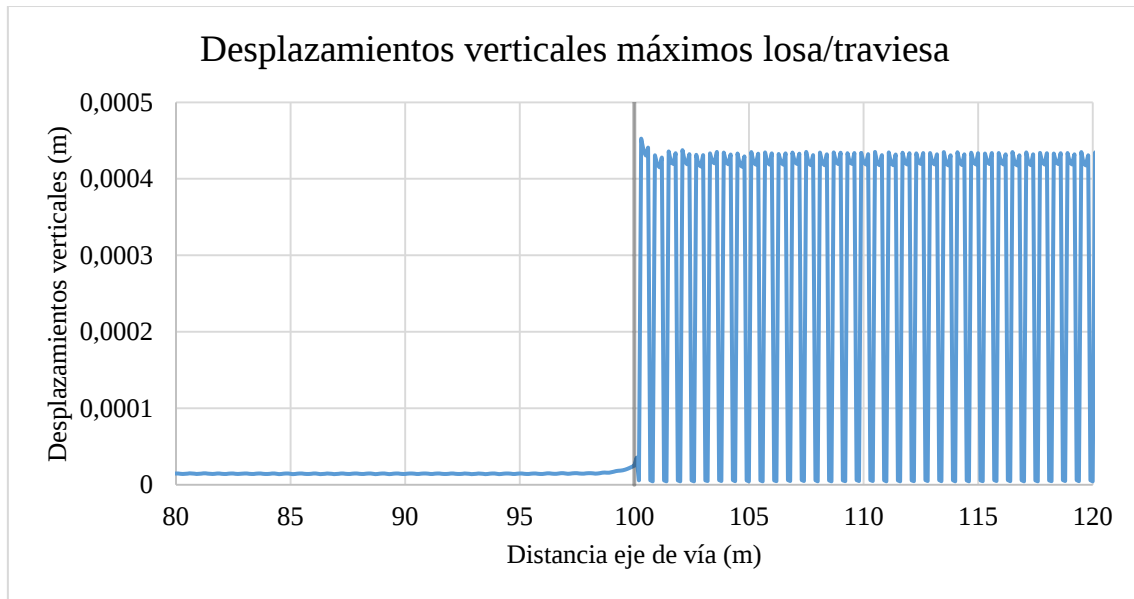


Figura 39: Desplazamientos verticales máximos en la losa/traviesa CASO 2.V

- Tensiones traviesa/placa: en la zona de vía en placa se producen tensiones cercanas a los 100 kN/m². En la zona de vía en balasto las tensiones se amplían a aproximadamente 300 kN/m². Se produce un pequeño pico justo después de la transición de casi 300 kN/m² que afecta al comienzo del tramo de vía en balasto.

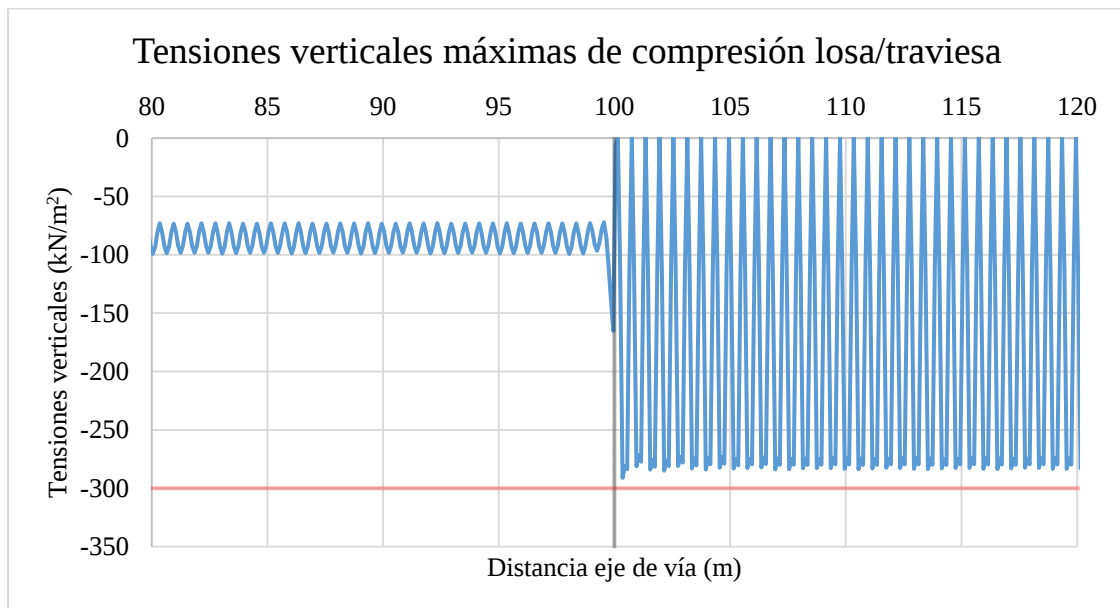


Figura 40: Tensiones verticales máximas de compresión losa/traviesa CASO 2.V

- Aceleraciones carril: valores variables entre 7 y 9 m/s² en la zona de vía en placa, y valores más o menos constantes de 7 m/s² en la zona de vía en balasto. No se producen picos en la transición, sino que simplemente el cambio se produce de manera inmediata.

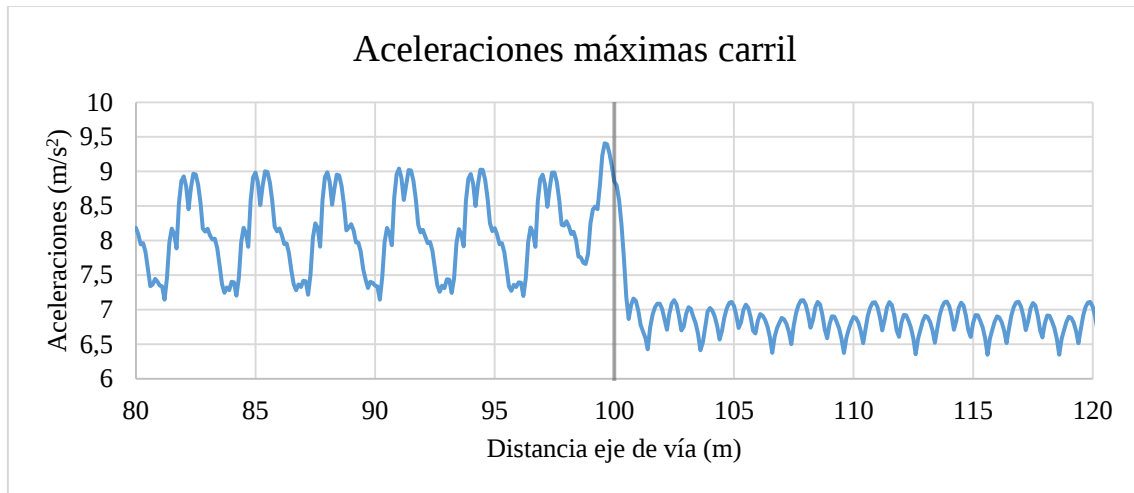


Figura 41: Aceleraciones máximas verticales en el carril CASO 2.V

- Aceleraciones traviesa/placa: valores aproximados por debajo de 1 m/s^2 en la zona de vía en placa. Tras empezar el tramo de vía en balasto, las aceleraciones suben de manera algo brusca a valores variables con picos de 11 m/s^2 aproximadamente.

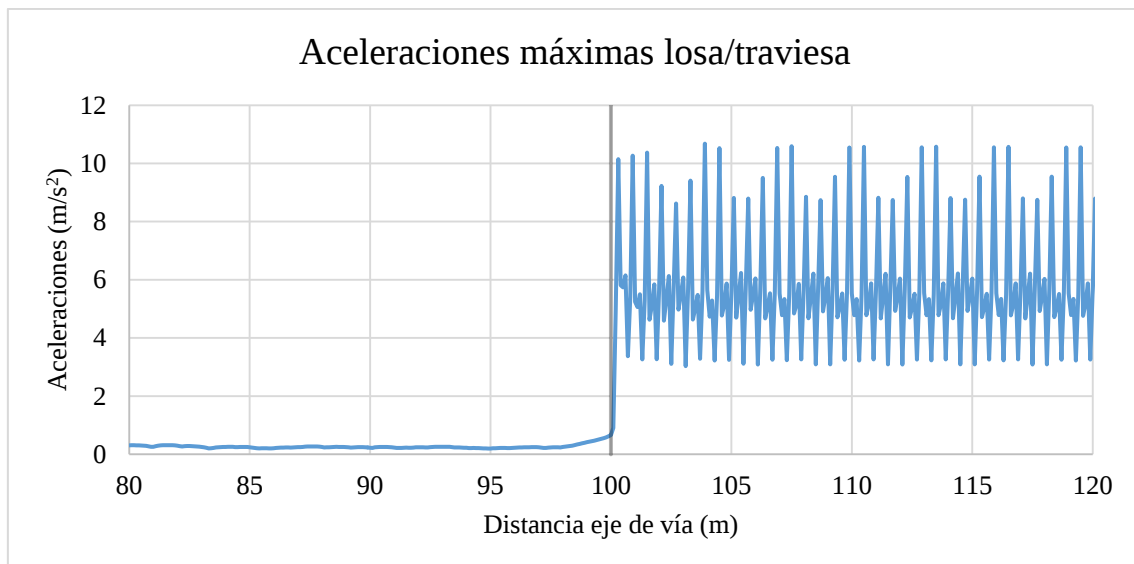


Figura 42: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 2.V

- Aceleraciones tren: se mantienen en valores correctos, variando entre aproximadamente $0,002 \text{ m/s}^2$ para aceleraciones tanto positivas como negativas.

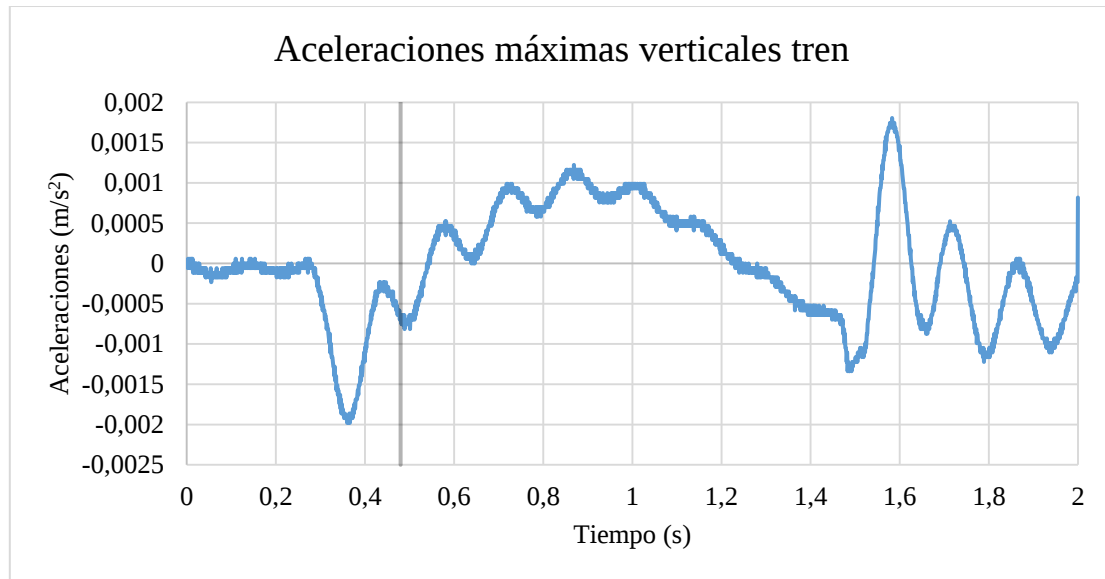


Figura 43: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 2.V

COMENTARIOS

De manera similar a lo que sucede en sentido contrario, los desplazamientos son ligeramente inferiores pero un poco más bruscos que en el primer modelo. No se produce apenas pico de tensiones, en comparación con el primer modelo, aunque llama la atención que el pico se produce justo después de la transición (en la zona de vía en balasto) y no antes (en la zona de vía en placa), como sucedía en el primer modelo. Se trata del primer modelo cuyos valores de tensiones de compresión no alcanzan los 300 kN/m^2 admisibles (aunque en sentido contrario si se alcanza este valor). Los valores de las aceleraciones tanto en el raíl como en las traviesas/placa son similares a los anteriores pero sin producirse picos, pero a cambio en la transición no se produce un aumento relativamente gradual de las aceleraciones, sino que este cambio se realiza de manera aún más brusca. Destacar además una reducción en las aceleraciones del cuerpo del tren, concretamente la aceleración negativa es entorno a la mitad que en el primer modelo.

CASO 3.I - DE BALASTO A PLACA

DATOS SIGNIFICATIVOS

- Desplazamientos traviesa/placa: valores aproximados de 0,45 mm en balasto. En las proximidades de la transición el valor baja de manera rápidamente progresiva. Después, en la zona de vía en placa los desplazamientos son inferiores a 0,1 mm.

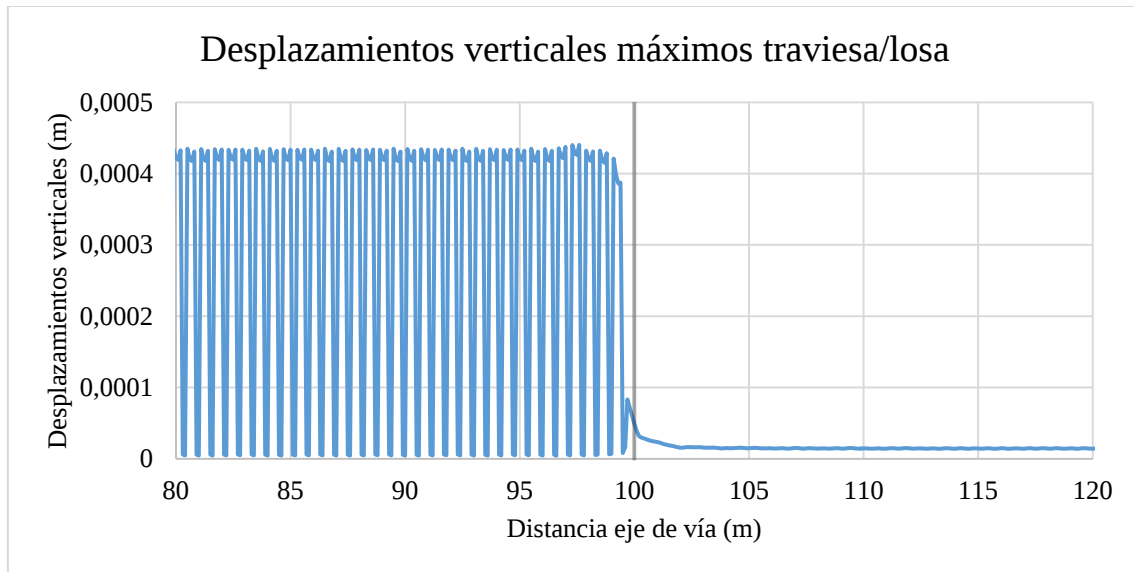


Figura 44: Desplazamientos verticales máximos en la traviesa/losa CASO 3.I

- Tensiones traviesa/placa: en la zona de balasto se producen tensiones cercanas a los 300 kN/m². En la zona de vía en placa las tensiones se reducen a aproximadamente 100 kN/m². Sin embargo, en la transición y justo en el comienzo de la vía en placa, se produce un pico de más de 1000 kN/m² que puede ser muy peligroso para la estabilidad de la vía.

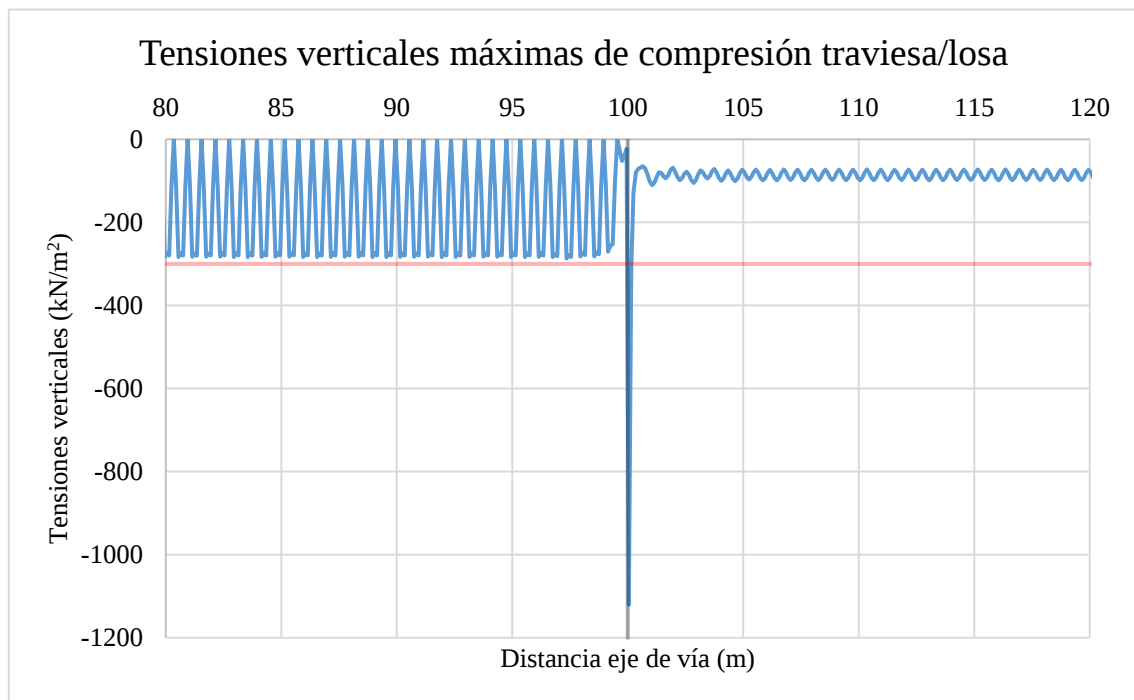


Figura 45: Tensiones verticales máximas de compresión traviesa/losa CASO 3.I

- Aceleraciones carril: valores más o menos constantes de 7 m/s² en la zona de vía en balasto, y valores variables entre 7 y 9 m/s² en la zona de vía en placa. En la transición se producen una serie de picos, alguno de los cuales alcanza valores superiores a los 15 m/s² (en la zona de vía en balasto).

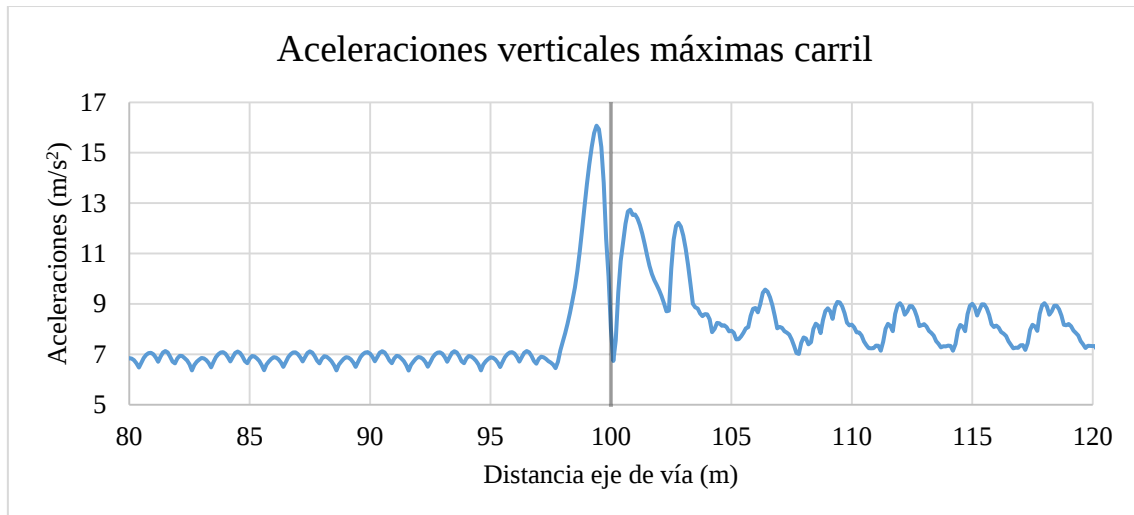


Figura 46: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 3.I

- Aceleraciones traviesa/placa: valores variables alcanzando picos de 11 m/s^2 en la zona de vía en balasto, alcanzándose picos de 12 m/s^2 en las proximidades de la zona de transición. Tras empezar el tramo de vía en placa, las aceleraciones disminuyen de manera exponencial, situándose posteriormente y de manera constante por debajo de 1 m/s^2 .

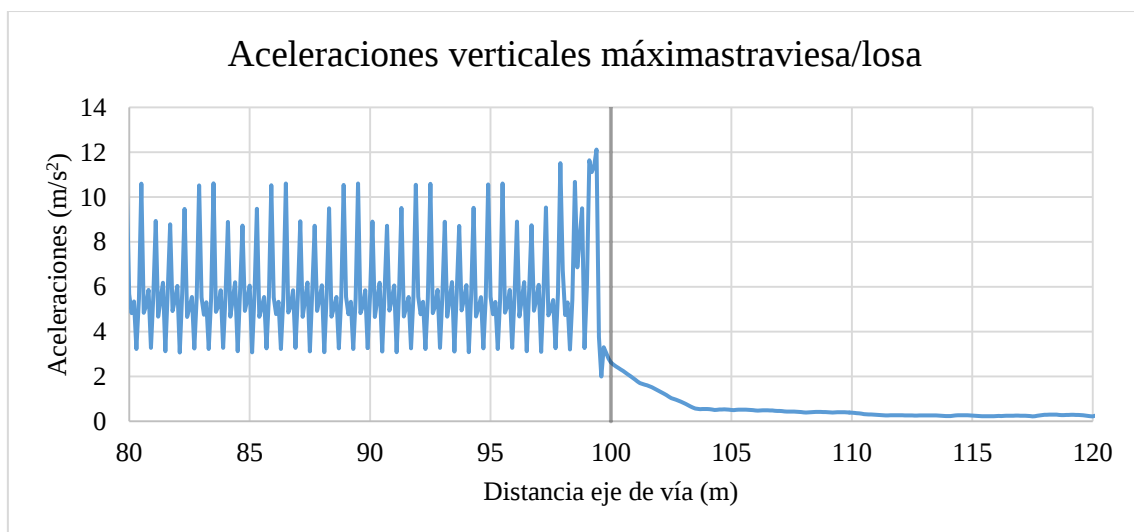


Figura 47: Aceleraciones verticales máximas en la traviesa/losa CASO 3.I

- Aceleraciones tren: se mantienen en valores correctos, variando entre aproximadamente $0,004 \text{ m/s}^2$ para aceleraciones positivas y $0,002 \text{ m/s}^2$ para aceleraciones negativas.

