



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,  
Canales y Puertos

Estudio del comportamiento de la capa de balasto  
aplicando el método de elementos discretos. Aplicación al  
tramo ferroviario Valencia-Silla.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

AUTOR/A: Márquez Castellano, Adrián

Tutor/a: Villalba Sanchis, Ignacio

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



# AGRADECIMIENTOS

*A los miembros de la unidad de transportes y ferrocarriles por la disposición a ayudar en todo momento, y en especial a mi tutor Ignacio Villalba por todo el tiempo, el apoyo y la confianza prestadas para poder realizar este trabajo.*

*A mi familia. A los que están, porque han hecho todo lo que estaba en su mano por ayudarme. Y a los que ya no están, por haberme transmitido sus enseñanzas.*

*Y a mis amigos, por estar siempre para lo que haga falta.*

## **ABSTRACT**

On the railroad scope, it is common to find many literatures about the ballast layer response under load solicitations, many of them based on a continuum model approach. Nevertheless, railway ballast is a granular material with a complex response, subjected to dynamic load solicitations, and continuum models cannot perform particle behaviour accurately.

Thus, to understand the behaviour of this granular layer it is necessary to improve the modelling, using new models which bear in mind the material discontinuities. This work aims to develop a research about the ballast layer behaviour under train loads employing the Discrete Element Model. The results obtained from the model will be compared to field works realized at Valencia – Silla railway track.

## RESUMEN

En el ámbito ferroviario, dada la complejidad de la respuesta de la capa de balasto, son numerosos los estudios que utilizan la hipótesis de materiales continuos, empleando el Método de los Elementos Finitos. Sin embargo, la capa de balasto está formada por un conjunto de partículas granulares sometidas a sollicitaciones dinámicas cuyo comportamiento dista mucho del presentado por un material continuo.

Por tanto, para comprender el comportamiento de esta capa es necesario avanzar en la modelización, empleando modelos de representación granulares que tengan en cuenta las discontinuidades del material. De esta forma, el presente trabajo llevará a cabo un estudio del comportamiento de la capa de balasto ante la aplicación de cargas sobre la misma, empleando un modelo basado en el Método de Elementos Discretos que se validará y aplicará al tramo ferroviario convencional entre Valencia y Silla mediante datos obtenidos en campo en el mismo.

# ÍNDICE GENERAL

ABSTRACT .....	2
RESUMEN .....	3
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
ÍNDICE DE TABLAS .....	14
1 INTRODUCCIÓN .....	16
1.1 ANTECEDENTES .....	16
1.2 ALCANCE .....	17
1.3 OBJETIVOS .....	17
2 ESTADO DEL ARTE.....	18
2.1 MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL BALASTO .....	18
2.1.1 Método de Elementos Finitos (FEM) .....	18
2.1.2 Método de Elementos Discretos (DEM).....	18
2.2 FORMA DE LAS PARTÍCULAS DE BALASTO.....	20
2.2.1 Esferas o discos.....	21
2.2.2 Cúmulos de esferas .....	23
2.2.3 Poliedros .....	27
2.2.4 Partículas potenciales .....	28
2.3 MODELOS DE CONTACTO.....	30
2.3.1 Modelos para partículas esféricas o circulares .....	31
2.3.2 Modelos para partículas no esféricas .....	32
2.4 ROTURA DEL BALASTO .....	34
2.4.1 Rotura del enlace entre partículas de un cúmulo.....	34
2.4.2 División de una partícula en otras menores.....	35
2.5 CARGAS DINÁMICAS SOBRE EL BALASTO.....	37
3 METODOLOGÍA.....	41
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL .....	41
3.2 OBTENCIÓN DE LA RIGIDEZ DEL BALASTO EN VÍA .....	42
3.2.1 Toma de datos en campo .....	43

3.2.2	Procesado de datos y obtención de la rigidez .....	44
3.3	MODELIZACIÓN NUMÉRICA .....	44
3.3.1	Caracterización del modelo .....	45
3.3.2	Preparación de la muestra .....	46
3.3.3	Parametrización mecánica del modelo .....	46
3.3.4	Calibración y validación del modelo .....	47
3.4	APLICACIÓN PRÁCTICA: CASOS DE CARGA.....	47
4	CARACTERÍSTICAS DEL TRAMO DE ESTUDIO.....	49
4.1	MARCO GENERAL.....	49
4.2	IMPORTANCIA ESTRATÉGICA .....	50
4.3	SUPERESTRUCTURA .....	51
4.3.1	Sección tipo .....	51
4.3.2	Balasto .....	52
4.3.3	Traviesas.....	53
4.3.4	Carriles.....	55
4.4	TIPOLOGÍAS DE TRÁFICO .....	55
4.4.1	Servicios del núcleo de cercanías de Valencia .....	56
4.4.2	Servicios de Media Distancia (MD).....	58
4.4.3	Servicios de Larga Distancia (LD) .....	60
4.4.4	Servicios de transporte de mercancías.....	62
5	MODELO NUMÉRICO .....	64
5.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO .....	65
5.1.1	Configuración geométrica .....	65
5.1.2	Balasto .....	67
5.1.3	Traviesas.....	69
5.2	HIPÓTESIS DE PARTIDA .....	71
5.2.1	Parámetros de la simulación .....	71
5.2.2	Modelo de contacto .....	72
5.2.3	Materiales .....	73

5.2.4	Límites del modelo .....	74
5.3	ETAPAS DE PREPARACIÓN .....	75
5.3.1	ETAPA 1: Generación y deposición por gravedad .....	75
5.3.2	ETAPA 2: Ciclos de compactación.....	76
5.3.3	ETAPA 3: Colocación de traviesa y balasto restante .....	77
5.3.4	ETAPA 4: Finalización del modelo .....	78
5.4	APLICACIÓN DE CARGAS.....	78
5.4.1	Distribución de cargas.....	78
5.4.2	Carga estática.....	79
5.4.3	Carga cuasi – estática.....	80
5.4.4	Carga lateral: STPT.....	80
5.4.5	Carga dinámica.....	81
6	APLICACIÓN PRÁCTICA.....	84
6.1	VALIDACIÓN.....	84
6.2	SOLICITACIÓN ESTÁTICA.....	86
6.2.1	Descripción .....	86
6.2.2	Descenso de traviesa.....	87
6.2.3	Desplazamiento del balasto .....	88
6.2.4	Velocidades.....	93
6.2.5	Esfuerzos .....	96
6.2.6	Cadenas de fuerza normal .....	98
6.2.7	Modelo con tres traviesas: Defectos en la capa de balasto .....	100
6.2.8	Modelo con cinco traviesas .....	105
6.3	SOLICITACIÓN ESTÁTICA CON DEFECTOS DE VÍA.....	110
6.3.1	Descripción .....	110
6.3.2	Descenso de traviesa.....	110
6.3.3	Desplazamiento del balasto .....	112
6.3.4	Velocidades.....	112
6.3.5	Esfuerzos .....	113



6.4	SOLICITACIÓN CUASIESTÁTICA .....	114
6.4.1	Descripción .....	114
6.4.2	Descenso de traviesa .....	115
6.4.3	Desplazamiento del balasto .....	116
6.4.4	Velocidades .....	118
6.4.5	Esfuerzos .....	119
6.5	CARGA LATERAL STPT .....	120
6.5.1	Descripción .....	120
6.5.2	Resistencia transversal de la vía .....	120
6.5.3	Desplazamiento del balasto .....	122
6.5.4	Velocidades .....	124
6.5.5	Esfuerzos .....	126
6.5.6	Cadenas de fuerza normal .....	127
6.6	SOLICITACIÓN DINÁMICA .....	128
6.6.1	Descripción .....	128
6.6.2	Descenso de la traviesa .....	129
6.6.3	Desplazamiento del balasto .....	131
6.6.4	Velocidades .....	137
6.6.5	Esfuerzos .....	139
6.7	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	140
7	CONCLUSIONES .....	142
7.1	RECAPITULACIÓN DE RESULTADOS .....	142
7.2	LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	144
7.3	CONSECUCIÓN DE LOS OBJETIVOS PROPUESTOS .....	144
8	BIBLIOGRAFÍA .....	146
	ANEJOS .....	154
	ANEJO N°1: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS) .....	155
	ANEJO N°2: GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS DE BALASTO .....	159