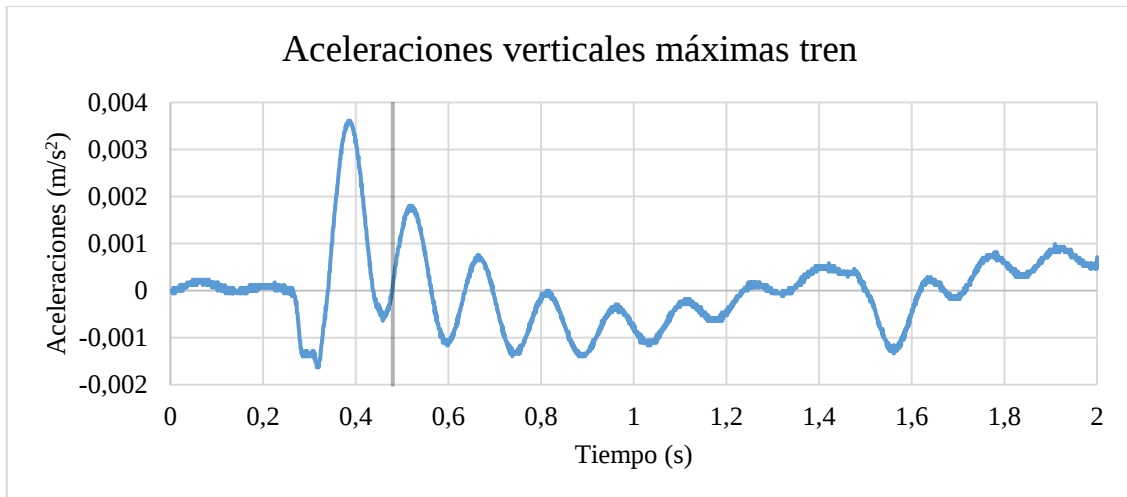


Figura 48: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 3.I

COMENTARIOS

Este modelo, que se tomó en base al CASO 1 como variante para la obtención de resultados más óptimos, no aporta ninguna mejora al respecto el primer modelo. Los resultados son prácticamente idénticos y de ninguna manera, y al igual que pasa en el primer modelo, esta solución no es viable.

CASO 3.V - DE PLACA A BALASTO

DATOS SIGNIFICATIVOS

- Desplazamientos traviesa/placa: valores muy inferiores a 0,1 mm en placa. Valores aproximados de 0,45 mm en balasto. Justo después de la transición se produce un rápido aumento progresivo de los desplazamientos hasta un pico máximo de casi 0,55 mm antes de establecerse en los 0,45 mm mencionados.

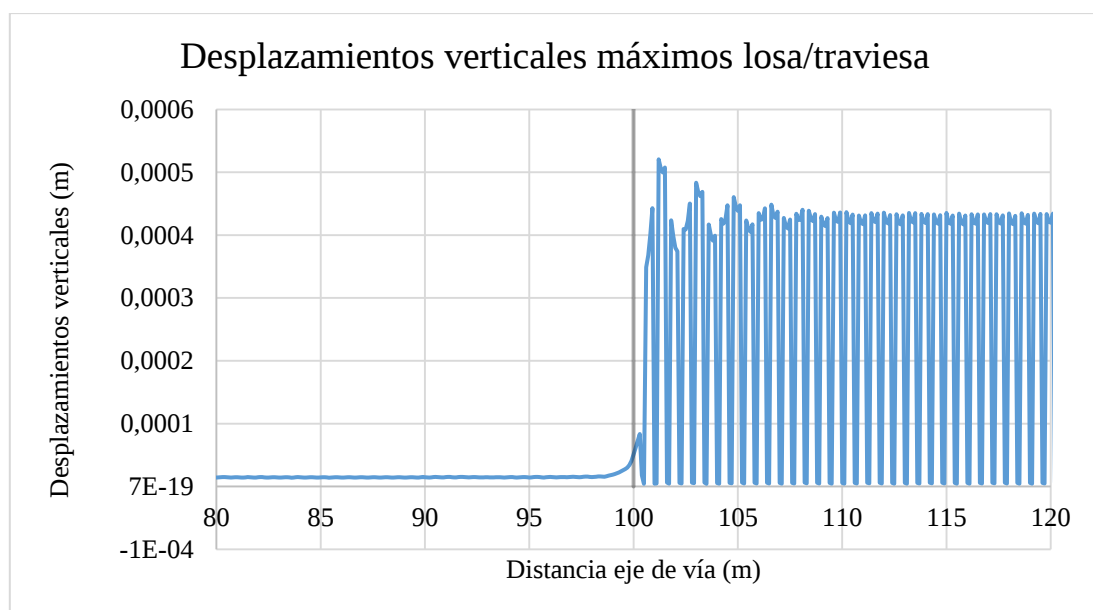


Figura 49: Desplazamientos verticales máximos en la losa/traviesa CASO 3.V

- Tensiones traviesa/placa: en la zona de vía en placa se producen tensiones cercanas a los 100 kN/m². En la zona de vía en balasto las tensiones se amplían a aproximadamente 300 kN/m². Sin embargo, en la transición y justo al final de la vía en placa, se produce un pico de casi 600 kN/m² que puede ser peligroso para la estabilidad de la vía.

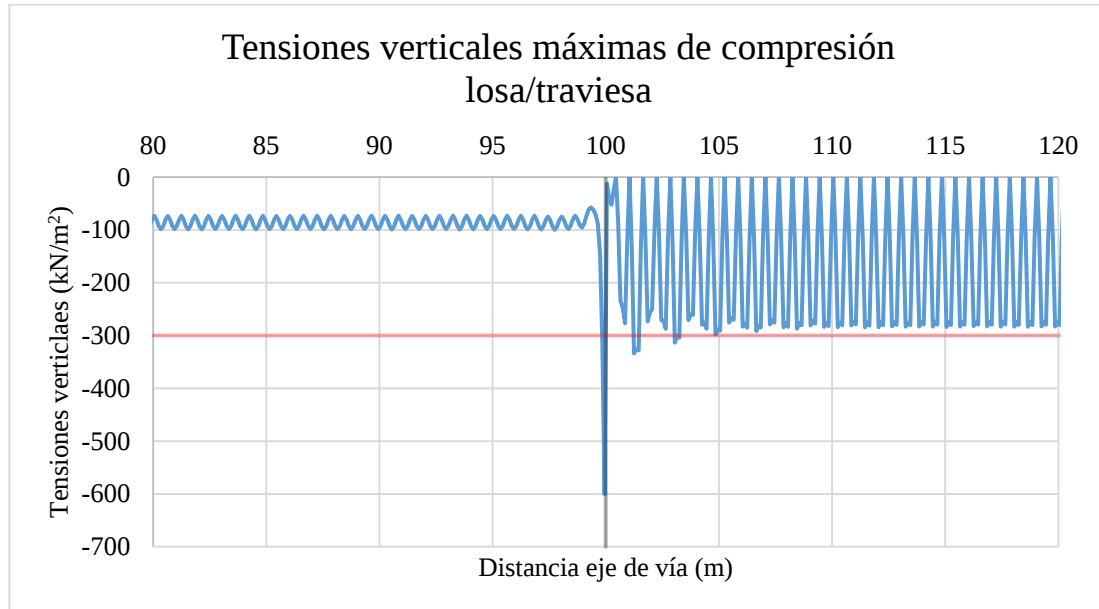


Figura 50: Tensiones verticales máximas de compresión losa/traviesa CASO 3.V

- Aceleraciones carril: valores más o menos variables entre 7 y 9 m/s² en la zona de vía en placa, y valor casi constante de 7 m/s² en la zona de vía en balasto. En la transición se producen una serie de picos, alguno de los cuales alcanza valores superiores a los 15 m/s² (en la zona de vía en placa).

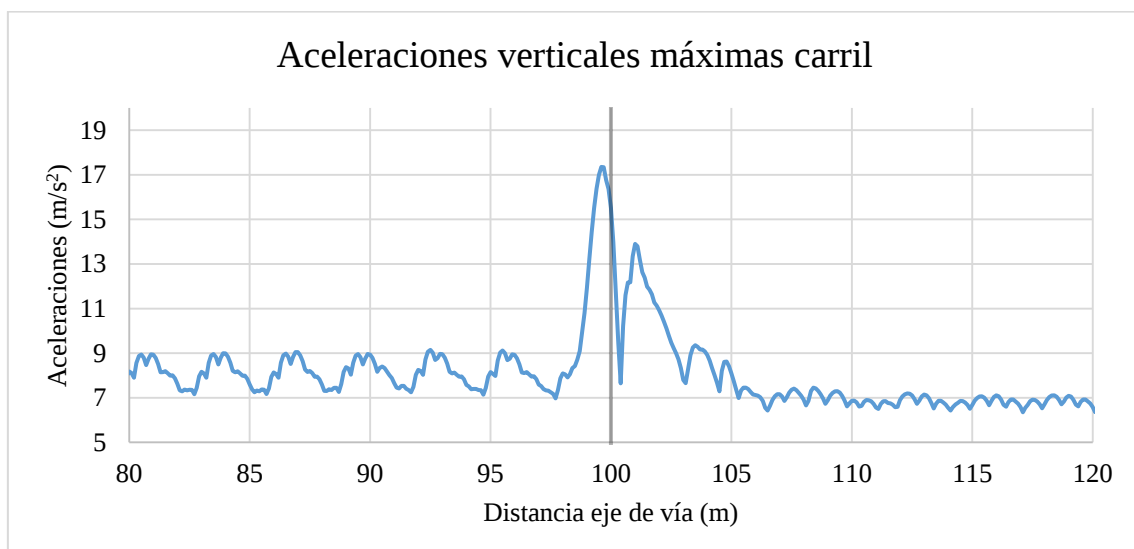


Figura 51: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 3.V

- Aceleraciones traviesa/placa: aceleraciones de casi 1 m/s² en el tramo de vía en placa. Valores variables alcanzando picos de 11 m/s² en la zona de vía en balasto. Justo antes de la

transición los valores van aumentando exponencialmente. Justo después de la transición se produce un pico de casi 14 m/s².

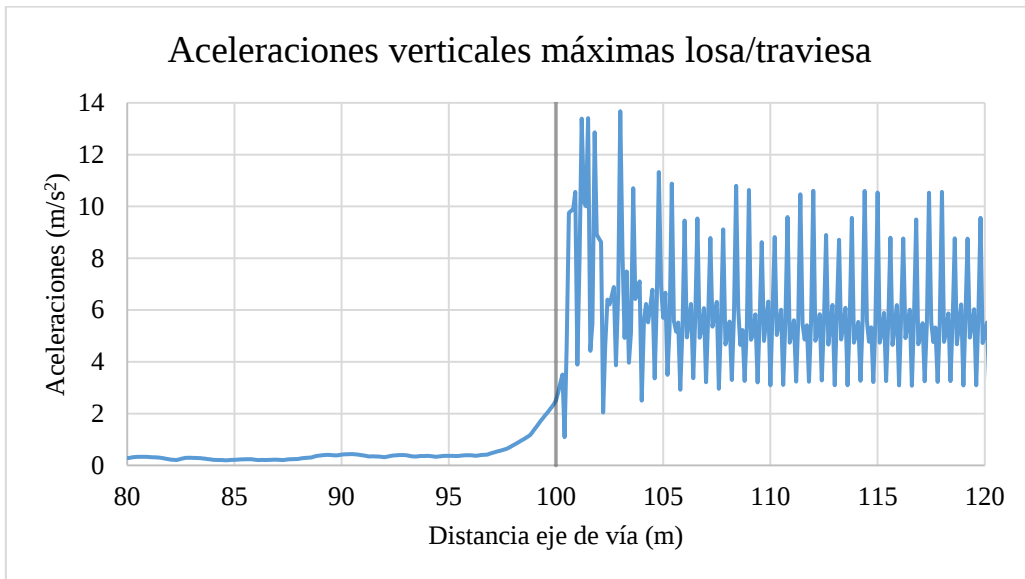


Figura 52: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 3.V

- Aceleraciones tren: se mantienen en valores correctos, variando entre aproximadamente 0,002 m/s² para aceleraciones positivas y 0,004 m/s² para aceleraciones negativas.

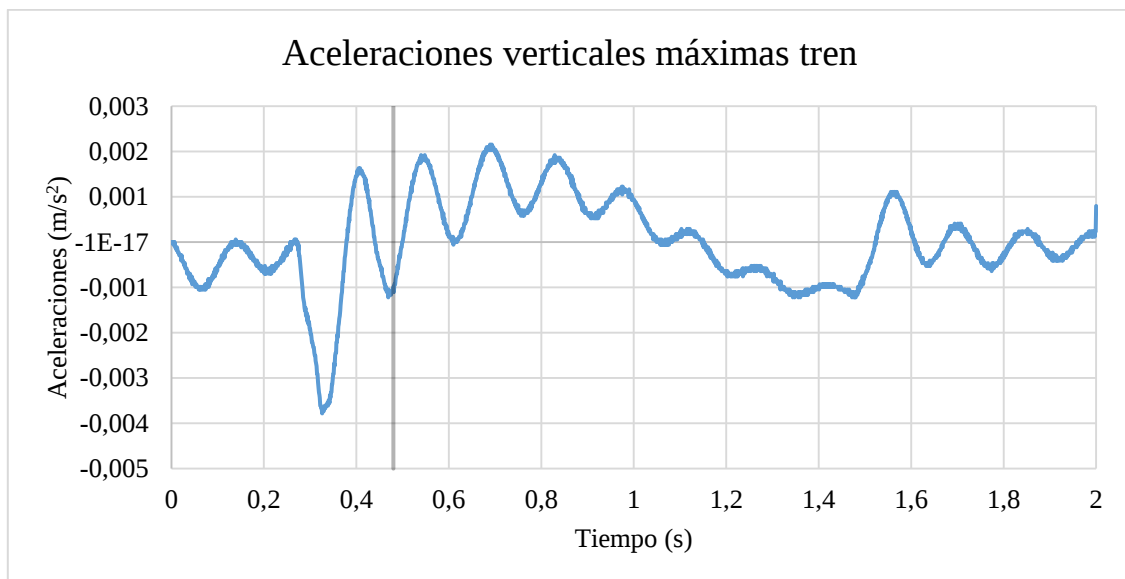


Figura 53: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 3.V

COMENTARIOS

De manera similar a lo que ocurre en las circulaciones de sentido opuesto, los resultados son similares a los del CASO 1, por lo que este modelo se descarta para una posible aplicación real.

CASO 4.1 - DE BALASTO A PLACA

DATOS SIGNIFICATIVOS

- Desplazamientos traviesa/placa: valores aproximados de 0,45 mm en balasto. Después, en la zona de vía en placa los desplazamientos son inferiores a 0,1 mm. Entre ambos valores se produce un salto.

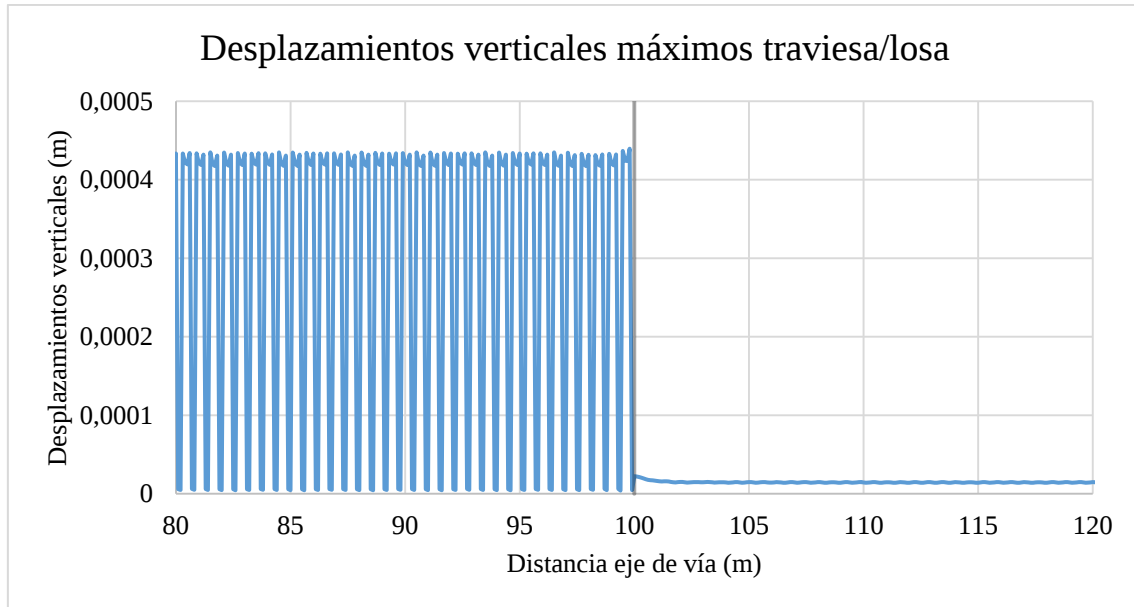


Figura 54: Desplazamientos verticales máximos en la traviesa/losa CASO 4.I

- Tensiones traviesa/placa: en la zona de balasto se producen tensiones cercanas a los 300 kN/m². En la zona de vía en placa las tensiones se reducen a aproximadamente 100 kN/m². En la zona de la transición se produce un salto entre ambos valores sin producirse ninguna tensión pico.

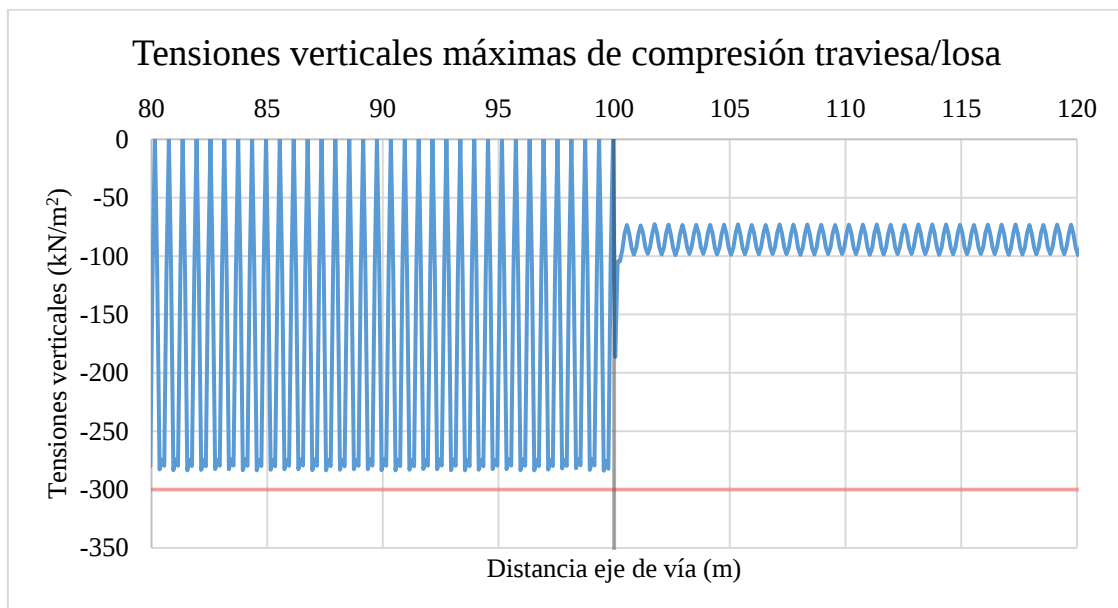


Figura 55: Tensiones verticales máximas de compresión traviesa/losa CASO 4.I

- Aceleraciones carril: valores más o menos constantes de 7 m/s^2 en la zona de vía en balasto, y valores variables entre 7 y 9 m/s^2 en la zona de vía en placa. No se producen picos en la transición, sino que simplemente el cambio se produce de manera inmediata

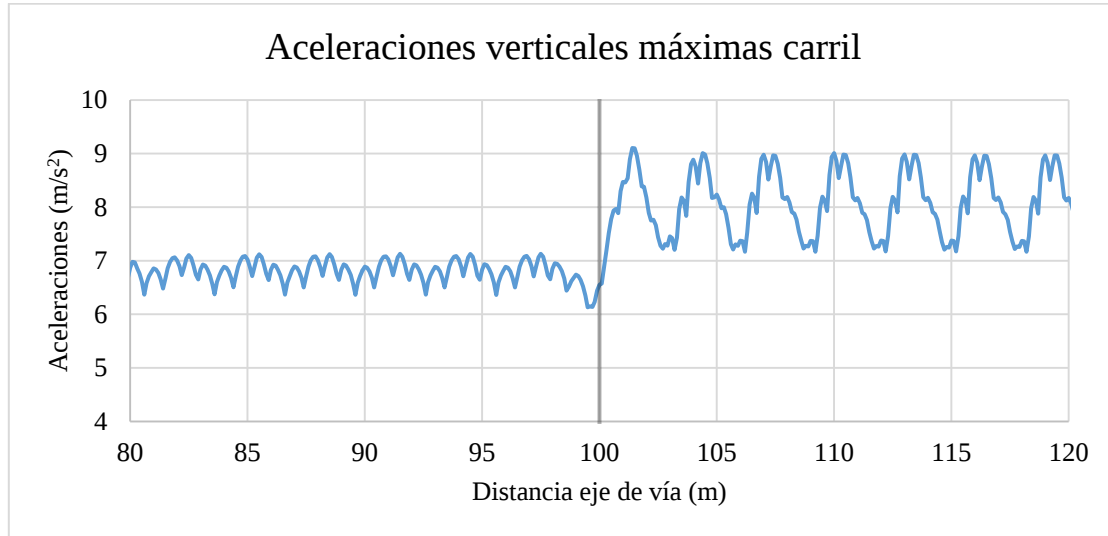


Figura 56: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 4.I

- Aceleraciones traviesa/placa: valores variables alcanzando picos de 11 m/s^2 en la zona de vía en balasto. Tras empezar el tramo de vía en placa, las aceleraciones bajan bruscamente a valores de menos de 1 m/s^2 .