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Número de publicaciones anuales relacionadas con el modelado del balasto empleando el Método de Elementos Discretos. (Obtenido de la base de datos Scopus mediante la búsqueda: TITLE-ABS-KEY ( ( ballast OR railroad OR ballasted ) AND ( dem OR "discrete element method" OR "distinct element method" ) ) ).....	19
Figura 2. Velocidad de las esferas que simulan las partículas de balasto al paso de un tren. (Irazábal González, 2017) .....	23
Figura 3. Muestra del primer set de cúmulos propuesto y su correlación con los principales descriptores de forma. El valor p indica el solape entre partículas de un mismo cúmulo (Suhr & Six, 2020). .....	25
Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de creación de los cúmulos de esferas (Zhang et al., 2017). 26	
Figura 5. Piedras de balasto generadas aleatoriamente por teselación de Voronoi. Para cada poliedro se muestran las vistas frontal (A), lateral (B) e inferior (C). (Eliáš, 2013). .....	27
Figura 6. Ejemplo de partícula potencial aproximando la forma de piedras reales de balasto (Ahmed et al., 2016).....	29
Figura 7. Representación del plano común (CP) entre dos partículas: (a) partículas en contacto y (b) partículas que no intersecan el plano y por lo tanto no se encuentran en contacto. (Nezami et al., 2006).....	33
Figura 8. Posibles etapas para simular el proceso de rotura de una partícula en fragmentos (Lobo-Guerrero & Vallejo, 2006). .....	36
Figura 9. a) División del poliedro en dos mitades descartada; b) Método para la división del poliedro en cuatro partículas menores; c) Captura realizada del estado de la partícula en la simulación: antes de la rotura, inmediatamente tras la rotura; y una vez transcurridas un gran número de iteraciones. (Eliáš, 2014). .....	37
Figura 10. Ejemplo de aplicación de un esfuerzo desviador de 374 kPa aplicado con una frecuencia de 10 Hz. (Indraratna et al., 2010). .....	38
Figura 11. Representación de la variación temporal de la fuerza transmitida por el conjunto traviesa-carril. (Zhang et al., 2017). .....	39
Figura 12. Esquema del modelo dinámico de interacción entre plataforma y vehículo. (Zhai et al., 2009).....	39
Figura 13. Geometría de un Serie 100 de Renfe. Dimensiones en metros. (Irazábal González, 2017). 40	
Figura 14. Diagrama de flujo de la metodología seguida en el desarrollo del modelo. (Elaboración propia).....	41

Figura 15. Superior: Situación general del desvío del que se han tomado los datos. Inferior: Zona de trabajo en la que se han realizado las mediciones. (Elaboración propia a partir de imágenes por satélite tomadas de Google Earth).....	42
Figura 16. Martillo de impacto instrumentado. (PCB).....	43
Figura 17. Diagrama de flujo seguido en la elaboración del modelo numérico.....	45
Figura 18. Proceso de puesta en obra del balasto. (Elaboración propia). ....	46
Figura 19. Diagrama de las principales conexiones en ancho ibérico en las que interviene el tramo Valencia – Silla, coloreado en rojo se encuentra el propio tramo objeto del documento. (Elaboración propia). ....	50
Figura 20. Sección tipo en vía general para vías de ancho ibérico. (Adif). ....	52
Figura 21. Fotografía de vía en la que, a pesar del elevado grado de desgaste de las traviesas, se puede apreciar la nomenclatura que define el modelo; a) Inscripción PR90SN; b) Inscripción PR 90. (Elaboración propia). ....	53
Figura 22. Planta, alzado y perfil de la traviesa PR-90 SN, cotas en mm. (Adif,1997).....	54
Figura 23. Principales características geométricas y mecánicas del perfil de carril 54E1. (Adif). ....	55
Figura 24. Descripción esquemática de una Unidad Básica del modelo. Vista en planta (superior) y vista en alzado (inferior). Dimensiones en mm. (Elaboración propia).....	66
Figura 25. Representación simplificada de los tres tipos de cúmulos considerados. Construcción sin solape entre las esferas, $p=1$ (Izquierda), construcción con solape, $p<1$ (centro) y construcción con el mínimo solape posible (derecha). (Suhr & Six, 2020).....	67
Figura 26. Comparación de los descriptores de forma propuestos entre el balasto (amarillo) y las partículas seleccionadas de cada una de las tres colecciones. (Suhr & Six, 2020).....	68
Figura 27. Representados en verde los límites del huso granulométrico aceptado por Adif para el balasto. En rojo la granulometría del balasto empleado en el modelo. (Elaboración propia)	69
Figura 28. Planta y alzado de la traviesa, se han representado la posición t.....	71
Figura 29. Etapas seguidas durante el proceso de generación del modelo. (Elaboración propia). ...	75
Figura 30. Distribución de una carga puntual a través de las traviesas hacia la capa de balasto. (Ramunas et al., 2014). ....	79
Figura 31. Representación de la distribución de la carga de cada eje de un tren a lo largo de la vía, tomando como referencia el punto de aplicación de la carga. (Elaboración propia): .....	82
Figura 32. Distribución completa de las cargas transmitidas a la vía por un tren de la Serie 447 de Renfe, como referencia se ha tomado el primer eje de la composición. (Elaboración propia).....	83
Figura 33. Comparativa entre el descenso de una traviesa bajo la sollicitación estática de un tren de cercanías y bajo la sollicitación de un tren de mercancías. (Elaboración propia). ....	88
Figura 34. Evolución de la magnitud total del desplazamiento de las partículas de balasto bajo la carga de un tren de mercancías. (Elaboración propia). ....	89
Figura 35. Desplazamientos finales de las partículas para un tren de cercanías (Elaboración propia).	

Figura 36. Vista en una sección por el centro de la traviesa en alzado (arriba) y una vista en planta (abajo) de los desplazamientos verticales del balasto para un tren de mercancías. (Elaboración propia). .....	91
Figura 37. Corte longitudinal de la capa de balasto por $Y=0$ , que muestra los desplazamientos verticales de las partículas. (Elaboración propia).....	92
Figura 38. Vista en una sección por el centro de la traviesa en alzado (arriba) y una vista en planta (abajo) de los desplazamientos verticales del balasto para un tren de mercancías. (Elaboración propia). .....	93
Figura 39. Velocidad de las partículas de balasto en los instantes iniciales tras la aplicación de una carga estática de un tren de mercancías. (Elaboración propia).....	94
Figura 40. Velocidad de las partículas de balasto en los instantes iniciales tras la aplicación de una carga estática de un tren de mercancías. (Elaboración propia).....	95
Figura 41. Velocidades inducidas al inicio de la aplicación de la carga por eje de un tren de mercancías en una sección transversal por el eje de la vía (izquierda) y en una sección situada a un metro de eje (derecha). (Elaboración propia). .....	96
Figura 42. Distribución de los esfuerzos sobre la capa de balasto para la carga estática de un tren de mercancías. (Elaboración propia).....	97
Figura 43. Vista lateral de la distribución de esfuerzos en la capa de balasto causada por un tren de mercancías. (Elaboración propia).....	97
Figura 44. Vista frontal comparativa entre la fuerza normal transmitida entre partículas de balasto para un tren de mercancías (arriba) y un tren de mercancías (abajo). (Elaboración propia):	98
Figura 45. Vista lateral comparativa de la fuerza normal transmitida entre partículas de balasto para un tren de mercancías (arriba) y un tren de mercancías (abajo). (Elaboración propia). ....	99
Figura 46. Descenso de las distintas traviesas que componen un modelo con tres traviesas. La numeración de cada traviesa se corresponde con el orden de la misma en el sentido de avance de la marcha. (Elaboración propia).....	100
Figura 47. Vista frontal del desplazamiento en el eje vertical del balasto para cada una de las traviesas del modelo. (Elaboración propia).....	101
Figura 48. (Arriba) Vista lateral del desplazamiento en el eje vertical del balasto, sección por el eje de la vía y (Abajo) vista en planta del desplazamiento en el eje vertical del balasto. (Elaboración propia). .....	102
Figura 49. Vista frontal del desplazamiento en el eje transversal del balasto para cada una de las traviesas del modelo. (Elaboración propia). .....	103
Figura 50. Vista frontal de la distribución de esfuerzos en la capa de balasto para cada una de las traviesas del modelo. (Elaboración propia). .....	104
Figura 51. Vista lateral de la distribución de esfuerzos en el modelo de tres traviesas, sección por el eje de la vía. (Elaboración propia).....	104

Figura 52. Descenso de las distintas traviesas que componen un modelo con cinco traviesas. La numeración de cada traviesa se corresponde con el orden de la misma en el sentido de avance de la marcha. (Elaboración propia).....	106
Figura 53. Vista frontal del desplazamiento en el eje vertical del balasto para cada una de las traviesas del modelo. (Elaboración propia).....	107
Figura 54. (Arriba) Vista lateral del desplazamiento en el eje vertical del balasto, sección por el eje de la vía y (Abajo) vista en planta del desplazamiento en el eje vertical del balasto para el modelo de cinco traviesas. (Elaboración propia). ....	108
Figura 55. Vista frontal de la distribución de esfuerzos en la capa de balasto para cada una de las cinco traviesas del modelo. (Elaboración propia).....	109
Figura 56. Vista lateral de la distribución de esfuerzos en el modelo de cinco traviesas, sección por el eje de la vía. (Elaboración propia).....	109
Figura 57. Comparativa de la diferencia de cota entre el extremo más cargado y el menos cargado de la traviesa para cada una de las concentraciones de carga planteadas. (Elaboración propia).....	111
Figura 58. Desplazamiento vertical de las partículas de balasto bajo una carga diferencial del 20%. (Elaboración propia). ....	112
Figura 59. Comparativa entre las velocidades en la capa de balasto en entre una descompensación del 5% (arriba) y una descompensación del 20% (abajo). (Elaboración propia). ....	113
Figura 60. Comparativa entre los esfuerzos en la capa de balasto en las tres situaciones de desequilibrio planteadas. (Elaboración propia). ....	114
Figura 61. Descenso de la traviesa para la carga por eje de un tren de mercancías mayorada por el criterio de Eisenmann para el caso de distintas velocidades. (Elaboración propia). ....	116
Figura 62. Comparativa entre los asientos verticales de la capa de balasto sufridos por un tren de mercancías ante una carga estática (arriba) y ante una carga cuasiestática (abajo). (Elaboración propia). ....	117
Figura 63. Desplazamiento vertical de las partículas de balasto una vez se ha estabilizado el descenso de la traviesa para distintas velocidades de paso de un tren de mercancías. (Elaboración propia). ....	118
Figura 64. Comparativa entre las velocidades de las partículas de la capa de balasto inducidas por un tren de mercancías ante una carga estática (arriba) y ante una carga cuasiestática (abajo). (Elaboración propia). ....	119
Figura 65. Comparativa entre el principal esfuerzo de compresión en la capa de balasto producido por un tren de mercancías ante una carga estática (arriba) y ante una carga cuasiestática (abajo). (Elaboración propia). ....	120
Figura 66. Desplazamiento horizontal de la traviesa tras la aplicación de una carga lateral en la misma, simulando un ensayo STPT. (Elaboración propia). ....	121
Figura 67. Comparativa de los desplazamientos transversales de las piedras de balasto en el eje vertical para una carga lateral de 30 kN (arriba) y 35 kN (abajo). (Elaboración propia). ....	122

Figura 68. Comparativa de los desplazamientos transversales de las piedras de balasto en el eje vertical para una carga lateral de 30 kN (arriba) y 35 kN (abajo). (Elaboración propia).	123
Figura 69. Vista en planta de la magnitud del desplazamiento de las piedras de balasto en el eje Y (arriba) y en el eje Z (abajo). (Elaboración propia).	124
Figura 70. Vista en alzado (arriba) y planta (abajo) de las velocidades de las partículas de balasto al poco tiempo de aplicación de la carga lateral sobre la traviesa. (Elaboración propia).	125
Figura 71. Vista en alzado (arriba) y planta (abajo) de las velocidades de las partículas de balasto en un instante cercano a la estabilización del modelo tras la aplicación de carga lateral sobre la traviesa. (Elaboración propia).	126
Figura 72. Mayor esfuerzo de compresión soportado por las piedras de balasto en los instantes iniciales (arriba y centro) y al final del ensayo (abajo). (Elaboración propia).	127
Figura 73. Distintas etapas en el proceso de estabilización de la traviesa bajo una carga lateral de 30 kN, se puede apreciar como la fuerza normal entre partículas varía a lo largo del proceso. (Elaboración propia).	128
Figura 74. Paso sobre una traviesa de un solo eje con la carga correspondiente a un cercanías 447 a 120 km/h mayorada por Eisenmann. (Elaboración propia).	130
Figura 75. Descenso de una traviesa debido al paso de una composición de la Serie 447. (Elaboración propia).	131
Figura 76. Magnitud y dirección de los desplazamientos en la banqueta de balasto durante el incremento de carga sobre la traviesa. (Elaboración propia).	132
Figura 77. Magnitud y dirección de los desplazamientos en la banqueta de balasto durante el instante de mayor carga sobre la traviesa. (Elaboración propia).	132
Figura 78. Magnitud y dirección de los desplazamientos en la banqueta de balasto durante el descenso de carga sobre la traviesa. (Elaboración propia).	133
Figura 79. Magnitud y dirección de los desplazamientos en la banqueta de balasto una vez la traviesa se encuentra completamente descargada. (Elaboración propia).	134
Figura 80. Desplazamientos verticales de las piedras de balasto en el instante de mayor aplicación de la carga dinámica de un solo eje. (Elaboración propia).	134
Figura 81. Desplazamientos horizontales de las piedras de balasto en el instante de mayor aplicación de la carga dinámica de un solo eje. (Elaboración propia).	135
Figura 82. Componente vertical de los desplazamientos de las partículas tras el paso del primer bogie (arriba), tras el paso del tercer bogie (centro) y tras el paso del quinto bogie (abajo). (Elaboración propia).	136
Figura 83. Componente horizontal de los desplazamientos de las partículas tras el paso del primer bogie (arriba), tras el paso del tercer bogie (centro) y tras el paso del quinto bogie (abajo). (Elaboración propia).	136
Figura 84. Variación en las velocidades de las partículas de balasto durante el acercamiento del eje de un tren de cercanías. (Elaboración propia).	137

Figura 85. Detalle de las velocidades de las partículas en la hombrera derecha en el sentido de la marcha bajo la acción del primer eje del bogie (arriba), en el punto intermedio (centro) y bajo la acción del segundo eje del bogie (abajo). (Elaboración propia). .....	138
Figura 86. Esfuerzos de compresión en la banqueta de balasto bajo una sollicitación dinámica de un solo eje correspondiente a un tren de cercanías. (Elaboración propia).....	139
Figura 87. Comparativa entre los esfuerzos soportados por las partículas entre los dos ejes del primer bogie (arriba y centro) y el último eje de la composición (abajo). (Elaboración propia). 140	
Figura 88. Comparativa entre el descenso de traviesa de dos réplicas y el modelo original para una carga equivalente a un tren de mercancías. (Elaboración propia).....	141