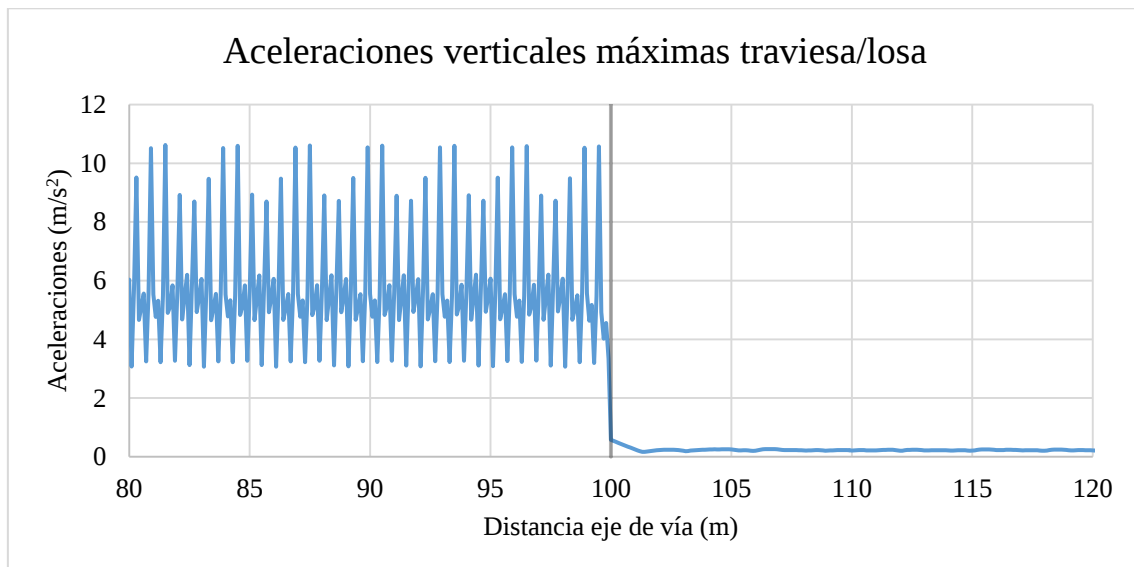


Figura 57: Aceleraciones verticales máximas en la traviesa/losa CASO 4.I

- Aceleraciones tren: se mantienen en valores correctos, variando entre aproximadamente $0,002 \text{ m/s}^2$ para aceleraciones tanto positivas como negativas.

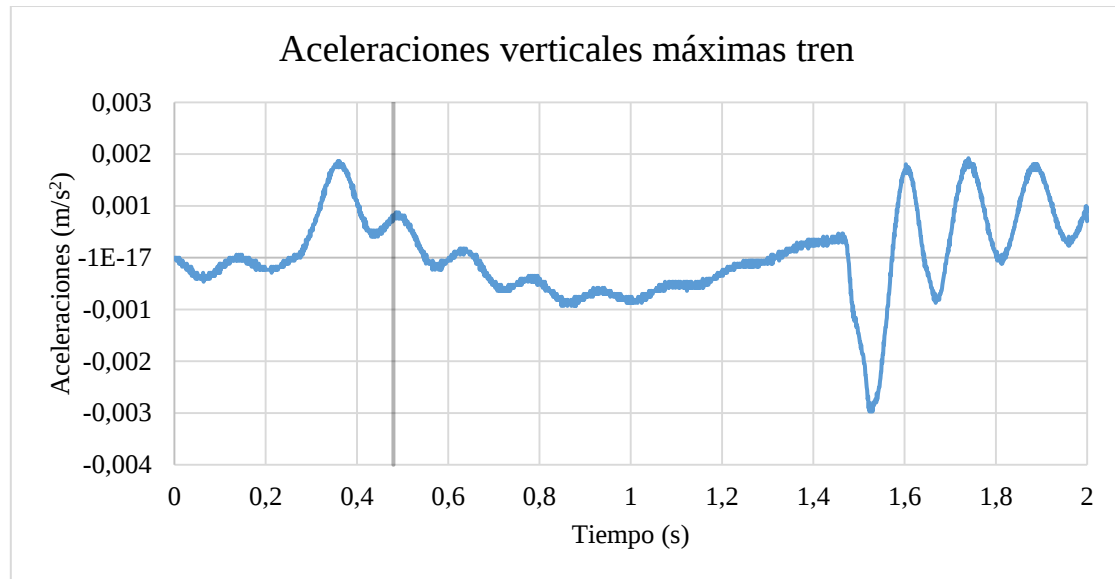


Figura 58: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 4.I

COMENTARIOS

Los resultados son similares a los del CASO 2. A resaltar que este es el primer modelo estudiado cuya transición vía en balasto a vía en placa cumple que las tensiones verticales de compresión en todo el tramo sean inferiores a 300 kN/m^2 , debido a la rigidez que aportan los metros iniciales de vía en placa antes del apoyo y que permiten absorber los momentos flectores que se originan. Los valores de los desplazamientos y de las aceleraciones sin embargo se mantienen en los mismos valores que en el CASO 2.

CASO 4.V - DE PLACA A BALASTO

DATOS SIGNIFICATIVOS

- Desplazamientos traviesa/placa: valores aproximados de 0,45 mm en balasto. Después, en la zona de vía en placa los desplazamientos son inferiores a 0,1mm. Entre ambos valores se produce un salto, habiendo un pequeño pico tras la transición de poco más de 0,45 mm.

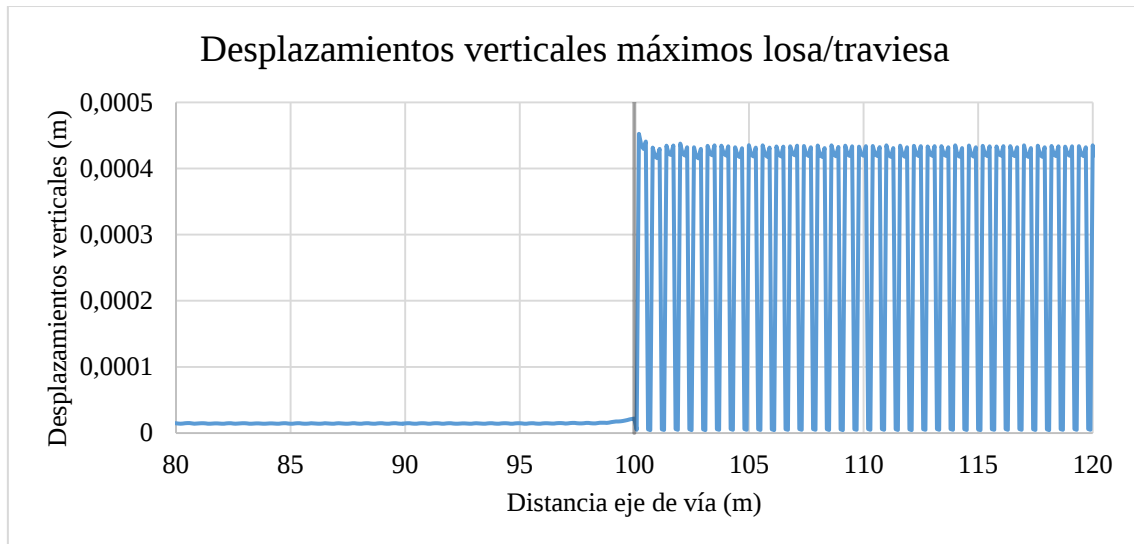


Figura 59: Desplazamientos verticales máximos en la losa/traviesa CASO 4.V

- **Tensiones traviesa/placa:** en la zona de vía en placa se producen tensiones cercanas a los 100 kN/m². En la zona de vía en balasto las tensiones se amplían a aproximadamente 300 kN/m². Se produce un pequeño pico justo después de la transición de unos 300 kN/m² que afecta al comienzo del tramo de vía en balasto.

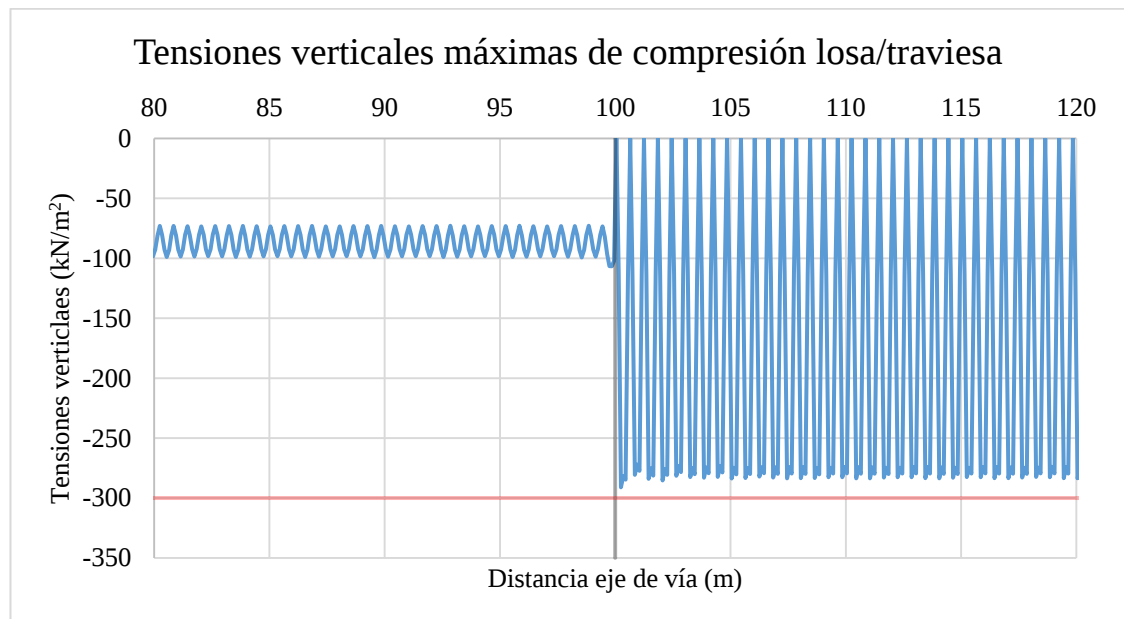


Figura 60: Tensiones verticales máximas de compresión traviesa/losa CASO 4.V

- **Aceleraciones carril:** valores variables entre 7 y 9 m/s² en la zona de vía en placa, y valores más o menos constantes de 7 m/s² en la zona de vía en balasto. No se producen picos en la transición, sino que simplemente el cambio se produce de manera inmediata.

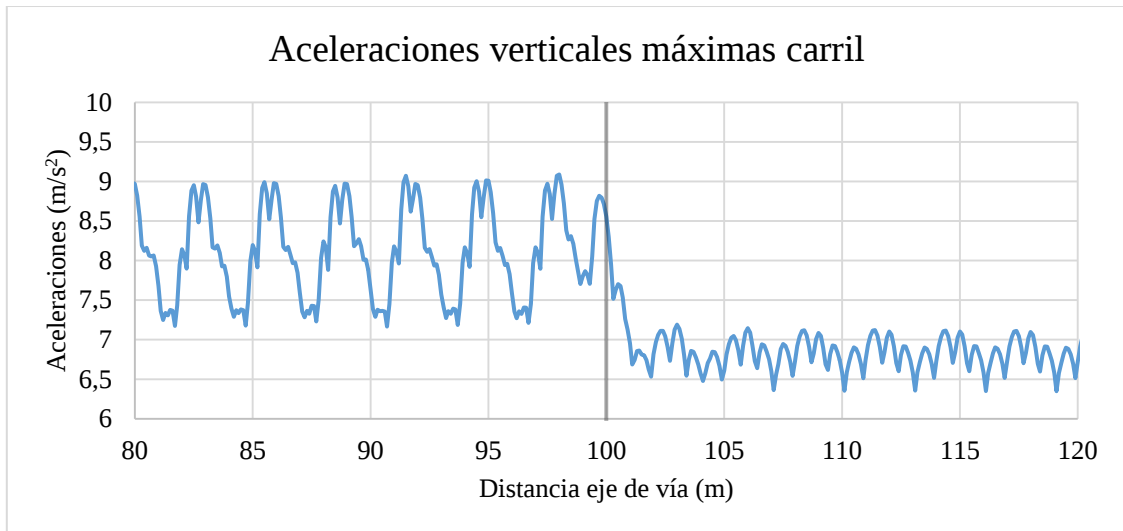


Figura 61: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 4.V

- Aceleraciones traviesa/placa: valores aproximados por debajo de 1 m/s^2 en la zona de vía en placa. Tras empezar el tramo de vía en balasto, las aceleraciones suben de manera algo brusca a valores variables con picos de 11 m/s^2 aproximadamente.

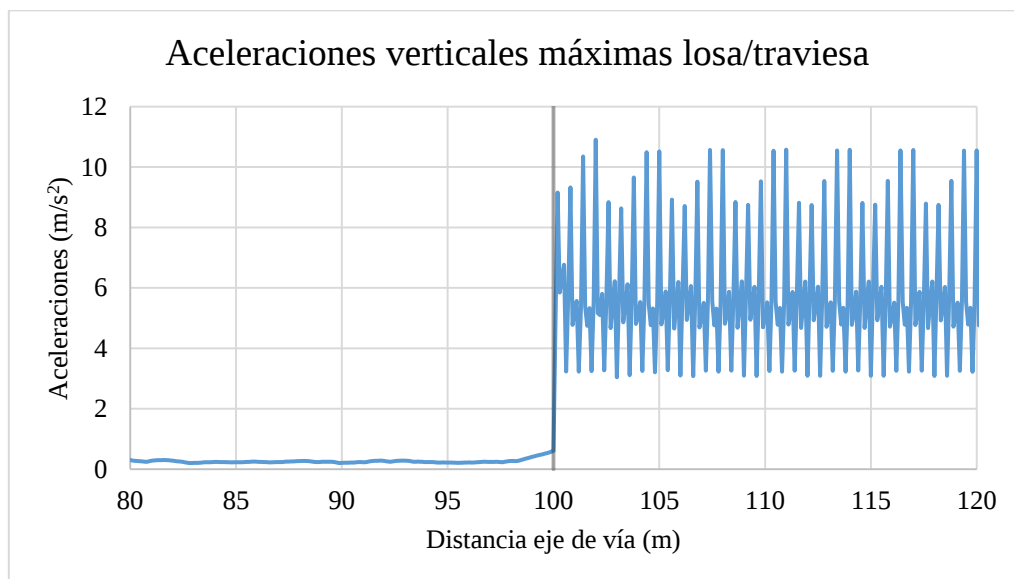


Figura 62: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 4.V

- Aceleraciones tren: se mantienen en valores correctos, variando entre aproximadamente $0,002 \text{ m/s}^2$ para aceleraciones negativas y de casi $0,003 \text{ m/s}^2$ para aceleraciones positivas.

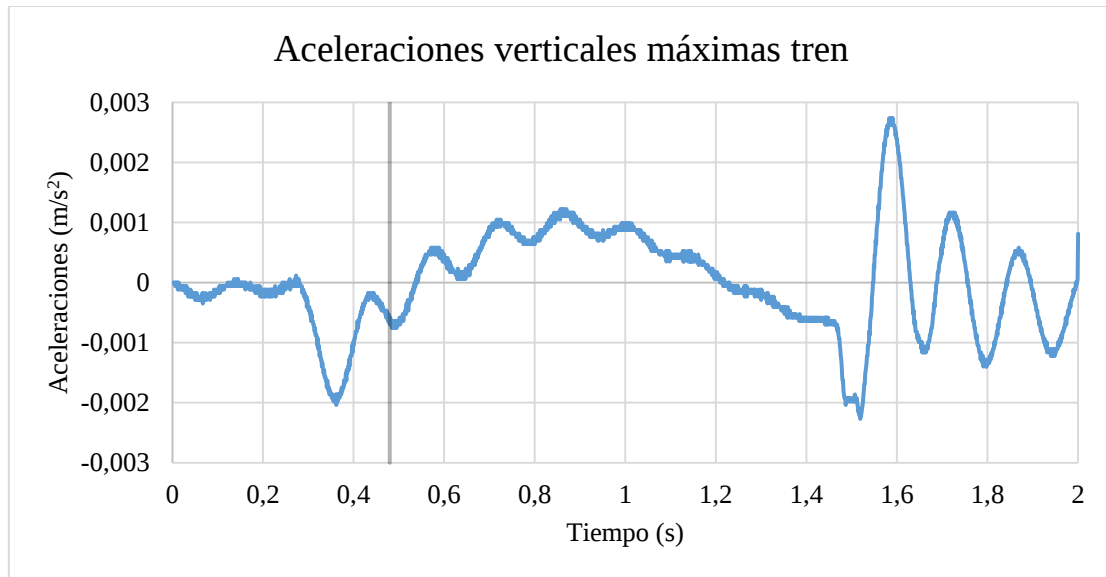


Figura 63: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 4.V

COMENTARIO

Los resultados de este caso son similares a los del CASO 2. Sin embargo, si se considera también los resultados obtenidos en el sentido contrario, este modelo es por el momento el que mejores resultados está dando, cumpliendo los límites de tensiones admisibles como característica destacada.

CASOO 5.I - DE BALASTO A PLACA

DATOS SIGNIFICATIVOS

- Desplazamientos traviesa/placa: valores aproximados de 0,45 mm en balasto. Después, en la zona de vía en placa los desplazamientos son inferiores a 0,1mm. Entre ambos valores se produce un salto.

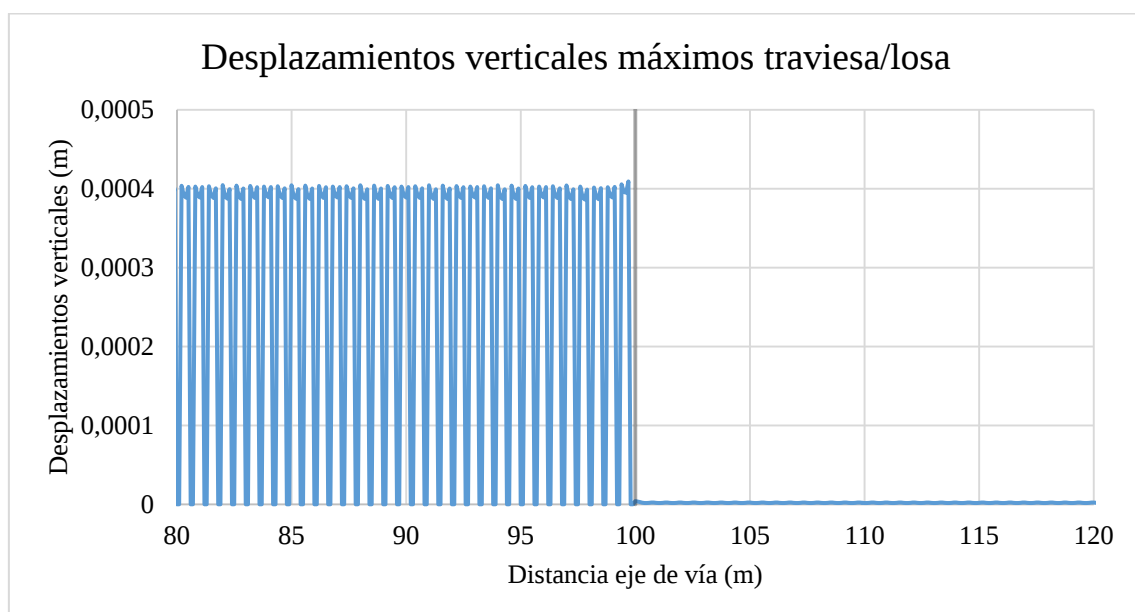


Figura 64: Desplazamientos verticales máximos en la traviesa/losa CASO 5.I

- Tensiones traviesa/placa: en la zona de balasto se producen tensiones cercanas a los 300 kN/m². En la zona de vía en placa las tensiones se reducen a aproximadamente 100 kN/m². En la transición y justo en el comienzo de la vía en placa, se produce un pico de poco más de 300 kN/m².