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Principales trabajos sobre el balasto realizados empleando el Método de Elementos Discretos. (Elaboración propia). .....	20
Tabla 2.	Resumen de las ventajas y desventajas de los distintos tipos de forma para las partículas de balasto. Adaptada de (Ngamkhanong et al., 2017).....	21
Tabla 3.	Relación de las características que definen el modelo propuesto. (Elaboración propia) .	45
Tabla 4.	Principales parámetros que determinan el comportamiento mecánico del modelo. (Elaboración propia). .....	47
Tabla 5.	Descripción y resultados obtenidos para cada caso de carga. (Elaboración propia) .....	48
Tabla 6.	Características generales del tramo Silla – Valencia. (Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en la declaración sobre la red 2024 publicada por Adif).....	49
Tabla 7.	Curva granulométrica del balasto. (Adaptada de ET 03.360.004.0, Adif) .....	52
Tabla 8.	Circulaciones diarias de servicios de cercanías para un día laborable por el tramo Valencia – Silla. (Elaborada a partir de datos de <a href="http://www.renfe.es">www.renfe.es</a> ) .....	56
Tabla 9.	Principales características del material motor empleado en servicios de cercanías. (Elaboración propia a partir de los datos y figuras obtenidos de <a href="http://www.renfe.com">www.renfe.com</a> y <a href="http://www.listadotren.es">www.listadotren.es</a> ) .....	57
Tabla 10.	Circulaciones diarias de servicios de Media Distancia para un día laborable por el tramo Valencia – Silla. (Elaborada a partir de datos de <a href="http://www.renfe.es">www.renfe.es</a> ). .....	58
Tabla 11.	Principales características del material motor empleado en servicios de Media Distancia. (Elaboración propia a partir de los datos y figuras obtenidos de <a href="http://www.renfe.com">www.renfe.com</a> y <a href="http://www.listadotren.es">www.listadotren.es</a> ) .....	59
Tabla 12.	Circulaciones diarias de servicios de Larga Distancia para un día laborable en el tramo Valencia – Silla. (Elaborada a partir de datos de <a href="http://www.renfe.com">www.renfe.com</a> ). .....	60
Tabla 13.	Principales características del material motor empleado en servicios de Larga Distancia. (Elaboración propia a partir de los datos y figuras obtenidos de <a href="http://www.renfe.com">www.renfe.com</a> y <a href="http://www.listadotren.es">www.listadotren.es</a> ) .....	61
Tabla 14.	Material más común empleado por Renfe para el transporte de mercancías. (Elaboración propia a partir de los datos y figuras obtenidos de <a href="http://www.renfe.com">www.renfe.com</a> y <a href="http://www.listadotren.es">www.listadotren.es</a> ).....	63
Tabla 15.	Materiales definidos en el modelo y valores otorgados a sus principales características mecánicas. (Elaboración propia).....	74
Tabla 16.	Rigideces deducidas a partir de los ensayos de campo en traviesas situadas en plena vía. (Elaboración propia). .....	85
Tabla 17.	Rigideces del modelo numérico ante distintos tipos de carga. (Elaboración propia).....	86
Tabla 18.	Casos de carga ejecutados bajo sollicitación estática. (Elaboración propia). .....	87



Tabla 19. Valores de las cargas aplicadas sobre la traviesa, la carga Q1 se aplica sobre la posición del carril izquierdo en el sentido de la marcha, mientras que la carga Q2 se aplica sobre el derecho. (Elaboración propia). .....	110
Tabla 20. Casos de carga considerados para la aplicación de la carga cuasiestática. (Elaboración propia).....	115

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

En la actualidad, el ferrocarril juega un papel fundamental en las redes de transporte de pasajeros y mercancías de muchos países del mundo. Por otra parte, el transporte ferroviario está considerado como un modo de movilidad sostenible, por lo que se están desarrollando políticas y actuaciones para fomentar su uso. Tal es el caso de España, donde el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana ha puesto en marcha la iniciativa Mercancías 30, que busca elevar la cuota modal del transporte ferroviario de mercancías hasta el 10% para el año 2030.

El incremento en la demanda se une al aumento de las velocidades de circulación y de las cargas por eje que debe soportar la infraestructura ferroviaria, dando lugar a solicitudes más exigentes sobre los componentes que conforman la vía ferroviaria. Actualmente, la mayor parte de las vías de ferrocarril en el mundo posee una capa de balasto que cumple las siguientes funciones (Adif):

- Amortigua y reparte las cargas transmitidas al paso de los trenes asegurando la estabilidad del conjunto traviesa-carril.
- Posibilita el drenaje de las aguas de lluvia.
- Aísla la explanación de los efectos de las heladas.
- Permite las operaciones de alineación y nivelación de la vía.

El deterioro de la capa de balasto debido a los efectos provocados por la circulación del material rodante puede causar asentamientos y desalineaciones en la vía que pueden resultar peligrosas. Por tanto, resulta fundamental una adecuada planificación de los trabajos de mantenimiento en la capa de balasto. Ante esta situación, surge la necesidad de mejorar la comprensión del comportamiento de la capa de balasto ante las cargas verticales y horizontales que lo solicitan.

El balasto se caracteriza por ser un material discontinuo y heterogéneo por lo que para analizar su comportamiento se hace necesario acudir al Método de Elementos Discretos, conocido comúnmente como DEM por sus siglas en inglés. Este método es muy eficaz para el cálculo de problemas de ingeniería que implican materiales granulares, permitiendo en este caso particular conocer el comportamiento mecánico del balasto.

## 1.2 ALCANCE

A lo largo del presente documento se desarrollará un modelo del comportamiento de la capa de balasto ferroviaria empleando el Método de Elementos Discretos, calibrando sus parámetros y validándolo para la representación del comportamiento del mismo. Una vez calibradas las propiedades del modelo se realizarán casos de carga real teniendo en cuenta las características del tramo ferroviario convencional entre Valencia y Silla. Estos cálculos permitirán probar las posibilidades de la herramienta y determinar sus limitaciones. La herramienta desarrollada permitirá ofrecer apoyo al técnico encargado de tomar decisiones relativas a la construcción y mantenimiento de infraestructuras ferroviarias.

## 1.3 OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es el desarrollo de un modelo de comportamiento de la capa de balasto de una vía ferroviaria que permita predecir su comportamiento ante el paso del material rodante, estudiando el caso particular del tramo ferroviario en vía convencional entre Valencia y Silla.

La consecución del objetivo principal está ligada a la consecución de los siguientes objetivos parciales:

- Desarrollar un modelo del comportamiento del balasto bajo travesía.
- Validar el comportamiento del modelo para la representación del balasto ferroviario.
- Aplicar el modelo al tramo ferroviario entre Valencia y Silla.
- Establecer las limitaciones de la herramienta.

Se espera que los resultados de este trabajo sirvan como fundamento para el desarrollo de modelos de comportamiento más complejos que reflejen de forma fidedigna las condiciones a las que se encuentra sometida la vía.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL BALASTO

#### 2.1.1 Método de Elementos Finitos (FEM)

Los modelos de elementos finitos se han empleado de forma popular para realizar simulaciones a gran escala del comportamiento macroscópico de una vía de ferrocarril, englobando a todos sus componentes y permitiendo realizar simulaciones de largo plazo, obteniendo resultados satisfactorios a la vez que mantiene un tiempo de computación razonable (Abdelkrim et al., 2003; Gallego et al., 2011; Suiker & De Borst, 2003).

Por tanto, en el caso del balasto, el enfoque mediante métodos continuos permite obtener las curvas tensión-deformación de este, pero no permite obtener información detallada sobre las partículas de balasto, su rotura o discontinuidades locales. Como añadido, la mayoría de los métodos tradicionales basados en el análisis continuo no permiten simular los asientos de la vía de manera satisfactoria. El balasto es un material eminentemente discontinuo por lo que se necesitan otras técnicas de modelado para su estudio (Ngamkhanong et al., 2017).