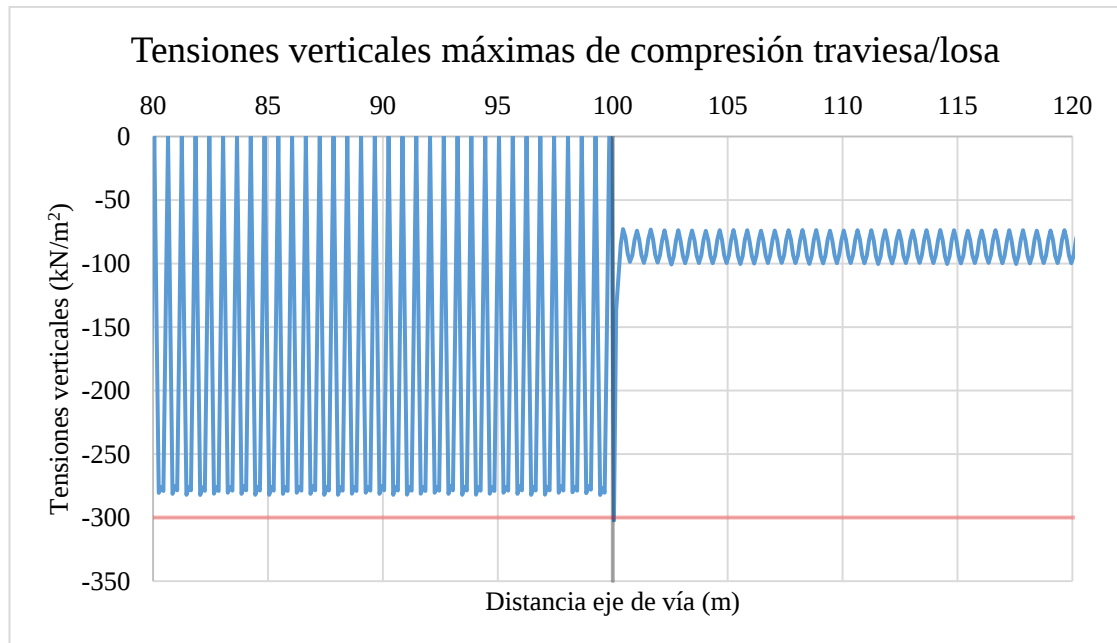


Figura 65: Tensiones verticales máximas de compresión traviesa/losa CASO 5.I

- Aceleraciones carril: valores más o menos constantes de 7 m/s² en la zona de vía en balasto, y valores variables entre 7 y 9 m/s² en la zona de vía en placa. No se producen picos en la transición, sino que simplemente el cambio se produce de manera inmediata.

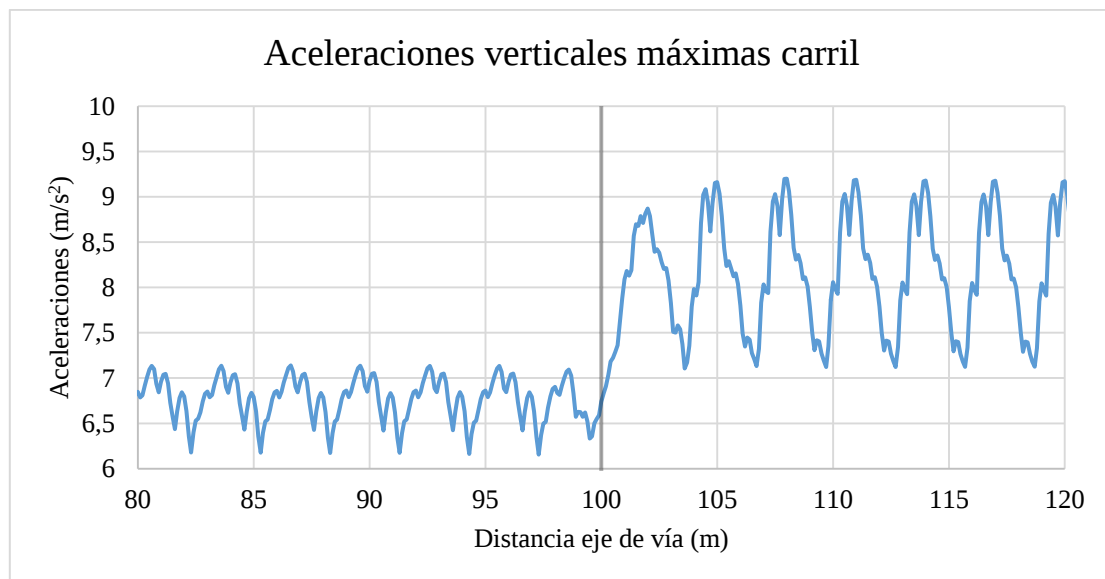


Figura 66: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 5.I

- Aceleraciones traviesa/placa: valores variables alcanzando picos de 11 m/s^2 en la zona de vía en balasto. Tras empezar el tramo de vía en placa, las aceleraciones bajan bruscamente a valores de menos de 1 m/s^2 .

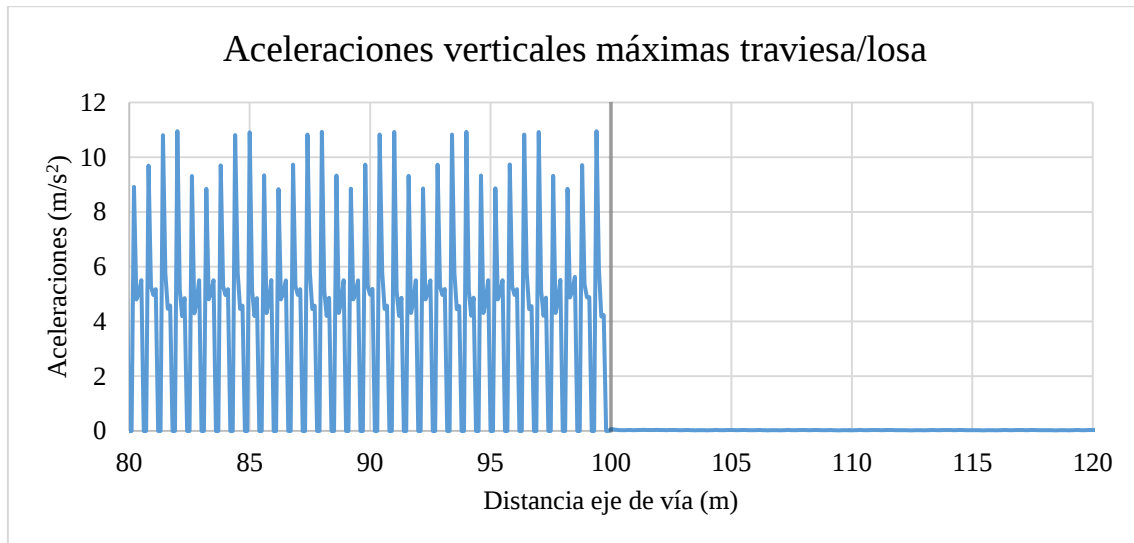


Figura 67: Aceleraciones verticales máximas en la traviesa/losa CASO 5.I

- Aceleraciones tren: se mantienen en valores correctos, variando entre aproximadamente $0,002 \text{ m/s}^2$ para aceleraciones tanto positivas como negativas.

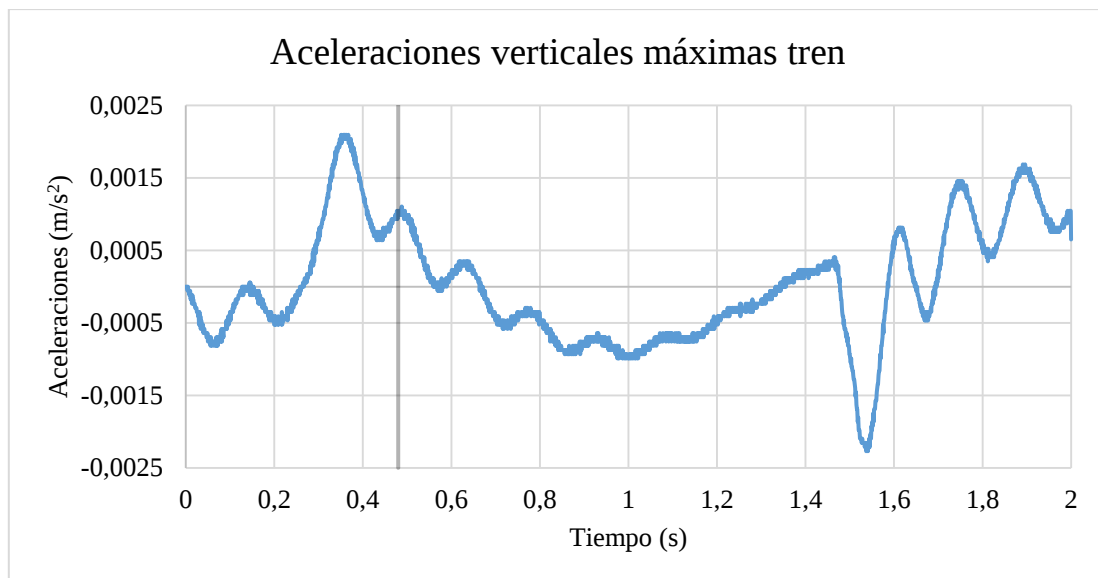


Figura 68: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 5.I

COMENTARIOS

La suposición de base rígida no mejora los resultados con respecto al CASO 2; de hecho, los valores de las aceleraciones son ligeramente más elevados que en el CASO 2.

CASO 5.V – DE PLACA A BALASTO**DATOS SIGNIFICATIVOS**

- Desplazamientos traviesa/placa: valores aproximados de 0,45 mm en balasto. Después, en la zona de vía en placa los desplazamientos son inferiores a 0,1mm. Entre ambos valores se produce un salto, habiendo un pequeño pico tras la transición de poco más de 0,4 mm.

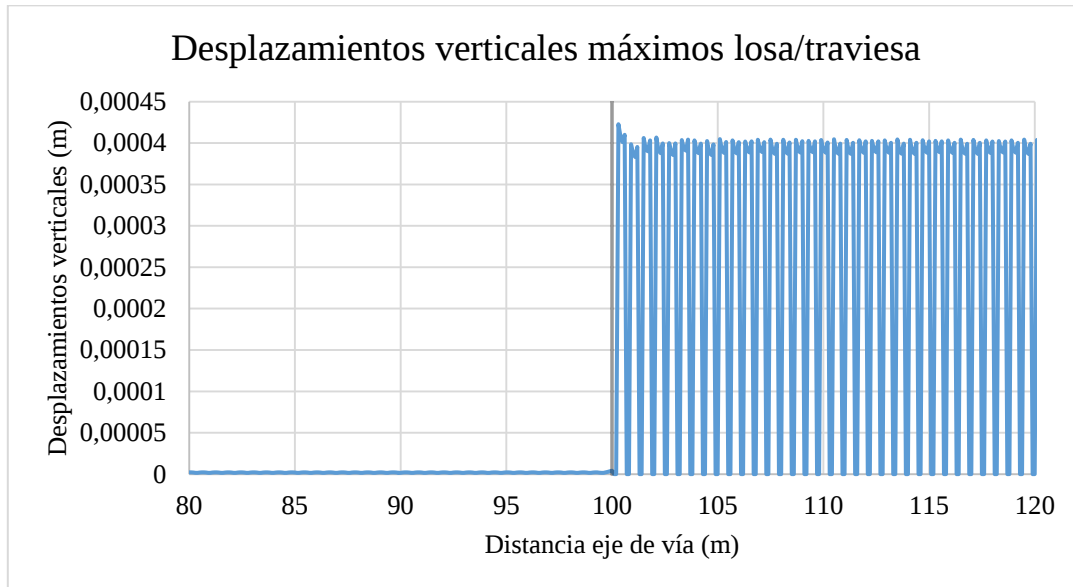


Figura 69: Desplazamientos verticales máximos en la losa/traviesa CASO 5.V

- Tensiones traviesa/placa: en la zona de vía en placa se producen tensiones cercanas a los 100 kN/m². En la zona de vía en balasto las tensiones se amplían a aproximadamente 300 kN/m². Se produce un pequeño pico justo después de la transición de casi 300 kN/m² que afecta al comienzo del tramo de vía en balasto.

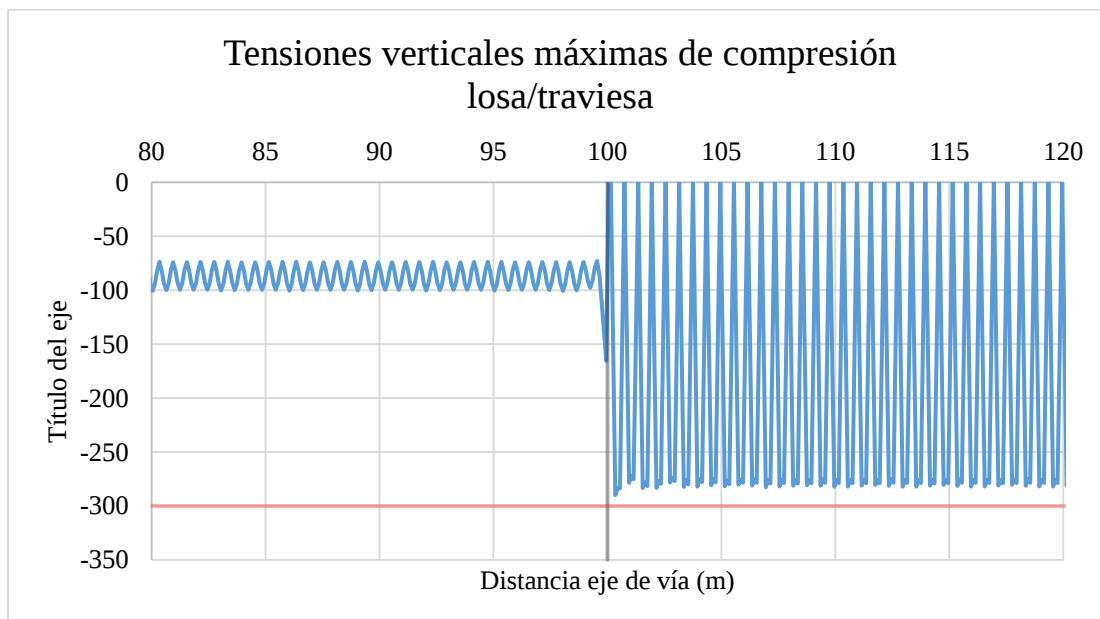


Figura 70: Tensiones verticales máximas de compresión losa/traviesa CASO 5.V

- Aceleraciones carril: valores variables entre 7 y 9 m/s² en la zona de vía en placa, y valores más o menos constantes de 7 m/s² en la zona de vía en balasto. Se produce un pequeño pico de casi 10 m/s² justo antes del cambio de tipología de vía.

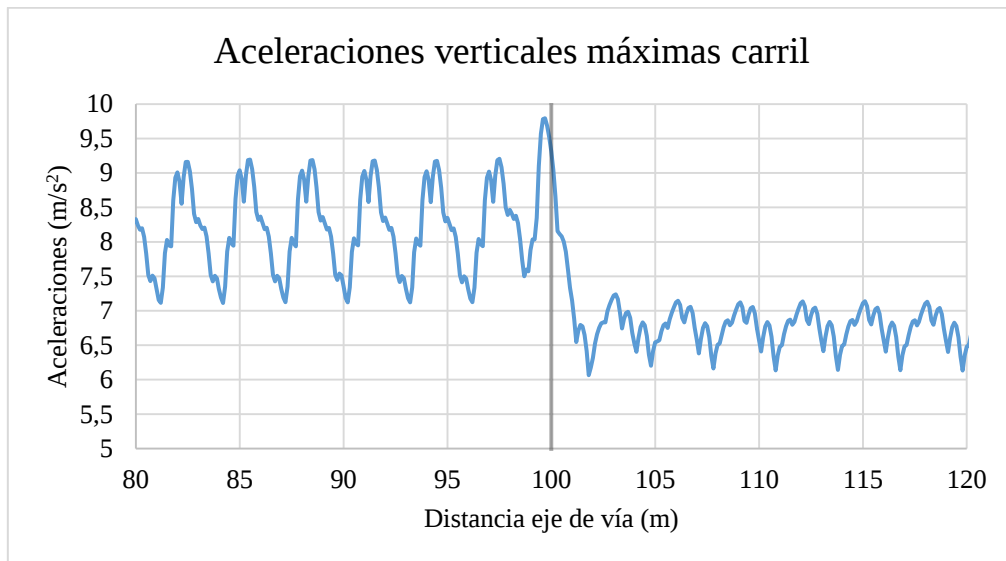


Figura 71: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 5.V

- Aceleraciones traviesa/placa: valores aproximados por debajo de 1 m/s² en la zona de vía en placa. Tras empezar el tramo de vía en balasto, las aceleraciones suben de manera algo brusca a valores variables con picos de 11 m/s² aproximadamente.

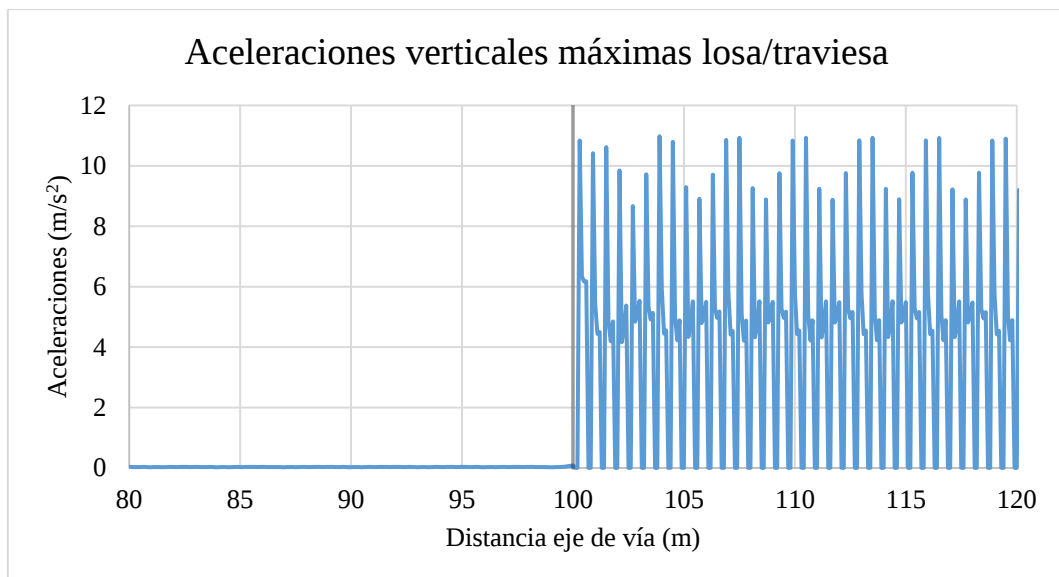


Figura 72: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 5.V

- Aceleraciones tren: se mantienen en valores correctos, variando entre aproximadamente 0,002 m/s² para aceleraciones tanto positivas como negativas.

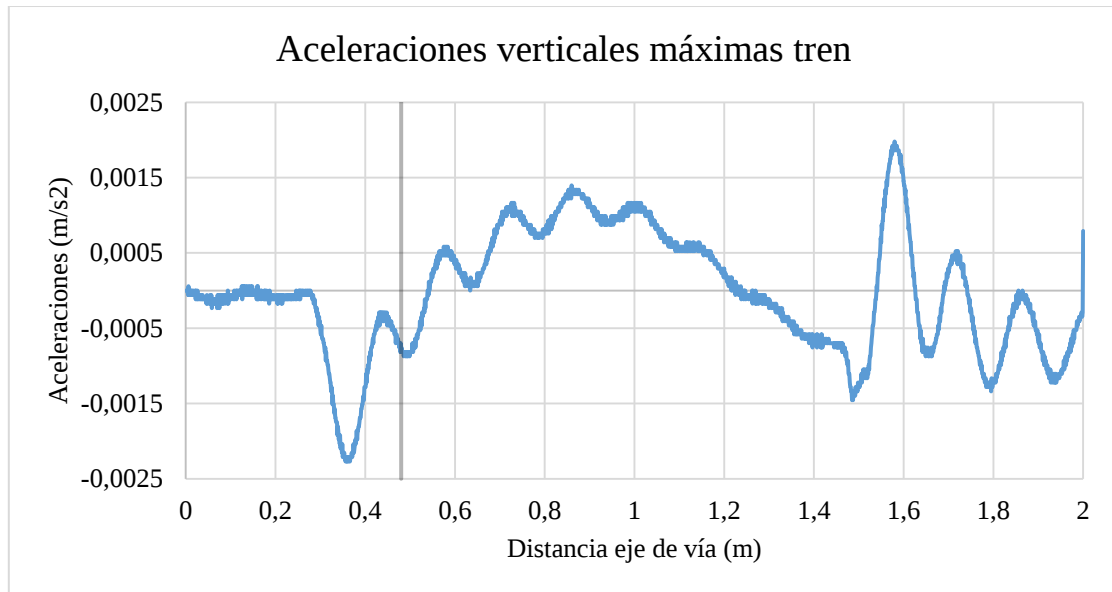


Figura 73: Aceleraciones verticales máximas en la caja del vehículo CASO 5.V

COMENTARIOS

De manera similar a lo que ocurre en el caso anterior, las aceleraciones son algo más elevadas que en el CASO 2, y las tensiones no reducen su valor. Aun así, este modelo no funciona mal y puede servir de base como una mejora de aquél.

CASO 6.I – DE BALASTO A PLACA

DATOS SIGNIFICATIVOS

- Desplazamientos traviesa/placa: valores aproximados de 0,45 mm en balasto, aunque justo antes de la transición se produce un pico que supera los 0,5 mm. Después, en la zona de vía en placa los desplazamientos son inferiores a 0,1mm. Entre ambos valores se produce un salto, aunque a diferencia de otros modelos se produce antes de la transición en sí misma.

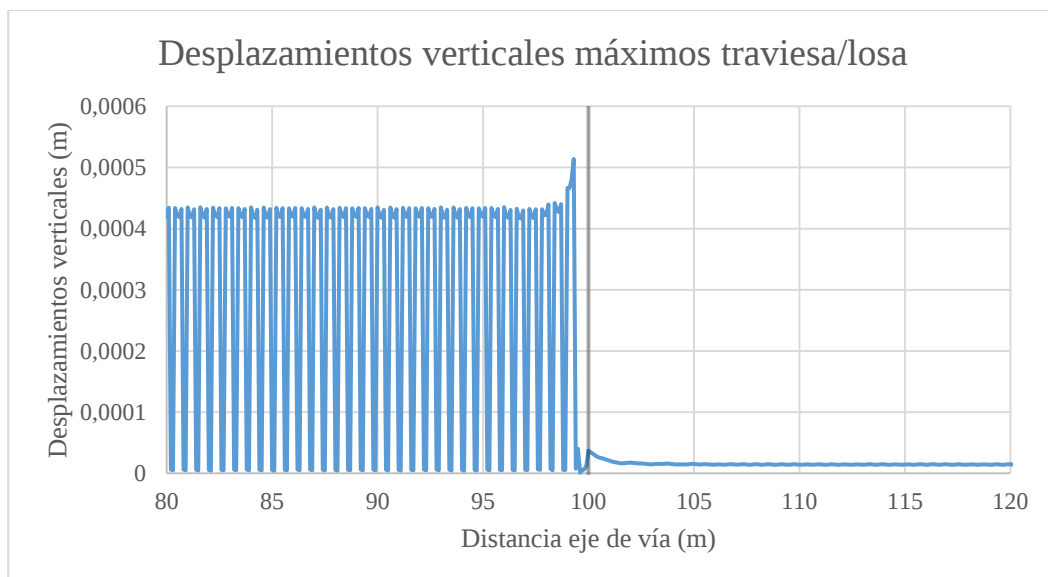


Figura 74: Desplazamientos verticales máximos en la traviesa/losa CASO 6.I

- Tensiones traviesa/placa: en la zona de balasto se producen tensiones cercanas a los 300 kN/m². En la zona de vía en placa las tensiones se reducen a aproximadamente 100 kN/m². En las proximidades de la transición, un poco antes de la misma, se produce un pico de poco más de 300 kN/m² pero justo en el comienzo de la vía en placa la tensión alcanza los 450 kN/m².

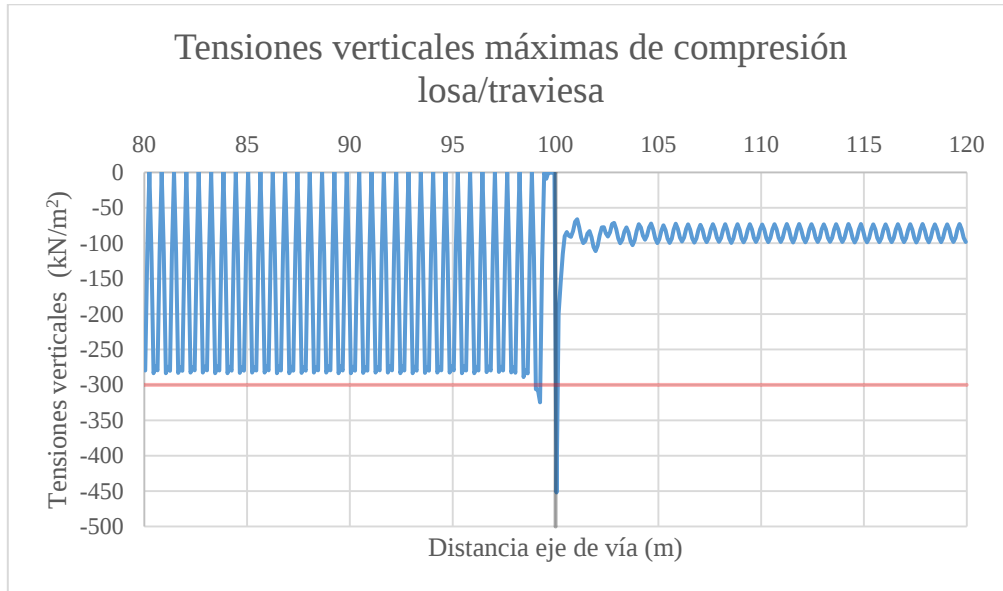


Figura 75: Tensiones verticales máximas de compresión traviesa/losa CASO 6.I

- Aceleraciones carril: valores más o menos constantes de 7 m/s² en la zona de vía en balasto, y valores variables entre 7 y 9 m/s² en la zona de vía en placa. En la transición se produce un pico de casi 20 m/s².

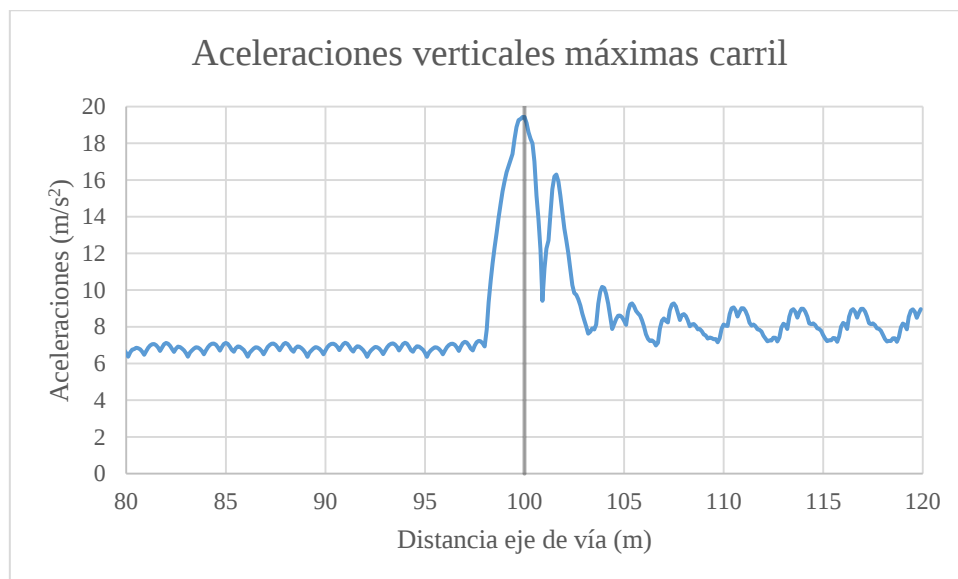


Figura 76: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 6.I

- Aceleraciones traviesa/placa: valores variables alcanzando picos de 11 m/s^2 en la zona de vía en balasto. Justo antes de la transición las aceleraciones aumentan hasta casi 17 m/s^2 . Tras empezar el tramo de vía en placa, las aceleraciones bajan bruscamente a valores de menos de 1 m/s^2 .

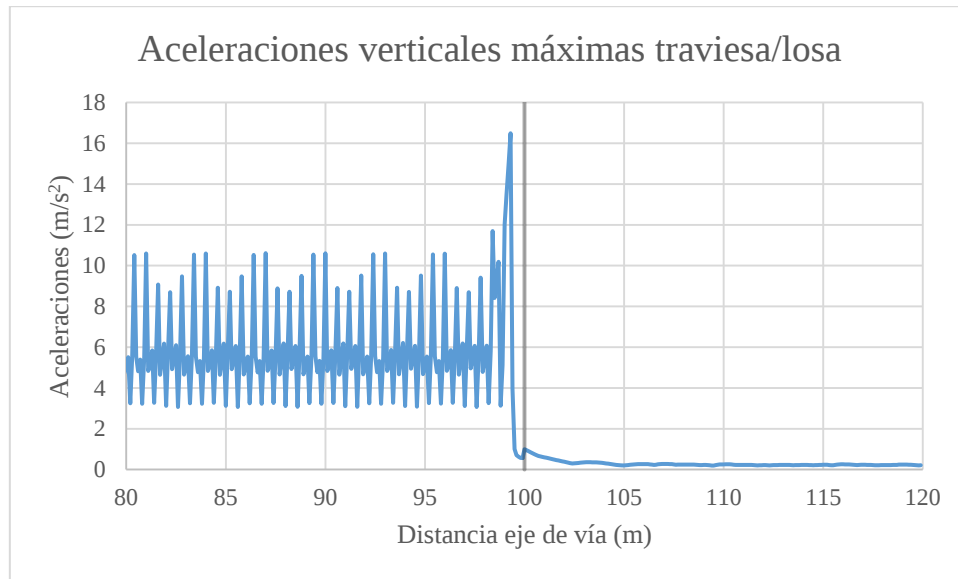


Figura 77: Aceleraciones verticales máximas en la traviesa/losa CASO 6.I

- Aceleraciones tren: se mantienen en valores correctos, variando entre aproximadamente $0,004 \text{ m/s}^2$ para aceleraciones positivas y $0,003 \text{ m/s}^2$ para aceleraciones negativas.

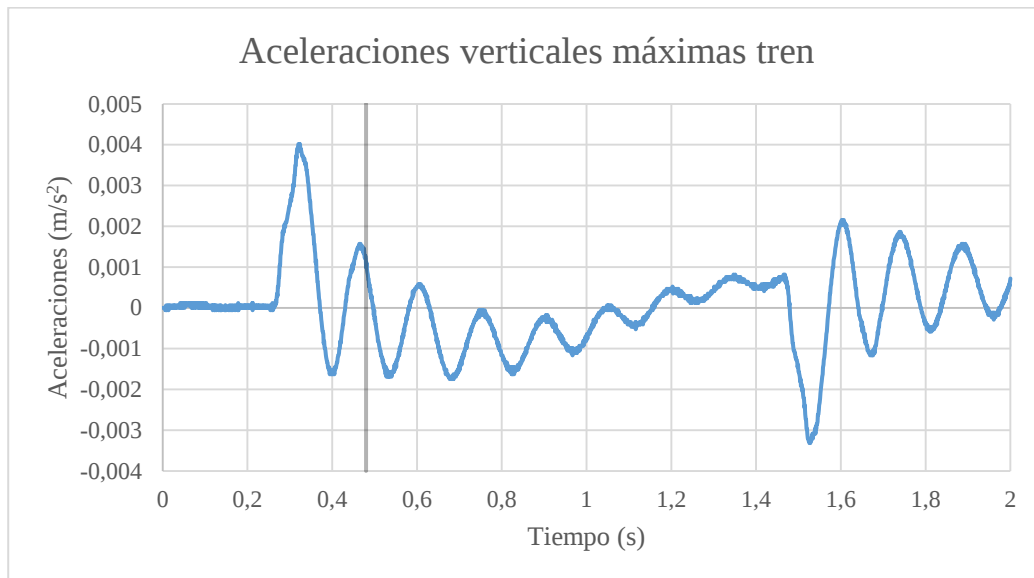


Figura 78: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 6.I

COMENTARIOS

Al aumentar la separación entre los apoyos en la zona de transición reducimos la rigidez y por lo tanto las tensiones aumentan (aunque con valores inferiores a los modelos con y las aceleraciones se propagan más y con valores más elevados con respecto a otros modelos.

CASO 6.V – DE PLACA A BALASTO**DATOS SIGNIFICATIVOS**

- Desplazamientos traviesa/placa: valores aproximados de 0,1 mm en vía en placa. Justo después de la zona de transición se produce un pico que alcanza los 0,7 mm. En la vía en balasto los desplazamientos son de 0,45 mm aproximadamente. Entre ambos valores se produce un salto, aunque a diferencia de otros modelos en la dirección de vía en placa a vía en balasto se produce algo más alejado de la transición.

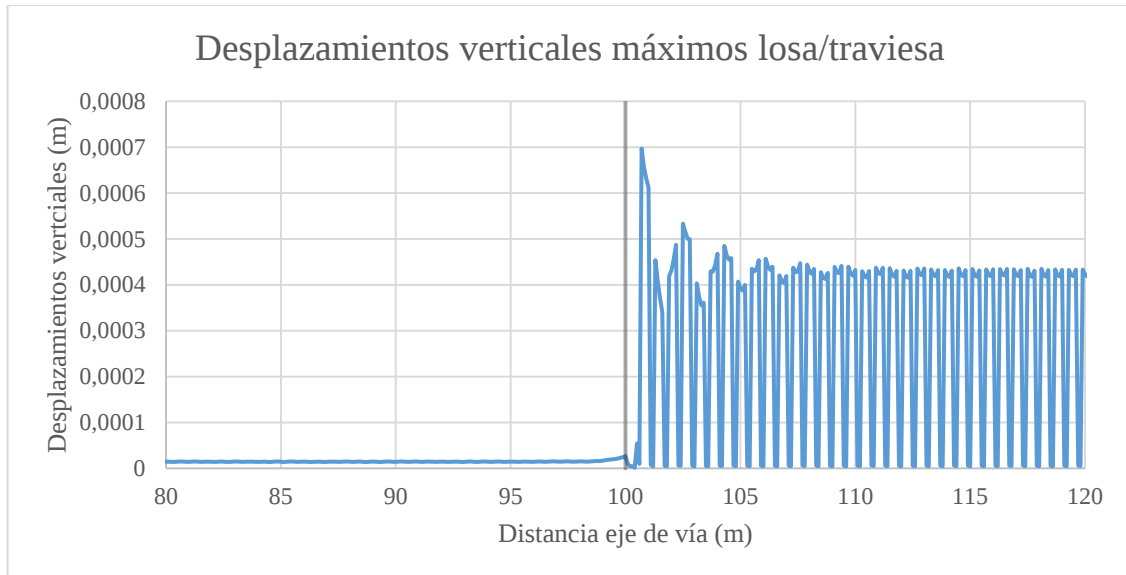


Figura 79: Desplazamientos verticales máximos en la losa/traviesa CASO 6.V

- Tensiones traviesa/placa: en la zona de vía en placa se producen tensiones cercanas a los 100 kN/m². En la zona de vía en balasto las tensiones se amplían a aproximadamente 300 kN/m². Se produce unos picos después de la transición de casi 450 kN/m² (disminuyendo gradualmente) que afecta al comienzo del tramo de vía en balasto.

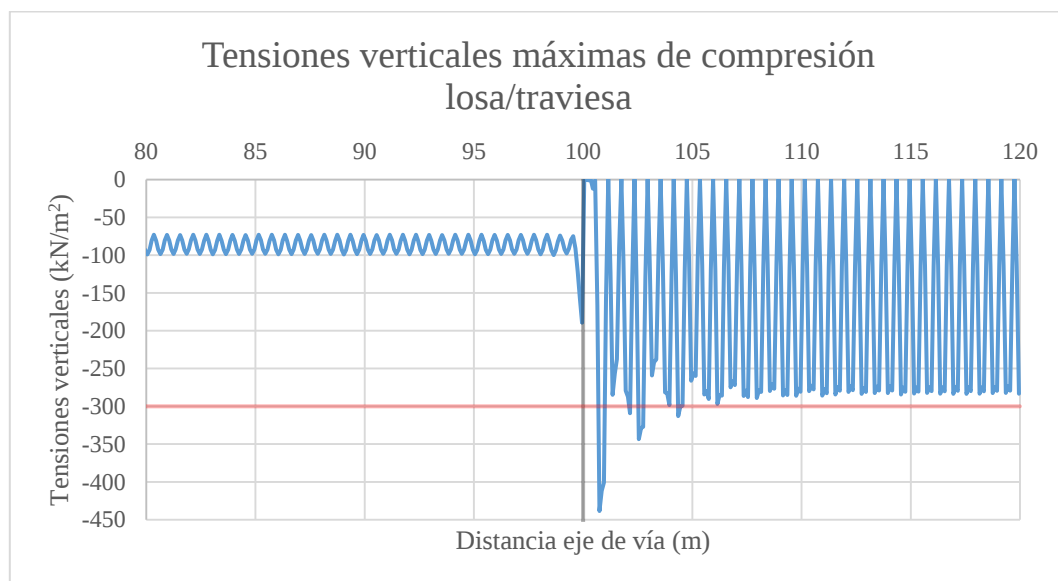


Figura 80: Tensiones verticales máximas de compresión losa/traviesa CASO 6.V

- Aceleraciones carril: valores variables entre 7 y 9 m/s^2 en la zona de vía en placa, y valores más o menos constantes de 7 m/s^2 en la zona de vía en balasto. En la transición se produce un pico de más de 20 m/s^2 .

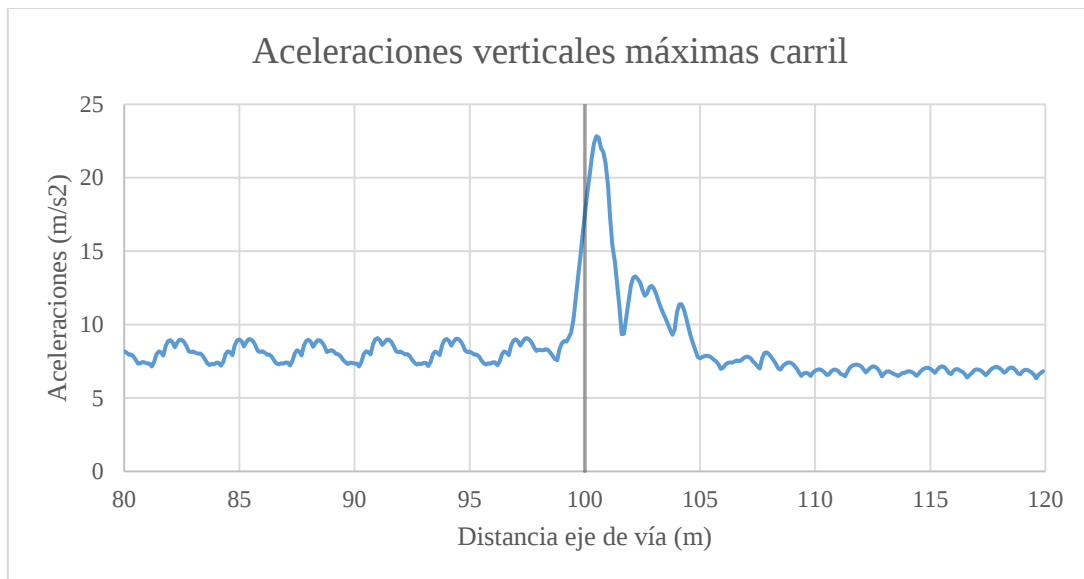


Figura 81: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 6.V

- Aceleraciones traviesa/placa: valores aproximados por debajo de 1 m/s^2 en la zona de vía en placa. Tras empezar el tramo de vía en balasto, las aceleraciones suben de manera brusca a valores variables con picos de más de 20 m/s^2 aproximadamente, reduciéndose gradualmente hasta establecerse con picos de 11 m/s^2 .

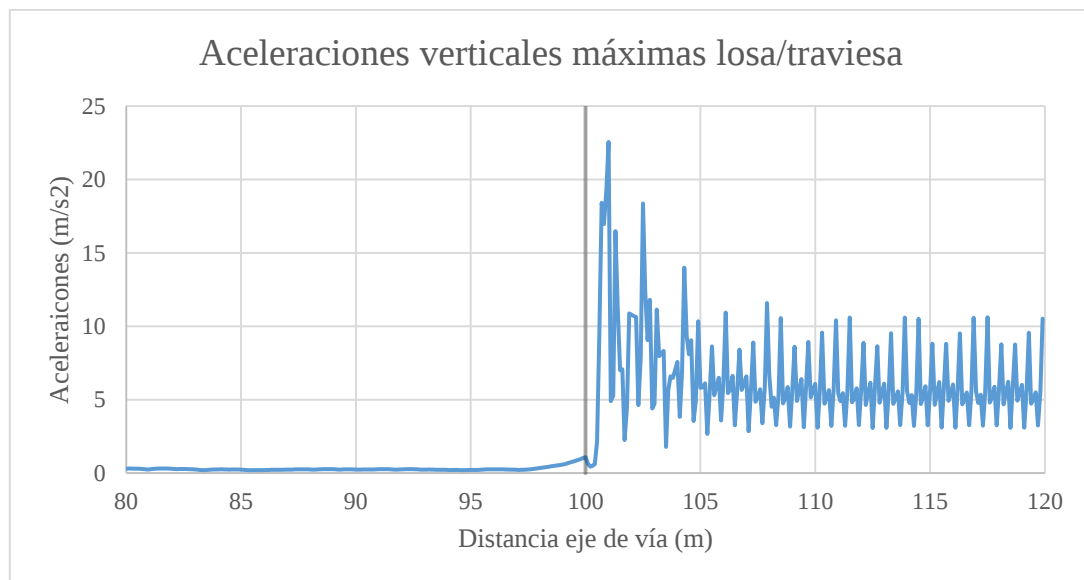


Figura 82: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 6.V

- Aceleraciones tren: se mantienen en valores correctos, variando entre aproximadamente 0,003 m/s^2 para aceleraciones positivas y 0,004 m/s^2 para aceleraciones negativas.

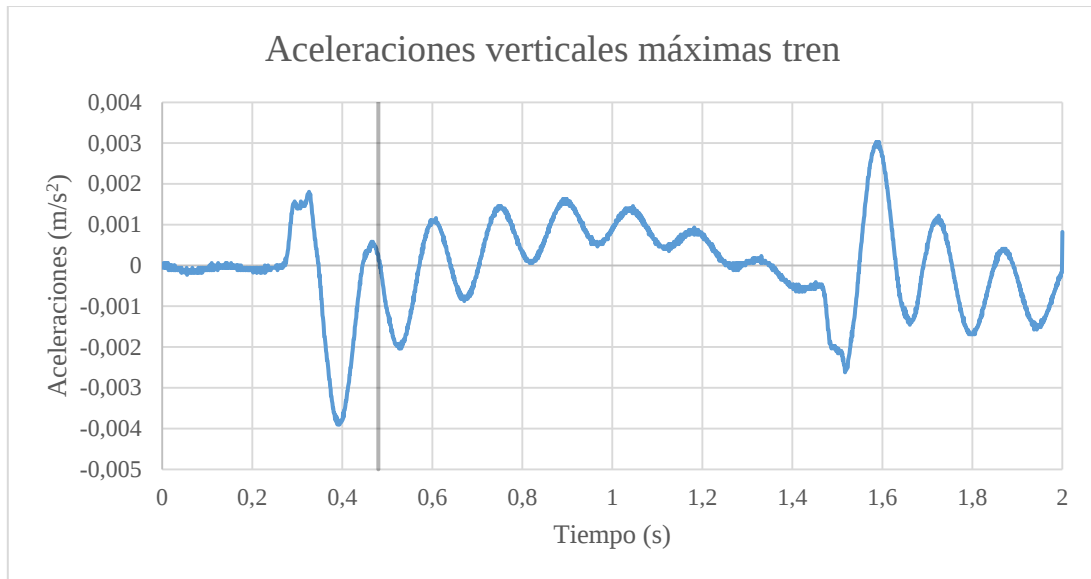


Figura 83: Aceleraciones verticales máximas en el carril CASO 6.V

COMENTARIOS

De manera similar a lo que pasa en sentido contrario, al aumentar la distancia de los apoyos hemos conseguido aumentar las tensiones que se producen, pero especialmente las aceleraciones. Los primeros resultados obtenidos, a falta de comparar con los otros modelos, reflejan que pueden darnos valores de aceleraciones más altos en comparación con el resto de casos.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este apartado se analizarán de manera más profunda los resultados obtenidos y se discutirán de cara a llegar a las conclusiones finales.