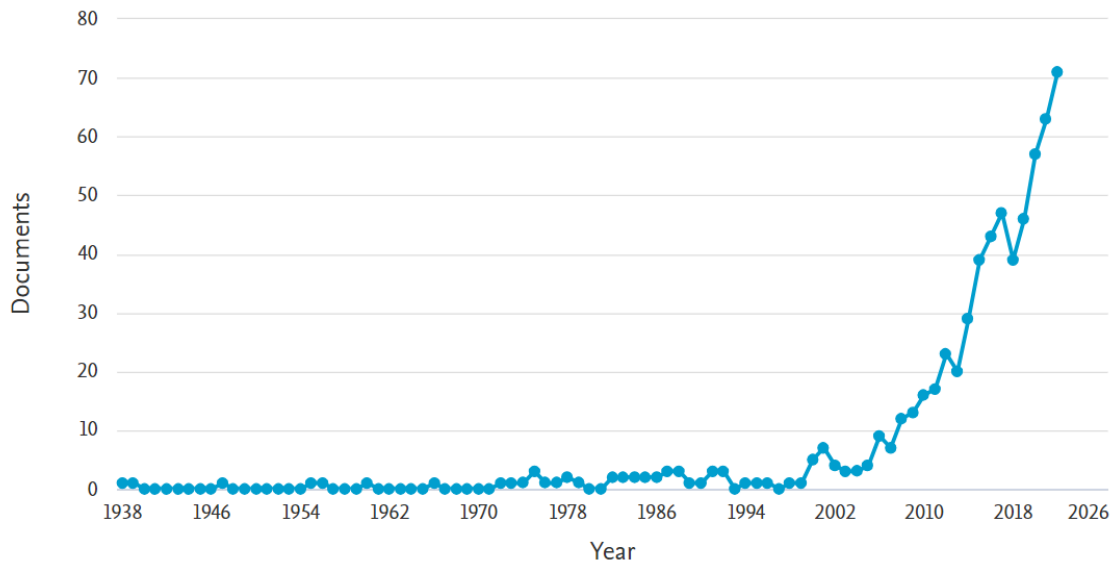
#### 2.1.2 Método de Elementos Discretos (DEM)

El Método de Elementos Discretos, conocido como DEM por sus siglas en inglés, es la alternativa al Método de Elementos Finitos para modelizar el comportamiento de los materiales granulares, entre los que se encuentra el balasto. Este método resulta ideal para estudiar el comportamiento microscópico y macroscópico de los materiales discontinuos, pues para cada partícula se computa de forma independiente su desplazamiento, velocidad, aceleración y fuerzas actuantes sobre la misma (Alabbasi & Hussein, 2021). El principal problema que presenta este método es el elevado tiempo de cálculo necesario, consecuencia directa de computar cada partícula del modelo de forma independiente.

En 1979 se introduce el Método de Elementos Discretos en (Cundall & Strack, 1979) para modelizar el comportamiento de empaquetamientos de material granular en dos dimensiones. Más tarde, en 1992, se sientan los principios básicos del método en (Cundall & Hart, 1992) profundizando en la representación de los contactos, la representación de los materiales y el algoritmo seguido para detectar y determinar los

contactos. Desde entonces el Método de Elementos Discretos ha ganado popularidad con el paso de los años para modelizar materiales como el balasto de las vías de ferrocarril. La *Figura 1* muestra como las publicaciones anuales relacionadas con el Método de Elementos Discretos y el balasto han aumentado de forma exponencial desde la década de los 2000.

Documents by year



*Figura 1. Número de publicaciones anuales relacionadas con el modelado del balasto empleando el Método de Elementos Discretos. (Obtenido de la base de datos Scopus mediante la búsqueda: TITLE-ABS-KEY ( ( ballast OR railroad OR ballasted ) AND ( dem OR "discrete element method" OR "distinct element method" ) )*

En la *Tabla 1* se ofrece un resumen de los principales modelos encontrados en la literatura que modelizan el comportamiento del balasto empleando el Método de Elementos Discretos. Es posible observar, cómo debido a las limitaciones de cálculo, la mayoría de los modelos se realizan sobre ensayos a pequeña escala.

Tabla 1. Principales trabajos sobre el balasto realizados empleando el Método de Elementos Discretos.  
(Elaboración propia).

MODELO	REFERENCIAS
Ensayos biaxiales en 2D	(Indraratna et al., 2010)
Ensayos de corte directo	(Danesh et al., 2020; Suhr & Six, 2017)
Ensayos triaxiales	(Ahmed et al., 2016; Harkness et al., 2016; Tolomeo & McDowell, 2022)
Ensayo edométrico	(Eliáš, 2014, 2013; Lim & McDowell, 2005; Suhr & Six, 2017)
Modelos de balasto bajo traviesa	(Laryea et al., 2014; Lim & McDowell, 2005; Lu & McDowell, 2006; Zhang et al., 2017)
Modelos de balasto bajo múltiples traviesas	<i>Irazábal González, 2017; Lobo-Guerrero &amp; Vallejo, 2006</i>

## 2.2 FORMA DE LAS PARTÍCULAS DE BALASTO

El modelado de la forma geométrica de las partículas de balasto dentro de las simulaciones de elementos discretos supone un desafío considerable y es uno de los aspectos más abordados en la literatura (Coetzee, 2016; Danesh et al., 2020; Ferrellec & McDowell, 2010; Suhr & Six, 2020; Tolomeo & McDowell, 2022). La razón por la que se le otorga tanta importancia a la forma de las piedras de balasto es la gran influencia que ésta puede tener en el comportamiento grupal del mismo, pues la presencia de bordes angulosos y formas no convexas favorecen la trabazón entre partículas (Suhr & Six, 2020)

La forma de las partículas dentro de la simulación no sólo influye significativamente en el comportamiento mecánico global del conjunto. En las simulaciones del Método de Elementos Discretos, la detección de los contactos entre las distintas partículas que conforman un empaquetamiento es uno de los pilares básicos del cálculo. Es por ello que las geometrías sencillas, como las esferas, requieren de menor tiempo de

computación al ser la detección de contactos entre ellas mucho más simple que en geometrías más complejas como los poliedros.

A continuación, se procederá a describir con más detalle las características que presentan los distintos tipos de geometrías. En la *Tabla 2* se ofrece un resumen comparativo de los distintos tipos de forma existentes en la literatura que permiten simular las partículas de balasto.

*Tabla 2. Resumen de las ventajas y desventajas de los distintos tipos de forma para las partículas de balasto. Adaptada de (Ngamkhanong et al., 2017)*

	ESFERAS O DISCOS	CÚMULOS DE ESFERAS	POLIEDROS	PARTICULAS POTENCIALES
<b>FORMA</b>	Regular, poco realista	Irregular, realista, posibilidad de formas cóncavas	Irregular, muy realista	Irregular, muy realista
<b>ENCAJE ENTRE PARTICULAS</b>	Muy débil	Fuerte	Fuerte	Fuerte
<b>TIEMPO DE COMPUTACIÓN</b>	Bajo	Medio	Muy alto	Alto
<b>LIMITACIONES</b>	Comportamiento poco realista	Se requieren muchas esferas para obtener formas realistas	Difícil determinar contactos	Se requiere la existencia de la función que la define y sus derivadas

### 2.2.1 Esferas o discos

Las esferas han sido ampliamente empleadas dentro de los Modelos de Elementos Discretos tridimensionales para simular todo tipo de partículas debido a su simplicidad. Se trata de la representación más sencilla posible para el balasto en un modelo de tres dimensiones y la más eficiente computacionalmente debido a la facilidad para identificar los contactos entre partículas. Por su parte, los discos o partículas circulares no son más

que la simplificación de una esfera para el caso bidimensional, por lo que presentan las mismas ventajas e inconvenientes.

Este tipo de formas configuran una representación de las piedras de balasto muy alejada de la realidad, puesto que el balasto no es redondeado, sino que presenta bordes angulosos, caras planas y zonas no convexas. Por ello, a pesar de que las esferas han sido muy populares en los modelos de Elementos Discretos, en el caso del balasto su empleo ha resultado mucho más limitado por estos motivos.