DESPLAZAMIENTOS VERTICALES TRANSITORIOS

En las siguientes dos gráficas se adjuntan los resultados de todos los modelos, agrupados por sentido.

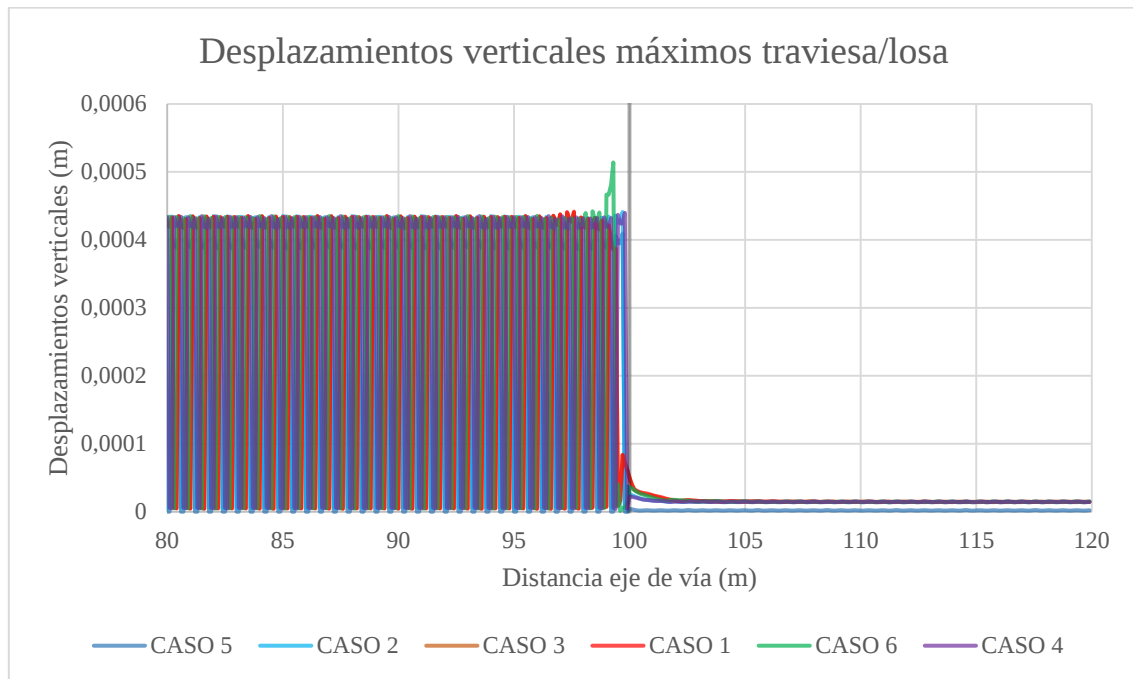


Figura 84: Desplazamientos verticales máximos de todos los modelos en sentido balasto - placa

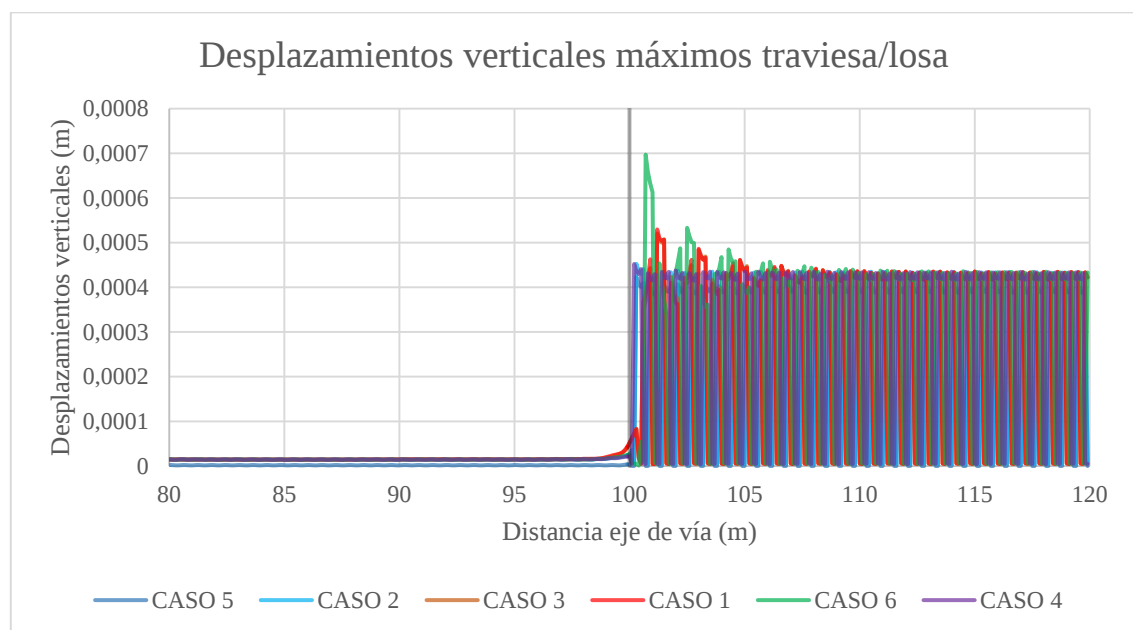


Figura 85: Desplazamientos verticales máximos de todos los modelos en sentido placa - balasto

En la siguiente gráfica se muestra el valor máximo de desplazamiento transitorio alcanzado para todos los casos:

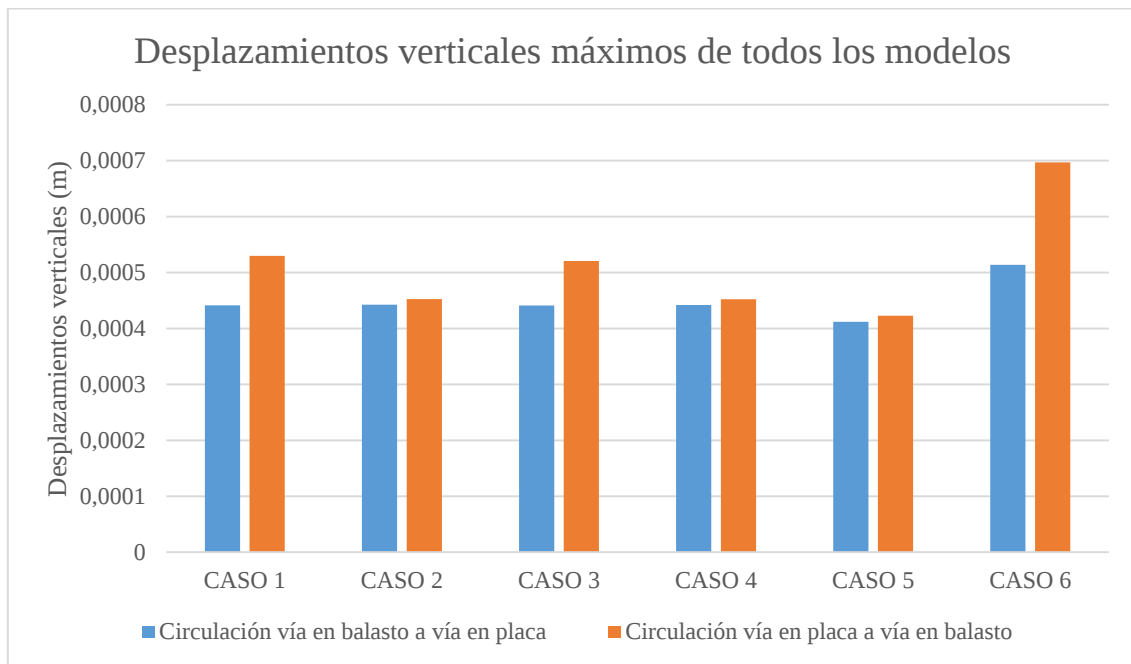


Figura 86: Valores máximos de los desplazamientos verticales de todos los modelos

De las gráficas anteriores se pueden sacar algunos datos significantes:

- Los desplazamientos verticales transitorios máximos que se producen no son los mismos cuando el tren circula de un tramo de vía en balasto a un tramo de vía en placa que de un tramo de vía en placa a un tramo de vía en balasto, siendo los valores de los mismos más elevados en esta última situación, ya que el tren circula de una zona que es más rígida a una que lo es menos.
 - Los aumentos en los desplazamientos de estos casos son mayores en aquellos modelos en los que existe una traviesa pegada a la losa de la vía en placa, independientemente de la distancia que exista entre los apoyos (sin embargo, no se cumple en el CASO 6, ver más abajo).
 - Se observa que los desplazamientos en el sentido de circulación de vía en balasto a vía en placa son prácticamente los mismos en todos los modelos, debido a que no se producen aumentos acusados de los desplazamientos en la entrada del tramo en vía en placa ya que esta es lo suficientemente rígida como para evitar desplazamientos.
- Los desplazamientos son ligeramente inferiores en el CASO 5 ya que en este caso se considera la capa de forma rígida y absorbe mejor los desplazamientos en el tramo de vía en balasto. Sin embargo, la mejora es mínima respecto a los demás modelos.
- En el CASO 6 los desplazamientos son aún mayores que en el resto de casos, especialmente en las situaciones de circulación de vía en placa a vía en balasto. Esto es debido a la gran separación entre apoyos en la zona de transición. El máximo desplazamiento se lo llevan los puntos contiguos de la zona de la transición en el tramo de vía en balasto.

A continuación se muestran los valores máximos de la desviación típica de todos los modelos para comprobar que cumplen las condiciones de la norma UNE-EN 13848-1 para desplazamientos verticales de la vía.

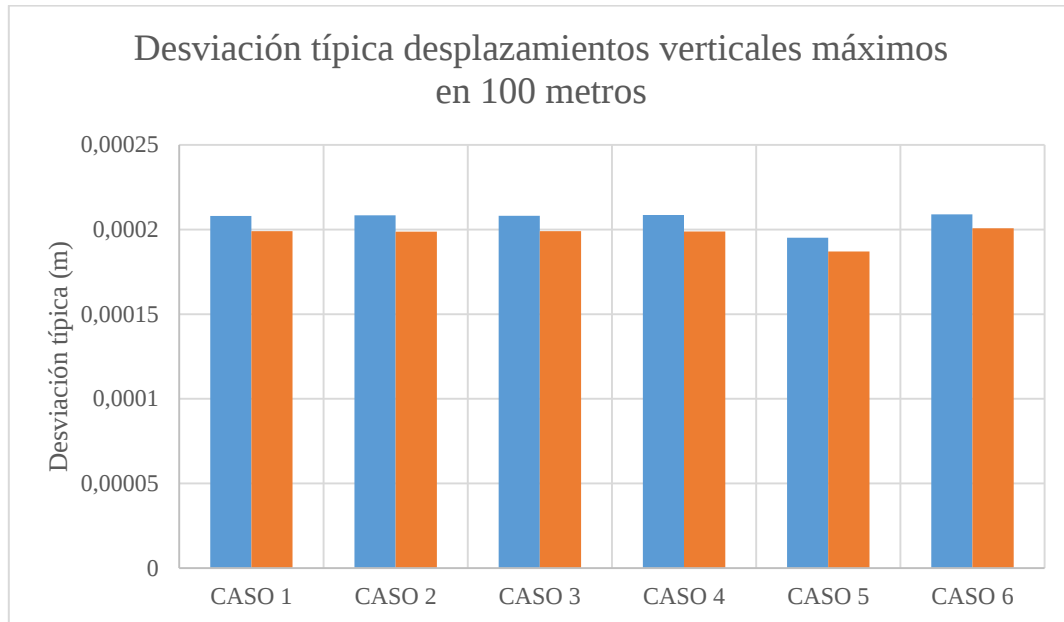


Figura 87: Desviación típica de los desplazamientos en 100 metros de todos los modelos

En todos los casos se cumple que la desviación típica en 100 metros es inferior a 0,5 mm. Todos los modelos poseen el mismo valor menos en el CASO 5 que por contar con una superficie de apoyo rígida reduce ligeramente los desplazamientos. El aumento en la distancia entre los desplazamientos no varía la medida apenas.

Por último, recalcar que a la hora del cálculo de la desviación se han tenido en cuenta exclusivamente los tramos de vía en balasto ya que son los que poseen valores superiores.

TENSIONES VERTICALES DE COMPRESIÓN TRANSITORIOS

En las siguientes dos gráficas se adjuntan los resultados de todos los modelos, agrupados por sentido.

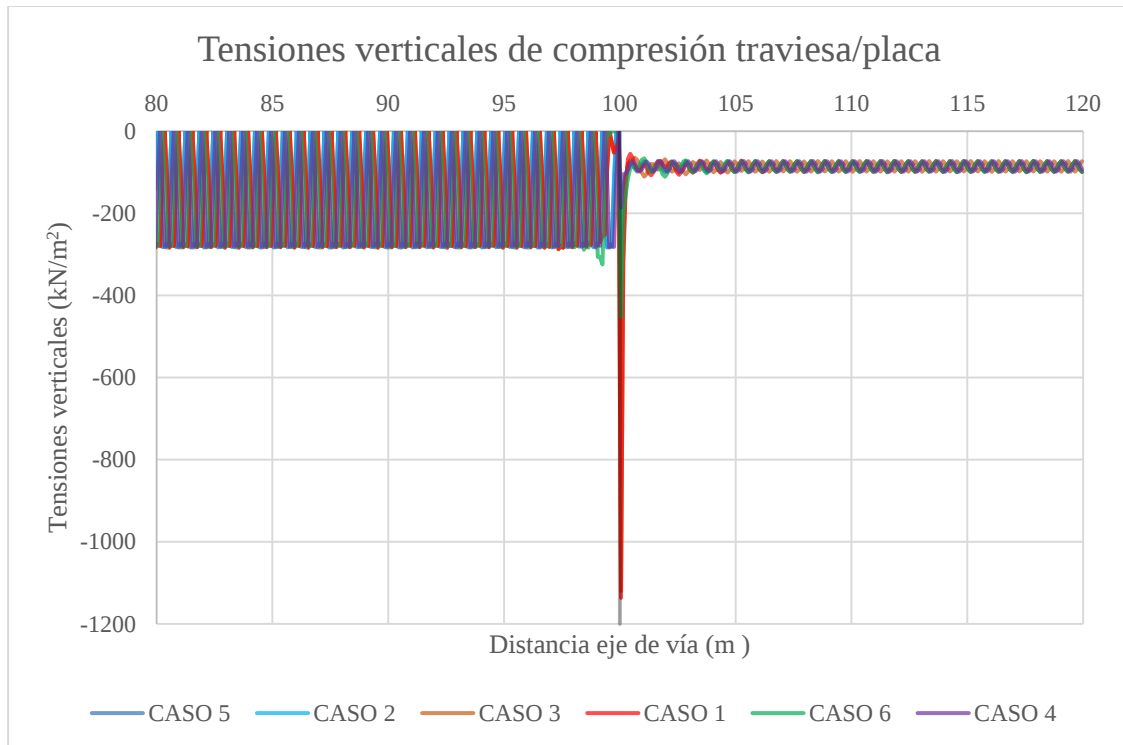


Figura 88: Tensiones verticales de compresión de todos los modelos dirección balasto - placa

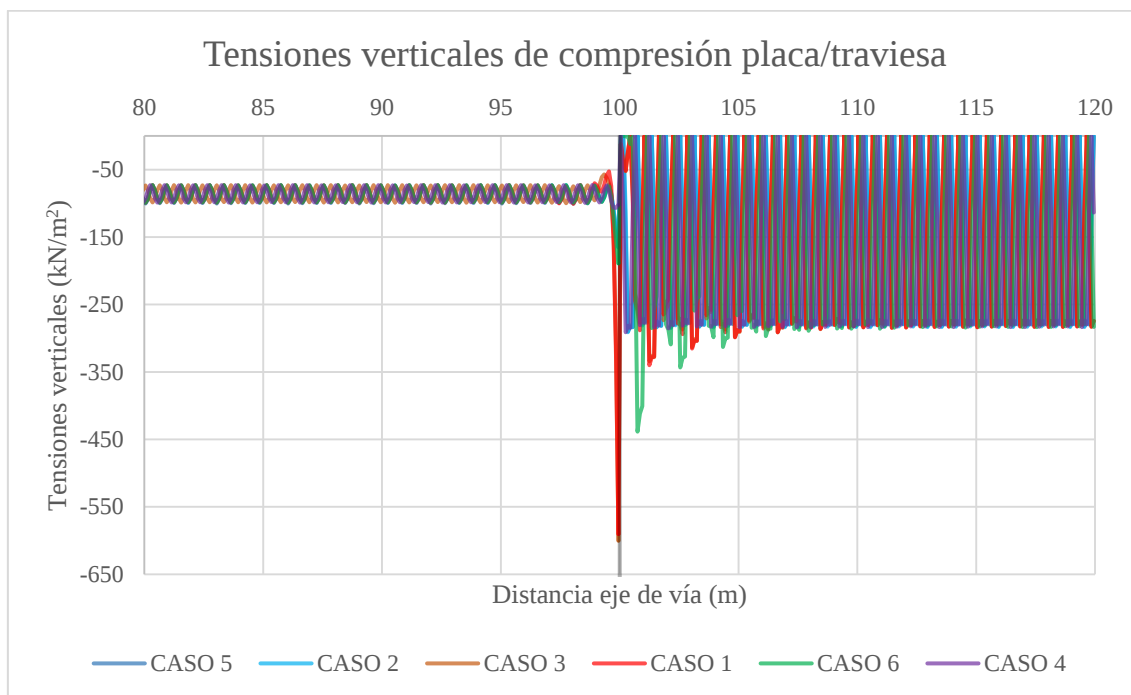


Figura 89: Tensiones verticales de compresión de todos los modelos dirección placa - balasto

En el siguiente gráfico se adjuntan los resultados de todos los modelos, además se apreciarán cuáles de ellos cumplen.

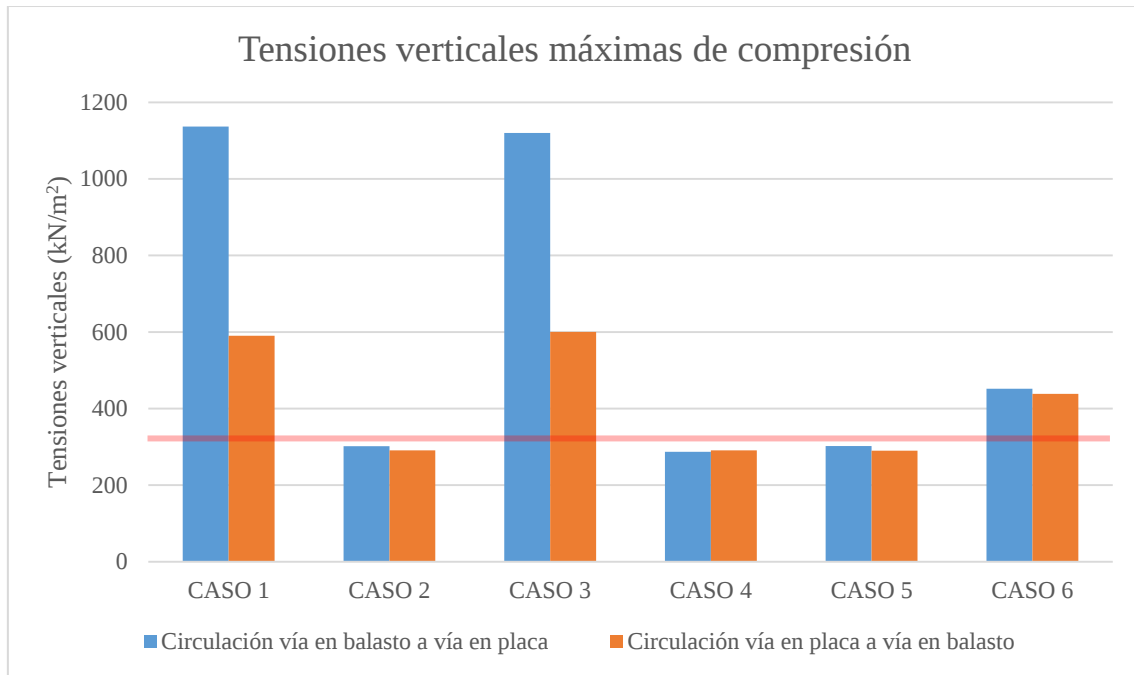


Figura 90: Valor de la tensión vertical máxima de compresión de todos los casos

Respecto a las tensiones transitorias de compresión, considerando ambos sentidos en cada modelo, **solo existe un modelo que cumple** con el límite impuesto de tensiones máximas admisibles de 300 kN/m², y es el **CASO 4**.

También se pueden comentar algunos puntos clave:

- Las tensiones transitorias producidas en casi todos los modelos son superiores en aquellos en los que el sentido de circulación va de vía en balasto a vía en placa que en aquellos en los que se circula de vía en placa a vía en balasto. Esto puede ser debido a que el tren produce un impacto en la vía en la zona de separación de ambos tipos de vía.
 - Sin embargo, esto no ocurre en el CASO 4, en el que la tensión que se produce al circular de vía en balasto a vía en placa es ligeramente inferior que en los trenes que circulan en sentido opuesto. La causa de por qué ocurre esto no está muy claro.
- Se producen picos de tensiones muy elevados en los casos en los que existe una traviesa dispuesta junto a la placa. Una casi inexistente separación hace que el inicio de la placa o de la traviesa tenga que aguantar tensiones no admisibles que además se transmiten a la placa. Sin embargo, con la suficiente separación los esfuerzos soportados se encuentran dentro de los valores admisibles.
- En los casos en los que se dispone de una traviesa pegada a la placa (CASO 1 y CASO 3) se produce una propagación residual de tensiones una vez atravesada la transición, pero solo ocurre cuando se entra a la vía en balasto debido a que ésta posee menor resistencia que la vía en placa.
 - También ocurre esto mismo en el CASO 6, aunque en ese caso se debe a la excesiva separación y falta de apoyo en 1 metro.

ACELERACIONES EN EL CARRIL

En las siguientes dos gráficas se adjuntan los resultados de todos los modelos, agrupados por sentido.

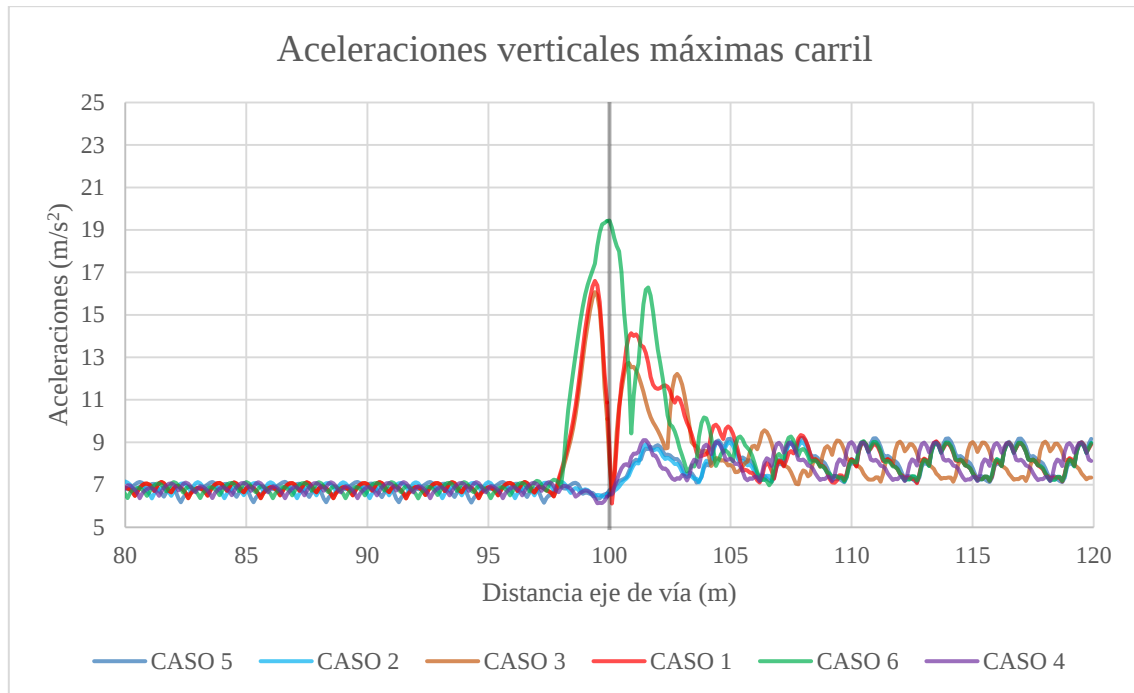


Figura 91: Aceleraciones verticales en el carril de todos los modelos dirección balasto - placa

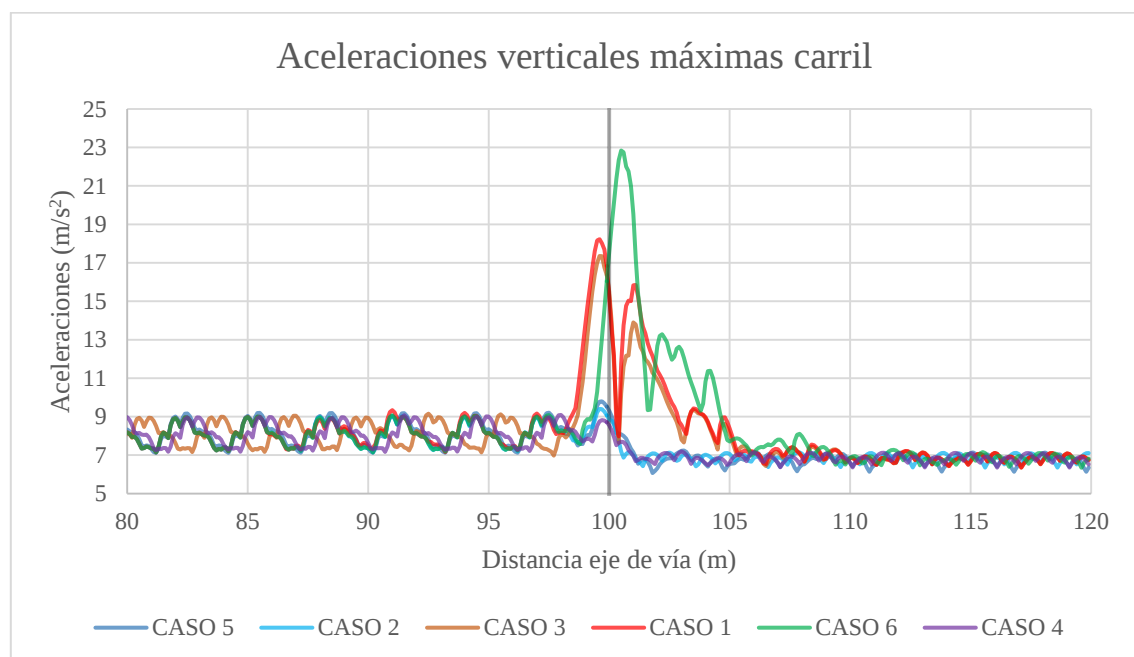


Figura 92: Aceleraciones verticales en el carril de todos los modelos dirección balasto - placa

A la vista de las gráficas anteriores:

- Los valores de las aceleraciones verticales transitorias en el carril en la transición son más elevados en los casos en los que se circula de vía en placa a vía en balasto, ya que al pasar a

vía en balasto las aceleraciones se amortiguan menos debido a que se reduce la rigidez global de la vía.

- Los mayores picos de tensión se producen el CASO 6, debido a la gran separación de los apoyos no permite absorber tan adecuadamente las aceleraciones producidas. De hecho, en las circulaciones de vía en placa a vía en balasto los picos con las mayores aceleraciones se las lleva la vía en balasto (a diferencia del resto de casos que es al revés).
- Los siguientes casos más críticos son los CASOS 1 y 3. El motivo es que la traviesa al ir pegada a la losa absorbe parte de las aceleraciones y vibraciones que recibe de ella (a pesar de estar medido en el carril).
- En los CASOS 2, 4 y 5 no aparecen picos de aceleraciones en la transición ya que existe una disposición adecuada de los apoyos y de la traviesa contigua a la placa (sin estar pegada a esta).

ACELERACIONES VERTICALES EN LAS TRAVIESAS / EN LA LOSA

En las siguientes dos gráficas se adjuntan los resultados de todos los modelos, agrupados por sentido.

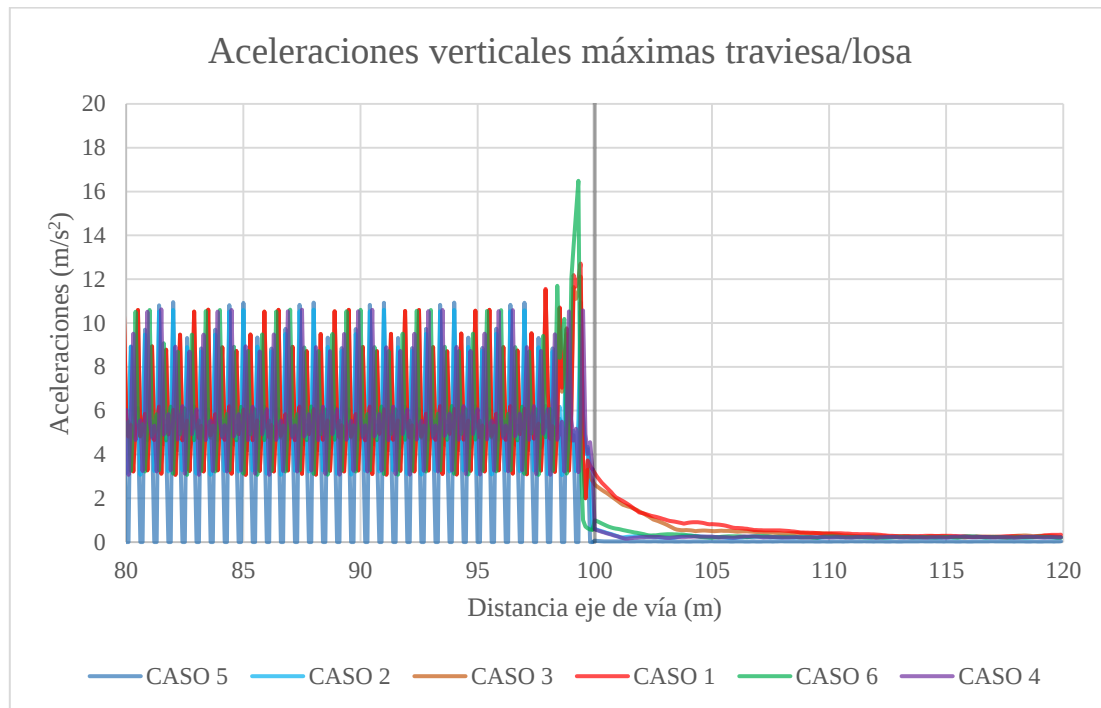


Figura 93: Aceleraciones máximas en la traviesa (primero) o en la losa (después) de todos los casos

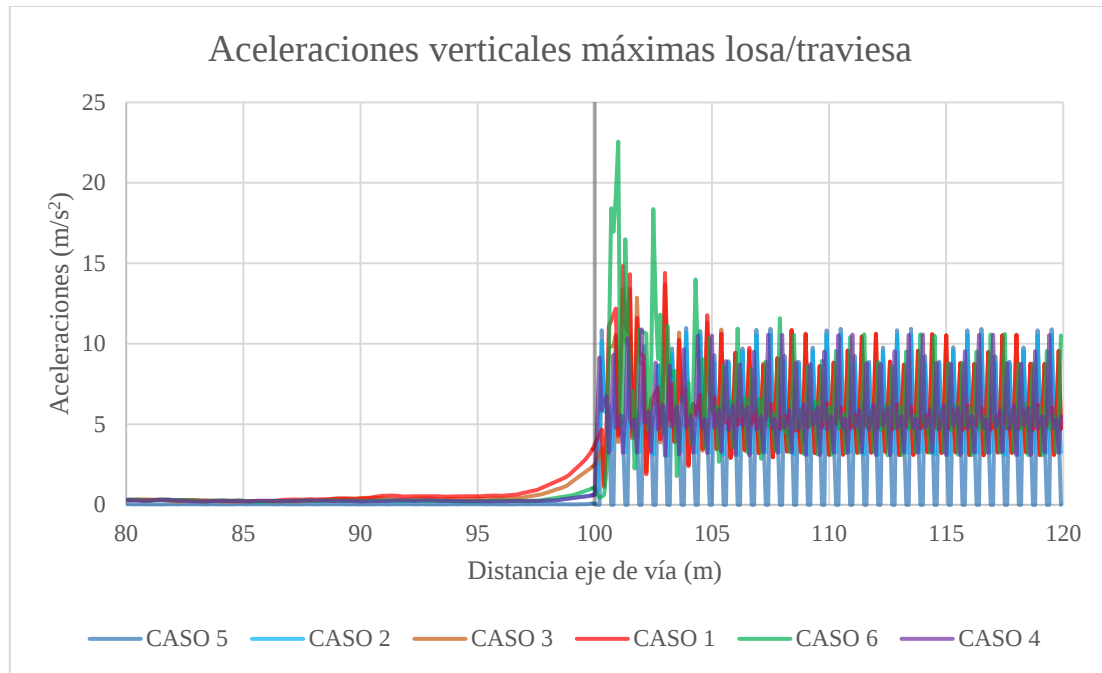


Figura 94: Aceleraciones máximas en la losa (primero) o en la traviesa (después) de todos los casos

A la vista de la comparación de las aceleraciones obtenidas en el carril:

- De manera similar a lo que pasa con las aceleraciones en el carril, los valores de las aceleraciones verticales en las traviesas y/o en la placa en la transición son más elevados en los casos en los que se circula de vía en placa a vía en balasto, ya que al pasar a vía en balasto las aceleraciones se amortiguan menos debido a que se reduce la rigidez global de la vía.
 - Los valores son un poco inferiores que en el carril ya que los pads y las propias traviesas/placa amortiguan las aceleraciones.
 - A diferencia del caso anterior, las aceleraciones máximas en todos los casos se los lleva la vía en balasto. Esto es debido a que estructuralmente es menos rígido que la vía en placa y, a pesar de tolerar mejor las vibraciones el balasto que el hormigón, debido a su menor rigidez tiende a soportar valores más elevados.
- El CASO 6 vuelve a ser el más crítico debido a la elevada distancia entre apoyos, que impide un mejor reparto de las aceleraciones.

ACELERACIONES VERTICALES EN EL TREN

En las siguientes dos gráficas se adjuntan los resultados de todos los modelos, agrupados por sentido.

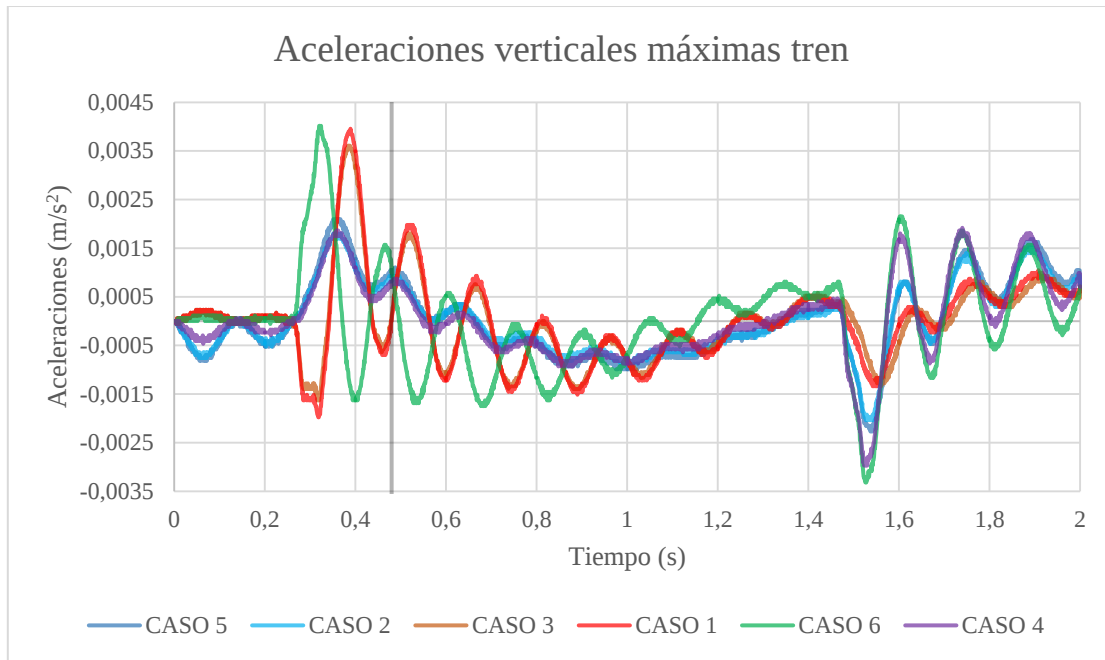


Figura 95: Aceleraciones verticales en la caja del tren de todos los modelos dirección balasto - placa

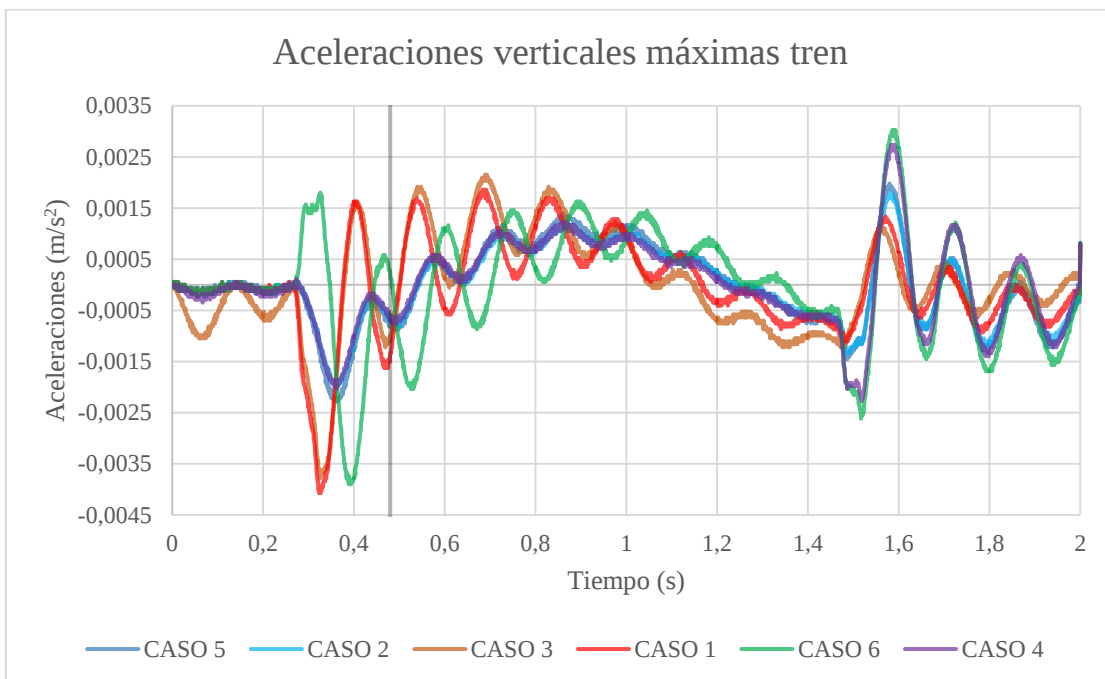


Figura 96: Aceleraciones verticales en la caja del tren de todos los modelos dirección placa - balasto

De estos resultados se desprenden algunas conclusiones interesantes:

- Los valores máximos de las aceleraciones son prácticamente simétricos, pero con signo opuesto, encontrando las mayores aceleraciones positivas cuando se circula de vía en balasto a vía en placa, y las mayores aceleraciones negativas al circular en sentido contrario.
- Los valores van alcanzando unos valores máximos, pero posteriormente va atenuándose.

- Los mayores picos se producirán en los casos en los que la traviesa contigua va pegada a la losa del tramo en vía en placa, debido a los mayores desplazamientos y tensiones que sufre la transición.
- También ocurren resultados similares en el CASO 6 pero en puntos más alejados de la transición, debido a la separación de los apoyos.
- Todos los modelos cumplen el límite $0,22 \text{ m/s}^2$ en aceleraciones verticales (ver Capítulo 3.3).

Adicionalmente se puede mencionar que los picos que se producen aproximadamente en el segundo 1,68 (ver Figuras 95 y 96) se debe a que el tren termina de pasar por el tramo de estudio, pero debido a que a la hora de calcular los modelos se ha tenido en cuenta las condiciones de contorno el tren vuelve a “empezar” a circular por el tramo y, por lo tanto, atravesará una transición ficticia. Estos valores no se tendrán en cuenta por lo que se acaba de explicar.

A la vista del estudio llevado a cabo y a modo de resumen se puede concluir que:

- La separación de los apoyos no debe ser superior al valor estándar (en el proyecto de 0,6 m entre apoyos) ya que se reduce la rigidez y los momentos flectores a los que está sometidos la vía son superiores, de manera que los elementos están sometidos a mayores cargas lo que supone una aceleración del deterioro de los materiales que conforman la vía en estas zonas.
- No debe disponerse la traviesa contigua a la zona de transición de manera que ésta se encuentre pegado a la losa de la vía en placa, ya que transmite las vibraciones y su comportamiento mecánico no es correcto.
- Los casos que mejor funcionan son cuando la traviesa contigua se encuentra separada a cierta distancia de la losa, pero siempre manteniendo una distancia habitual entre apoyos. El mejor caso posible es si el primer o último apoyo de la vía en placa se sitúa cerca del borde, pero no en el mismo, de tal manera que haya unos centímetros de losa que aportan cierta rigidez a la vía y, de esa manera, absorber mejor las tensiones y las aceleraciones. **Ésta debería ser la disposición habitual en zonas de transición.**
- Si bien no como objetivo principal del estudio, las mejoras de rigidez en el terreno consiguen mejorar los resultados. Sin embargo, son insuficientes por sí mismas y requieren complementarse de otras soluciones para aumentar su efectividad.