La mayoría de las publicaciones existentes en la literatura relativas al modelado del balasto empleando esferas (Coetzee, 2016; Lim & McDowell, 2005; Lu & McDowell, 2006) recurren a comparaciones entre un modelo a base de esferas y otro modelo que emplea algún tipo de construcción geométrica más fiel a la realidad. En todos estos trabajos el resultado obtenido por las esferas en todo tipo de ensayos era considerablemente peor al obtenido por cúmulos de esferas, presumiblemente por la incapacidad de las esferas para desarrollar trabazón entre partículas.

Pese a las limitaciones, no se debe despreciar el uso de esferas debido a su potencial para realizar simulaciones a gran escala, como se demuestra en (Irazábal González, 2017) donde se modeliza el paso de un tren tipo sobre una capa de balasto que soporta diez traviesas. Previamente el modelo de balasto se había validado mediante comparaciones con ensayos, como el ensayo de desplazamiento lateral de una traviesa. El modelo permitió estudiar el comportamiento de las piedras de balasto ante el paso de trenes de alta velocidad (ver *Figura 2*), así como simular situaciones de falta de mantenimiento para estudiar los efectos adversos provocados.



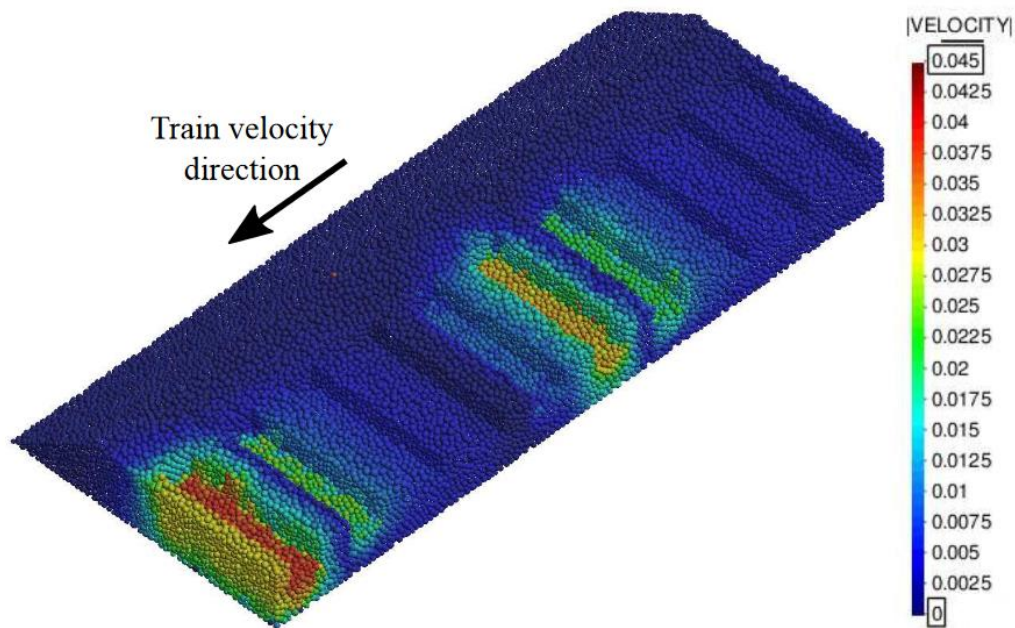


Figura 2. Velocidad de las esferas que simulan las partículas de balasto al paso de un tren. (Irazábal González, 2017)

Para que un modelo que emplea esferas pueda representar de forma satisfactoria la realidad se hace necesario incluir en el mismo la denominada “Resistencia a la rodadura”, tratada en (Aboul Hossn et al., 2017; Jiang et al., 2005; Kozicki & Tejchman, 2011) y para la que los autores del modelo mencionado desarrollaron un modelo propio en (Irazábal et al., 2017). Esta resistencia se aplica a las partículas esféricas como un momento de origen artificial que trata de reducir la rotación de la partícula en el sentido de desplazamiento de la misma. De esta forma, manteniendo un bajo tiempo de cálculo, se puede realizar una aproximación al comportamiento que tendría una partícula irregular al rodar.

### 2.2.2 Cúmulos de esferas

Como respuesta a la necesidad de representar formas complejas de partículas en las simulaciones de elementos discretos, pero manteniendo los tiempos de cálculo dentro de límites razonables, surgen los cúmulos de esferas. Tal como su nombre indica, se trata de esferas unidas entre sí, con o sin solapes entre ellas, que trabajan de forma conjunta (Figura 3). Dentro de un cúmulo de esferas la posición relativa entre ellas permanece invariante, por lo que en esencia el cúmulo se comporta como una única partícula rígida. La detección de contactos entre partículas se realiza de forma individual

para cada esfera del cúmulo, ignorando los que se producen dentro de su mismo cúmulo, manteniendo así la simplicidad y la velocidad de cálculo.

Las fuerzas actuantes y el momento de inercia se calculan con respecto al centro de masas del cúmulo. Cuando hay solapes entre los componentes del cúmulo se deben corregir la masa y la inercia, para ello se han propuesto algunas soluciones (Ferrellec & McDowell, 2010; García et al., 2009)

Los cúmulos de esferas permiten simular la irregularidad y concavidades de las partículas de balasto a la vez que ofrecen un gran potencial de trabazón entre partículas. Sin embargo, no presentan bordes angulosos y las partículas de balasto creadas por este método presentan formas bulbosas que no se encuentran en las piedras reales de balasto. Como añadido, cuanto más se quiere aproximar la forma de las partículas a la real mayor será el número de partículas necesarias, por lo que el tiempo de cálculo aumentará y menor será el tamaño de las simulaciones que se podrán abordar.

La sencillez de estas partículas combinada con sus buenos resultados en simulaciones ha propiciado que la modelización de partículas de balasto empleado cúmulos de esferas se haya tratado ampliamente en la literatura. Esto ha ocasionado que existan multitud de opciones y muy diversas, desde aquellas más simples en las que solamente se plantean cúmulos de dos esferas (Suhr & Six, 2017), hasta algunas en las que se emplean gran cantidad de esferas para crear un modelo muy cercano a la realidad (Laryea et al., 2014).

En (Suhr & Six, 2020) se propone la creación de cúmulos simples, compuestos únicamente por tres esferas, pero que permita alcanzar las porosidades observadas en ensayos de campo y de laboratorio y que puedan ser empleados para realizar simulaciones de elementos discretos de forma eficiente. Se considera que tres esferas es el número mínimo de partículas que permiten evitar las rotaciones libres en los tres ejes. La clave de este trabajo es la renuncia a la idea de conseguir una aproximación visual de la forma de las piedras de balasto, lo que según los autores normalmente lleva a recurrir a gran cantidad de esferas que repercuten negativamente en el tiempo de cálculo.

La solución planteada se basa en aproximar los principales descriptores de la forma de piedras de balasto reales analizadas en un trabajo previo de los autores (Suhr et al.,

2020). Para ello se escogen los siguientes descriptores de la forma de las partículas: la elongación,  $e$ , índice de lajas o flatness,  $f$ , esfericidad,  $\psi$ , y el índice de convexidad,  $c$  y se construyen distintas colecciones de cúmulos que pretenden aproximar los valores de estos descriptores.

Se crean tres colecciones distintas de cúmulos de esferas con distintos valores de solape entre ellas y distintas relaciones de radios. La correlación obtenida entre los descriptores de forma en las piedras reales y en las creadas se puede comparar en la *Figura 3*. Se puede observar que por lo general existe una buena correlación excepto para aquellas piedras de balasto que son más alargadas y no quedan correctamente representadas por los cúmulos de esferas propuestos.

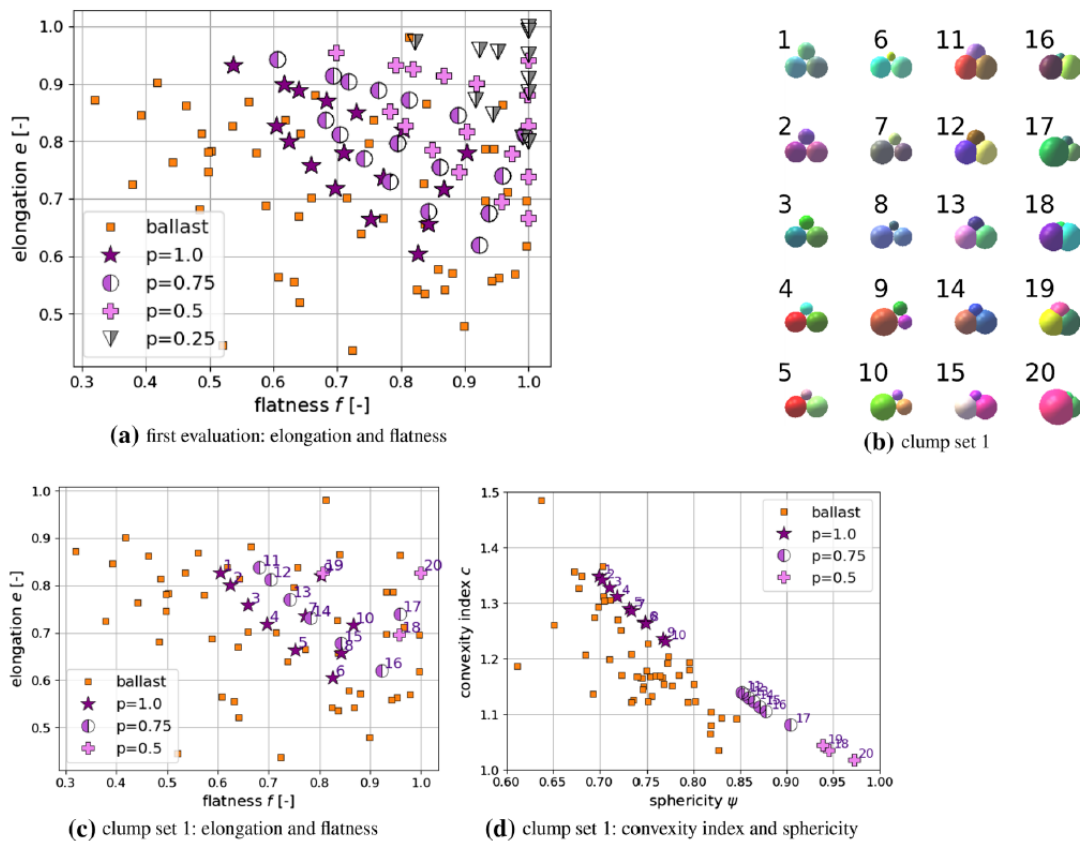


Figura 3. Muestra del primer set de cúmulos propuesto y su correlación con los principales descriptores de forma. El valor  $p$  indica el solape entre partículas de un mismo cúmulo (Suh & Six, 2020).

Los resultados obtenidos muestran como los cúmulos de esferas propuestos han logrado alcanzar porosidades cercanas a los valores de referencia medidos en ensayos. Los autores del estudio consideran que el set de cúmulos puede ser empleado en otro

tipo de simulaciones de elementos discretos para lograr modelos computacionalmente más eficientes manteniendo la capacidad de representar el comportamiento real del balasto.

Son muchos los trabajos (Balamonica et al., 2023; Ferellec & McDowell, 2010; Tolomeo & McDowell, 2022; Zhang et al., 2017) en los que se sigue una aproximación completamente opuesta a la hora de generar las partículas de balasto. En estos estudios se trabaja bajo la premisa de lograr aproximar lo máximo posible la forma de los cúmulos de esferas a la forma real de las piedras de balasto. El enfoque más común consiste en realizar un escaneo 3D de una o varias muestras de piedras de balasto reales obteniendo una nube de puntos tridimensional para posteriormente crear una superficie cerrada que puede rellenarse con esferas. En la *Figura 4* se muestra un diagrama del flujo de trabajo usual de estos métodos.

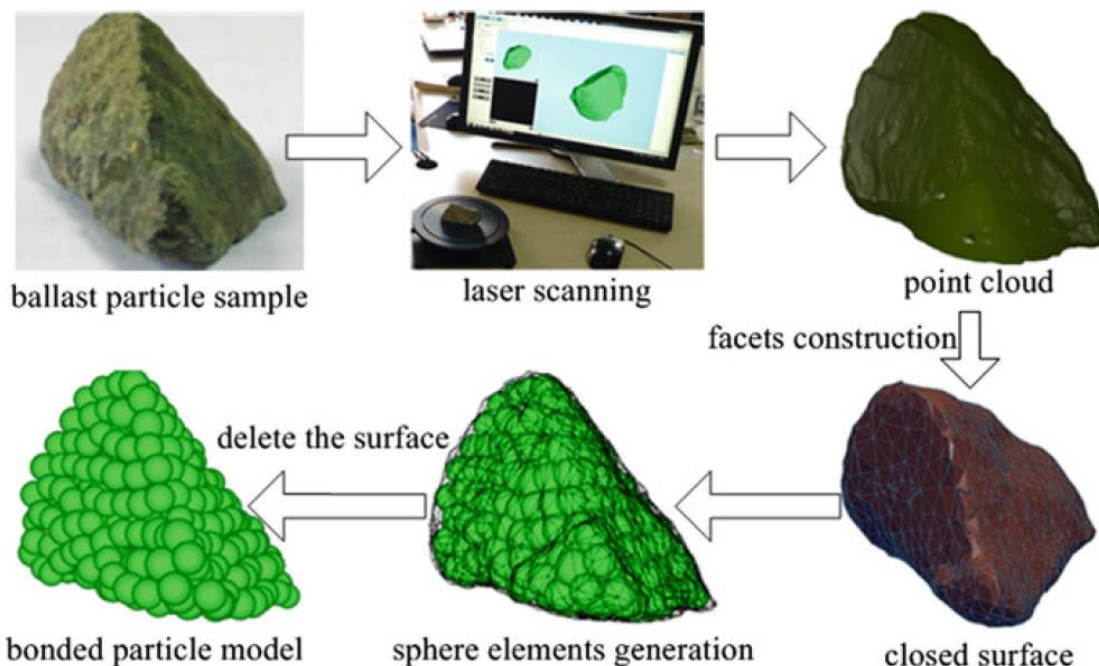


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de creación de los cúmulos de esferas (Zhang et al., 2017).

Existen algunos estudios en los que se comparan los resultados obtenidos con cúmulos de esferas simples, únicamente con dos esferas, con modelos complejos creados a partir del escaneo 3D de piedras reales de balasto. Los resultados obtenidos en (Laryea et al., 2014) muestran cómo se obtuvieron resultados de asiento de la traviesa del mismo orden de magnitud con el modelo realista y con el simplificado. En (Coetzee, 2016) se emplean modelos compuestos por dos, cuatro y ocho esferas para cada una

de las piedras de balasto que se pretenden simular. Los resultados obtenidos muestran que el desempeño en los ensayos de compresión y corte directo son comparables a la realidad para todos los tipos de cúmulos, aunque las agrupaciones mayores de cuatro esferas aproximaban el resultado con mayor precisión.

### 2.2.3 Poliedros

Los poliedros se presentan como la alternativa a las soluciones que pretenden modelizar el balasto mediante partículas esféricas aisladas o agrupadas. Resultan adecuados para representar las piedras de balasto debido a la presencia de caras planas y aristas, creando bordes angulosos con potencial de propiciar la trabazón entre partículas. Sin embargo, los poliedros deben limitarse a representar geometrías convexas pues por el contrario se podría dar el caso en el que una partícula entre en contacto con otra en dos puntos simultáneamente. La mayor limitación de los poliedros es la elevada complejidad para detectar los contactos entre partículas, lo que propicia que el tiempo de computación aumente considerablemente y su uso para modelos a gran escala se encuentre limitado.