REFERENCIAS

- Admetlla Pérez, N. (2010). Transición vía en placa-vía con balasto mediante traviesas cuadro.
- Arlaud, E., Costa D'Aguiar, S., Balmes, E. & Faussurier, G. paper 13.201 from ISBN 978-1-905088-65-2 (2016) A Numerical Study of Railway Track Dynamics: The Case of a Transition Zone.
- Berggren, E. (2009). Railway track stiffness: dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance.
- Banimahd, M., Woodward, P. K., Kennedy, J., & Medero, G. M. (2012, August). Behaviour of train-track interaction in stiffness transitions. *In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport* (Vol. 165, No. 3, pp. 205-214). Thomas Telford Ltd.
- Cuéllar, V., Santos, A., & Valerio, J. (2002). Proyecto SUPERTRACK para el estudio a medio y largo plazo de las estructuras ferroviarias de balasto. *Ingeniería Civil*, (128).
- De Man, A. P. (2002). DYNATRACK: A survey of dynamic railway track properties and their quality. TU Delft, Delft University of Technology.
- DINATRANS <http://grupos.unican.es/gist/index.php/es/resumen>
- Ekberg, A., & Paulsson, B. (2010). INNOTRACK: concluding technical report. International Union of Railways (UIC).
- Esveld, C., & Markine, V. (1998). Slab track design for high speed. *Rail Engineering International*.
- Gallage, C., Dareeju, B., & Dhanasekar, M. (2013). State-of-the-art: track degradation at bridge transitions. In *Proceedings of the 4th International Conference on Structural Engineering and Construction Management 2013* (pp. 40-52).
- GIF (2003). Instrucciones y recomendaciones para la redacción de proyectos. (Edición Enero 2003).
- Giménez, J. M. G. (2011). Estudio por elementos finitos de la transición vía con balasto-vía en placa (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Departament d'Infraestructura del Transport i del Territori, 2011 (Enginyeria de Camins, Canals i Ports)).
- Kok, A. W. M. (1998). Moving loads and vehicles on a rail track structure: RAIL User's Manual.
- Lichtberger, B. (2011). *Manual de vía*. Eurailpress, DVV Media Group.
- Mendoza, J. J. (2012). Proyecto, Ejecución y Construcción de Superestructura de Vía en Placa. Diseño, Construcción y Mantenimiento de vía en placa, Madrid.
- Namura, A., Kohata, Y., & Miura, S. (2004). Effect of sleeper size on ballasted track settlement. *Quarterly Report of RTRI*, 45(3), 156-161.
- Pita, A. L. (2006). *Infraestructuras ferroviarias* (Vol. 12). Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- Puzavac, L., Popović, Z., & Lazarević, L. (2012). Influence of track stiffness on track behaviour under vertical load. *PROMET-Traffic&Transportation*, 24(5), 405-412.
- RAILONE GmbH Pfleiderer track systems. (RHEDA 2000) www.railone.es
- Read, D., & Li, D. (2006). Design of track transitions. *TCRP Research Results Digest*, (79).
- Sañudo Ortega, R. (2013). Optimización en el diseño de zonas de transición en vías de alta velocidad usando métodos numéricos.
- Sañudo, R., dell'Olio, L., Casado, J. A., Carrascal, I. A., & Diego, S. [A] (2016). Track transitions in railways: A review. *Construction and Building Materials*, 112, 140-157.

Sañudo, R. Markine, V.L. Dell'Olio L. (2016) The Effect of Increasing Train Speed on Track Transition Performance, Paper 13.200 from CCP: 110, ISBN 978-1-905088-65-2 (2016).

Sañudo, R., Miranda, M., Markine, V., dell'Olio, L., [B] (2016).The influence of train running direction and track supports position on the behaviour of transition zones. XII Congreso de Ingeniería de los Transportes CIT2016.

UNE-EN 12299:2010: Aplicaciones ferroviarias. Comodidad de viaje para los viajeros. Medición y valoración.

UNE-EN 13848-1: Caracterización de la geometría de vía

Wang, H., Markine, V. L., Dollevoet, R. P. B. J., & Shevtsov, I. Y. (2015, August). Improvement of train-track interaction in transition zones via reduction of ballast damage. In *IAVSD 2015: 24th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Graz, Austria, 17-21 August 2015*.

ANEXO

Se incluyen a continuación los modelos numéricos programados con DARTS para cada uno de los casos de estudio.

CASO 1.I

```

rail 'BALLAST TO SLAB INITIAL
unit Mete KN
bott laye FORM
gene RAIL N=2000 dx=0.1
boun cond on
$surf file 'NSTO_NEW' X=690.          scale= 1.
dele
FILL from 1 to 1
*
dele
FILL from 5 to 7
REPE 165 times, increment 6
*
dele
FILL from 1004 to 1006
REPE 166 times, increment 6
*
dele
SLAB from 1 to 1
*
dele
SLAB from 5 to 7
REPE 165 times, increment 6
*

rail prop 'UIC-60 '
SLAB PROP 'BN80' w=1.30      H=0.22 /
      ELEMENTS      1      1000
SLAB PROP 'BN35' w=1.20      H=0.246 /
      ELEMENTS      1001     2000
fill mate
1      to 1000 kf = 500000    cf = 35      den = 10.000E+00
1001   to 2000 kf = 165000    cf = 40      den = 10.000E+00
*
elas bed
1      to 1000 kf= 200.E+03    cf= 80.00   den = 1.5E+00
1001   to 2000 kf= 240.E+05    cf=200.00   den = 2.4E+00
*

foun prop 'CFOR ' w      = 2.60000E+00 h = 0.60000E+00 /
      ELEMENTS 1 to 1000

foun prop 'BN30' w      = 2.40000E+00 h = 0.75000E+00 /
      ELEMENTS 1001 to 2000

form      kf = 0.10000E+07 cf = 0.20000E+02 den = 0.10000E+01

movi trai 'loco ' velocity= 83.33      offset= 60
int u      = 2      by = 0.001

```

arti damp rail=1. pad=0.5 slab=0.5 hertz=1.

\$FINISH De balasto a placa / Caso 1
\$FINISH

FINISH

CASO 1.V

```

rail 'SLAB TO BALLAST INITIAL
unit Mete KN
bott laye FORM
gene RAIL N=2000 dx=0.1
boun cond on
$surf file 'NSTO_NEW' X=690.          scale= 1.
dele
FILL from 1 to 1
*
dele
FILL from 5 to 7
REPE 165 times, increment 6
*
dele
FILL from 1004 to 1006
REPE 166 times, increment 6
*
dele
SLAB from 1004 to 1006
REPE 166 times, increment 6
*

rail prop 'UIC-60 '
SLAB PROP 'BN35' w=1.20      H=0.246 /
      ELEMENTS      1      1000
SLAB PROP 'BN80' w=1.30      H=0.22 /
      ELEMENTS      1001      2000
fill mate
1      to 1000 kf = 165000      cf = 40      den = 10.000E+00
1001   to 2000 kf = 500000      cf = 35      den = 10.000E+00
*
elas bed
1      to 1000 kf= 240.E+05      cf=200.00 den = 2.4E+00
1001   to 2000 kf= 200.E+03      cf=80.00  den = 1.5E+00
*

foun prop 'BN30' w      = 2.40000E+00 h = 0.750000E+00 /
      ELEMENTS 1 to 1000

foun prop 'CFOR ' w      = 2.60000E+00 h = 0.60000E+00 /
      ELEMENTS 1001 to 2000

form      kf = 0.10000E+07 cf = 0.20000E+02 den = 0.10000E+01

movi trai 'loco ' velocity= 83.33      offset= 60
int u      = 2      by = 0.001
arti damp rail=1. pad=0.5 slab=0.5 hertz=1.

```

\$FINISH De placa a balasto / Caso 1
\$FINISH

FINISH

CASO 2.I

```

rail 'BALLAST TO SLAB INITIAL
unit Mete KN
bott laye FORM
gene RAIL N=2000 dx=0.1
boun cond on
$surf file 'NSTO_NEW' x=690.          scale= 1.
dele
FILL from 2 to 4
REPE 166 times, increment 6
*
dele
FILL from 1004 to 1006
REPE 166 times, increment 6
*
dele
SLAB from 2 to 4
REPE 166 times, increment 6
*

rail prop 'UIC-60 '
SLAB PROP 'BN80' w=1.30      H=0.22 /
      ELEMENTS      1      1000
SLAB PROP 'BN35' w=1.20      H=0.246 /
      ELEMENTS      1001     2000
fill mate
1      to 1000 kf = 500000    cf = 35      den = 10.000E+00
1001   to 2000 kf = 165000    cf = 40      den = 10.000E+00
*
elas bed
1      to 1000 kf= 200.E+03    cf= 80.00    den = 1.5E+00
1001   to 2000 kf= 240.E+05    cf=200.00    den = 2.4E+00
*

foun prop 'CFOR ' w      = 2.60000E+00 h = 0.60000E+00 /
      ELEMENTS 1 to 1000

foun prop 'BN30' w      = 2.40000E+00 h = 0.75000E+00 /
      ELEMENTS 1001 to 2000

form      kf = 0.10000E+07 cf = 0.20000E+02 den = 0.10000E+01

movi trai 'loco ' velocity= 83.33      offset= 60
int u      = 2      by = 0.001
arti damp rail=1. pad=0.5 slab=0.5 hertz=1.

$FINISH De balasto a placa / Caso 2
$FINISH

FINISH

```

CASO 2.V

```

rail 'SLAB TO BALLAST INITIAL
unit Mete KN
bott laye FORM
gene RAIL N=2000 dx=0.1
boun cond on
$surf file 'NSTO_NEW' x=690.          scale= 1.
dele
FILL from 1 to 1
*
dele
FILL from 5 to 7
REPE 331 times, increment 6
*
dele
SLAB from 1001 to 1003
REPE 166 times, increment 6
*

rail prop 'UIC-60 '
SLAB PROP 'BN35' w=1.20      H=0.246 /
      ELEMENTS      1      1000
SLAB PROP 'BN80' w=1.30      H=0.22  /
      ELEMENTS      1001     2000
fill mate
1  to 1000 kf = 165000   cf  = 40      den = 10.000E+00
1001  to 2000 kf = 500000   cf  = 35      den = 10.000E+00
*
elas bed
1  to 1000 kf= 240.E+05   cf=200.00   den = 2.4E+00
1001  to 2000 kf= 200.E+03   cf=80.00   den = 1.5E+00
*

foun prop 'BN30' w  = 2.40000E+00 h = 0.750000E+00  /
      ELEMENTS 1 to 1000

foun prop 'CFOR ' w  = 2.60000E+00 h = 0.60000E+00  /
      ELEMENTS 1001 to 2000

form      kf  = 0.10000E+07 cf  = 0.20000E+02 den = 0.10000E+01

movi trai 'loco ' velocity= 83.33      offset= 60
int u  = 2      by  = 0.001
arti damp rail=1. pad=0.5 slab=0.5 hertz=1.

$FINISH De placa a balasto / Caso 2
$FINISH

FINISH

```

CASO 3.I

```

rail 'BALLAST TO SLAB INITIAL
unit Mete KN

```

```

bott laye FORM
gene RAIL N=2000 dx=0.1
boun cond on
$surf file 'NSTO_NEW' x=690.          scale= 1.
dele
FILL from 1 to 1
*
dele
FILL from 5 to 7
REPE 332 times, increment 6
*
dele
SLAB from 1 to 1
*
dele
SLAB from 5 to 7
REPE 165 times, increment 6
*

rail prop 'UIC-60 '
SLAB PROP 'BN80' w=1.30      H=0.22  /
      ELEMENTS      1      1000
SLAB PROP 'BN35' w=1.20      H=0.246 /
      ELEMENTS      1001     2000
fill mate
1 to 1000 kf = 500000    cf = 35    den = 10.000E+00
1001 to 2000 kf = 165000    cf = 40    den = 10.000E+00
*
elas bed
1 to 1000 kf= 200.E+03    cf= 80.00    den = 1.5E+00
1001 to 2000 kf= 240.E+05    cf=200.00    den = 2.4E+00
*

foun prop 'CFOR ' w = 2.60000E+00 h = 0.60000E+00  /
      ELEMENTS 1 to 1000

foun prop 'BN30' w = 2.40000E+00 h = 0.75000E+00  /
      ELEMENTS 1001 to 2000

form      kf = 0.10000E+07 cf = 0.20000E+02 den = 0.10000E+01

movi trai 'loco ' velocity= 83.33      offset= 60
int u = 2      by = 0.001
arti damp rail=1. pad=0.5 slab=0.5 hertz=1.

$FINISH De balasto a placa / Caso 3
$FINISH

FINISH

```

CASO 3.V

```

rail 'SLAB TO BALLAST INITIAL
unit Mete KN
bott laye FORM
gene RAIL N=2000 dx=0.1
boun cond on

```

```

$surf file 'NSTO_NEW' x=690.          scale= 1.
dele
FILL from 2 to 4
REPE 332 times, increment 6
*
dele
SLAB from 1004 to 1006
REPE 166 times, increment 6
*

rail prop 'UIC-60' '
SLAB PROP 'BN35' w=1.20      H=0.246 /
      ELEMENTS      1      1000
SLAB PROP 'BN80' w=1.30      H=0.22 /
      ELEMENTS      1001     2000
fill mate
1      to 1000 kf = 165000    cf = 40    den = 10.000E+00
1001   to 2000 kf = 500000    cf = 35    den = 10.000E+00
*
elas bed
1      to 1000 kf= 240.E+05    cf=200.00 den = 2.4E+00
1001   to 2000 kf= 200.E+03    cf=80.00  den = 1.5E+00
*

foun prop 'BN30' w      = 2.40000E+00 h = 0.750000E+00 /
      ELEMENTS 1 to 1000

foun prop 'CFOR' ' w      = 2.60000E+00 h = 0.60000E+00 /
      ELEMENTS 1001 to 2000

form      kf = 0.10000E+07 cf = 0.20000E+02 den = 0.10000E+01

movi trai 'loco' velocity= 83.33      offset= 60
int u      = 2      by = 0.001
arti damp rail=1. pad=0.5 slab=0.5 hertz=1.

$FINISH De placa a balasto / Caso 3
$FINISH

FINISH

```

CASO 4.I

```

rail 'BALLAST TO SLAB INITIAL
unit Mete KN
bott laye FORM
gene RAIL N=2000 dx=0.1
boun cond on
$surf file 'NSTO_NEW' x=690.          scale= 1.
dele
FILL from 3 to 5
REPE 332 times, increment 6
*
dele
SLAB from 3 to 5
REPE 165 times, increment 6
*

```

```

dele
SLAB from 999 to 1000
*

rail prop 'UIC-60 '
SLAB PROP 'BN80' w=1.30      H=0.22 /
      ELEMENTS      1      1000
SLAB PROP 'BN35' w=1.20      H=0.246 /
      ELEMENTS      1001      2000
fill mate
1      to 1000 kf = 500000      cf = 35      den = 10.000E+00
1001 to 2000 kf = 165000      cf = 40      den = 10.000E+00
*
elas bed
1      to 1000 kf= 200.E+03      cf= 80.00      den = 1.5E+00
1001 to 2000 kf= 240.E+05      cf=200.00      den = 2.4E+00
*

foun prop 'CFOR ' w      = 2.60000E+00 h = 0.60000E+00 /
      ELEMENTS 1 to 1000

foun prop 'BN30' w      = 2.40000E+00 h = 0.75000E+00 /
      ELEMENTS 1001 to 2000

form      kf = 0.10000E+07 cf = 0.20000E+02 den = 0.10000E+01

movi trai 'loco ' velocity= 83.33      offset= 60
int u      = 2      by = 0.001
arti damp rail=1. pad=0.5 slab=0.5 hertz=1.

$FINISH De balasto a placa / Caso 4
$FINISH

FINISH

```

CASO 4.V

```

ail 'SLAB TO BALLAST INITIAL
unit Mete KN
bott laye FORM
gene RAIL N=2000 dx=0.1
boun cond on
$surf file 'NSTO_NEW' x=690.      scale= 1.
dele
FILL from 4 to 6
REPE 332 times, increment 6
*
dele
SLAB from 1001 to 1002
*
dele
SLAB from 1006 to 1008
REPE 165 times, increment 6
*

rail prop 'UIC-60 '
SLAB PROP 'BN35' w=1.20      H=0.246 /

```

```

ELEMENTS      1      1000
SLAB PROP 'BN80' w=1.30      H=0.22 /
ELEMENTS      1001      2000
fill mate
1      to 1000 kf = 165000      cf = 40      den = 10.000E+00
1001 to 2000 kf = 500000      cf = 35      den = 10.000E+00
*
elas bed
1      to 1000 kf= 240.E+05      cf=200.00 den = 2.4E+00
1001 to 2000 kf= 200.E+03      cf=80.00 den = 1.5E+00
*

foun prop 'BN30' w      = 2.40000E+00 h = 0.750000E+00 /
ELEMENTS 1 to 1000

foun prop 'CFOR ' w      = 2.60000E+00 h = 0.60000E+00 /
ELEMENTS 1001 to 2000

form      kf = 0.10000E+07 cf = 0.20000E+02 den = 0.10000E+01

movi trai 'loco ' velocity= 83.33      offset= 60
int u      = 2      by = 0.001
arti damp rail=1. pad=0.5 slab=0.5 hertz=1.

$FINISH De placa a balasto / Caso 4
$FINISH

FINISH

```

CASO 5.I

```

rail 'BALLAST TO SLAB INITIAL
unit Mete KN
bott laye BED
gene RAIL N=2000 dx=0.1
boun cond on
$surf file 'NSTO_NEW' x=690.      scale= 1.
dele
FILL from 2 to 4
REPE 166 times, increment 6
*
dele
FILL from 1004 to 1006
REPE 166 times, increment 6
*
dele
SLAB from 2 to 4
REPE 166 times, increment 6
*

rail prop 'UIC-60 '
SLAB PROP 'BN80' w=1.30      H=0.22 /
ELEMENTS      1      1000
SLAB PROP 'BN35' w=1.20      H=0.246 /
ELEMENTS      1001      2000
fill mate
1      to 1000 kf = 500000      cf = 35      den = 10.000E+00

```

```

1001 to 2000 kf = 165000 cf = 40 den = 10.000E+00
*
elas bed
1 to 1000 kf= 200.E+03 cf= 80.00 den = 1.5E+00
1001 to 2000 kf= 240.E+05 cf=200.00 den = 2.4E+00
*

movi trai 'loco ' velocity= 83.33 offset= 60
int u = 2 by = 0.001
arti damp rail=1. pad=0.5 slab=0.5 hertz=1.

$FINISH De balasto a placa / Caso 5
$FINISH

```

FINISH

CASO 5.V

```

rail 'SLAB TO BALLAST INITIAL
unit Mete KN
bott laye BED
gene RAIL N=2000 dx=0.1
boun cond on
$surf file 'NSTO_NEW' x=690. scale= 1.
dele
FILL from 1 to 1
*
dele
FILL from 5 to 7
REPE 331 times, increment 6
*
dele
SLAB from 1001 to 1003
REPE 166 times, increment 6
*

rail prop 'UIC-60 '
SLAB PROP 'BN35' W=1.20 H=0.246 /
ELEMENTS 1 1000
SLAB PROP 'BN80' W=1.30 H=0.22 /
ELEMENTS 1001 2000
fill mate
1 to 1000 kf = 165000 cf = 40 den = 10.000E+00
1001 to 2000 kf = 500000 cf = 35 den = 10.000E+00
*
elas bed
1 to 1000 kf= 240.E+05 cf=200.00 den = 2.4E+00
1001 to 2000 kf= 200.E+03 cf=80.00 den = 1.5E+00
*

movi trai 'loco ' velocity= 83.33 offset= 60
int u = 2 by = 0.001
arti damp rail=1. pad=0.5 slab=0.5 hertz=1.

$FINISH De placa a balasto / Caso 5
$FINISH

```

FINISH

CASO 6.I

```

rail 'BALLAST TO SLAB INITIAL
unit Mete KN
bott laye FORM
gene RAIL N=2000 dx=0.1
boun cond on
$surf file 'NSTO_NEW' x=690.          scale= 1.
dele
FILL from 4 to 6
REPE 164 times, increment 6
*
dele
FILL from 994 to 1000
*
dele
FILL from 1004 to 1006
REPE 166 times, increment 6
*
dele
SLAB from 4 to 6
REPE 164 times, increment 6
*
dele
SLAB from 994 to 1000
*

rail prop 'UIC-60 '
SLAB PROP 'BN80' w=1.30      H=0.22  /
      ELEMENTS      1      1000
SLAB PROP 'BN35' w=1.20      H=0.246 /
      ELEMENTS      1001     2000
fill mate
1      to 1000 kf = 500000   cf = 35    den = 10.000E+00
1001   to 2000 kf = 165000   cf = 40    den = 10.000E+00
*
elas bed
1      to 1000 kf= 200.E+03   cf= 80.00  den = 1.5E+00
1001   to 2000 kf= 240.E+05   cf=200.00  den = 2.4E+00
*

foun prop 'CFOR ' w = 2.60000E+00 h = 0.60000E+00  /
      ELEMENTS 1 to 1000

foun prop 'BN30' w = 2.40000E+00 h = 0.750000E+00  /
      ELEMENTS 1001 to 2000

form      kf = 0.10000E+07 cf = 0.20000E+02 den = 0.10000E+01

movi trai 'loco ' velocity= 83.33      offset= 60
int u = 2      by = 0.001
arti damp rail=1. pad=0.5 slab=0.5 hertz=1.

$FINISH De balasto a placa / Caso 6

```

\$FINISH

FINISH

CASO 6.V

```

rail 'SLAB TO BALLAST INITIAL
unit Mete KN
bott laye FORM
gene RAIL N=2000 dx=0.1
boun cond on
$surf file 'NSTO_NEW' x=690.          scale= 1.
dele
FILL from 1 to 1
*
dele
FILL from 5 to 7
REPE 165 times, increment 6
*
dele
FILL from 1001 to 1004
*
dele
FILL from 1005 to 1007
REPE 165 times, increment 6
*
dele
SLAB from 1001 to 1004
*
dele
SLAB from 1005 to 1007
REPE 165 times, increment 6
*

rail prop 'UIC-60 '
SLAB PROP 'BN35' w=1.20      H=0.246 /
      ELEMENTS      1      1000
SLAB PROP 'BN80' w=1.30      H=0.22 /
      ELEMENTS      1001     2000
fill mate
1      to 1000 kf = 165000    cf = 40      den = 10.000E+00
1001   to 2000 kf = 500000    cf = 35      den = 10.000E+00
*
elas bed
1      to 1000 kf= 240.E+05    cf=200.00 den = 2.4E+00
1001   to 2000 kf= 200.E+03    cf=80.00  den = 1.5E+00
*

foun prop 'BN30' w      = 2.40000E+00 h = 0.750000E+00 /
      ELEMENTS 1 to 1000

foun prop 'CFOR ' w      = 2.60000E+00 h = 0.60000E+00 /
      ELEMENTS 1001 to 2000

form      kf = 0.10000E+07 cf = 0.20000E+02 den = 0.10000E+01

movi trai 'loco ' velocity= 83.33          offset= 60

```

```
int u    = 2          by  = 0.001  
arti damp rail=1.  pad=0.5 slab=0.5 hertz=1.
```

```
$FINISH De placa a balasto / Caso 6  
$FINISH
```

```
FINISH
```