Los poliedros se han empleado para simular las piedras de balasto en algunos trabajos, como en (Eliáš, 2013), donde se genera una muestra de balasto a partir de poliedros creados por teselación aplicando el concepto de los diagramas de Voronoi (Figura 5). El volumen, el centroide y la inercia de cada partícula se calculan dividiendo el poliedro en tetraedros y calculando la contribución de cada uno a los valores previstos a través de las fórmulas propuestas por (Tonon, 2004).

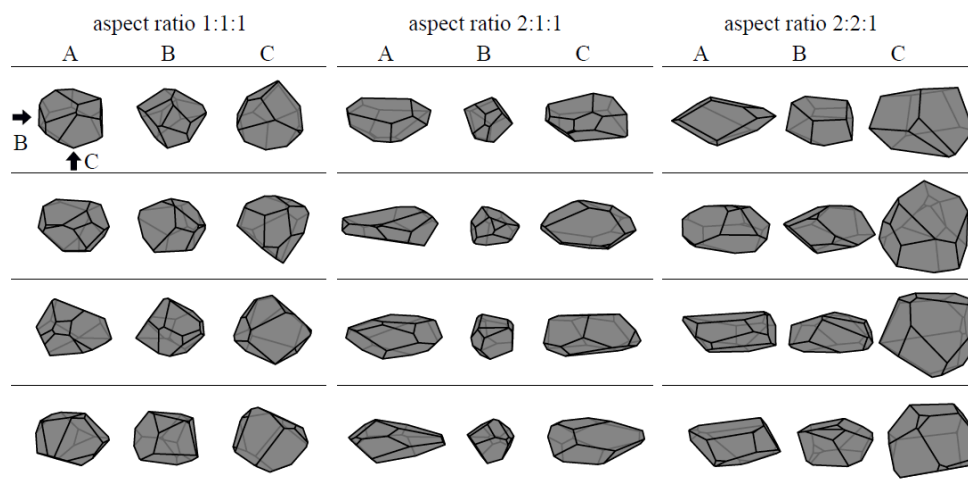


Figura 5. Piedras de balasto generadas aleatoriamente por teselación de Voronoi. Para cada poliedro se muestran las vistas frontal (A), lateral (B) e inferior (C). (Eliáš, 2013).

La muestra creada posteriormente es sometida a un ensayo edométrico en un cilindro de acero de 300 mm de diámetro y 150 mm de profundidad, empleando partículas de balasto entre 37,5 – 50 mm. Los resultados obtenidos coinciden con los resultados experimentales excepto en la parte inicial, pues no se simuló la vibración de las partículas.

En (Tolomeo & McDowell, 2022) se comparan las diferencias entre la modelización de partículas de balasto mediante esferas agrupadas y mediante poliedros. Se demuestra como en los ensayos empleando poliedros, al estar limitados a ser formas convexas, se subestima la resistencia al esfuerzo cortante. Esto lleva a pensar que las concavidades en las piedras de balasto, presentes en las partículas creadas mediante esferas agrupadas, juegan un papel crucial en el comportamiento mecánico de las partículas granulares. Según los autores, esto es debido a que la concavidad permite la existencia de más de un punto de contacto entre dos cuerpos permitiendo configuraciones más estables a la vez que se incrementa la resistencia rotacional.

#### 2.2.4 Partículas potenciales

Las partículas potenciales toman la forma de un poliedro redondeado convexo (*Figura 6*), suponiendo una alternativa para la creación de partículas no esféricas en las simulaciones de elementos discretos. El concepto de partícula potencial fue inicialmente planteado para el caso bidimensional en (Houlsby, 2009) y posteriormente ampliado a las tres dimensiones del espacio en (Boon et al., 2013).

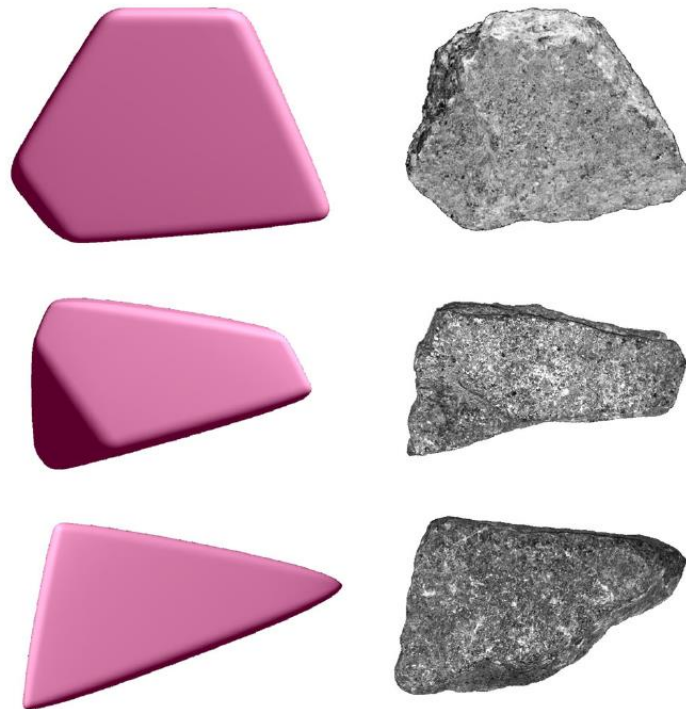


Figura 6. Ejemplo de partícula potencial aproximando la forma de piedras reales de balasto (Ahmed et al., 2016)

El objetivo de este tipo de partículas es posibilitar la creación de formas complejas, siempre y cuando sean convexas para evitar la posibilidad de contactos múltiples, que permitan tener en cuenta los efectos de la forma de las partículas en el comportamiento de los medios granulares, como es el caso del balasto. La principal ventaja de esta tipología de partículas frente a los poliedros es la reducción en el tiempo de cálculo debido a la mayor simplicidad en la detección de los contactos entre las distintas partículas.

Las partículas potenciales se definen a partir de una función en un sistema de coordenadas locales que conforma la superficie que delimita la partícula. Como añadido, no solo debe existir la función para cada punto del espacio, sino también su primera y segunda derivada. Los contactos entre las distintas partículas se abordan como un problema de optimización resuelto en dos dimensiones mediante el método de Newton-Raphson. Para la extensión a tres dimensiones propuesta por Boon et al., 2013 se reformuló el problema para resolverlo mediante optimización cónica.

En (Ahmed et al., 2016) se desarrolla una técnica para simular ensayos triaxiales en muestras de balasto para posteriormente validarlo con datos de ensayos reales. Para simular la forma de las partículas de balasto se emplearon partículas potenciales creadas manualmente con un programa diseñado “in-situ” para tal efecto, de esta forma se pudo constituir una librería de partículas similares a las piedras de balasto reales (ver *Figura 6*). Se comprobó que los principales parámetros de forma del balasto eran razonablemente similares entre el modelo y la realidad.

En (Harkness et al., 2016) se empleó con éxito el modelo de ensayo triaxial para balasto propuesto en (Ahmed et al., 2016) para modelizar el efecto de la presión de la célula triaxial en los ensayos, mostrando los resultados una excelente correlación con los ensayos de laboratorio.

### 2.3 MODELOS DE CONTACTO

En esta sección se presentan los principales modelos de contacto utilizados dentro del Método de Elementos Discretos para simular el comportamiento del balasto.

El modelo de contacto es un componente fundamental del Método de Elementos Discretos, ya que tiene como función determinar el comportamiento de dos elementos que entran en contacto entre sí. Gran parte del tiempo de cálculo empleado en las simulaciones se dedica a la determinación y cuantificación de los contactos entre partículas, por lo que el modelo de contacto elegido tiene un gran peso sobre el rendimiento de la simulación. Se ha observado que entorno al 80 % del tiempo de computación de una simulación se emplea en la detección de los contactos entre partículas (Ngamkhanong et al., 2017).

Existen dos grandes enfoques en los modelos de contacto para partículas granulares: la aproximación mediante “*partículas duras*” y la aproximación mediante “*partículas blandas*” (Di Renzo & Di Maio, 2004). En el primer caso las colisiones entre partículas se modelizan como eventos instantáneos, por lo que no se tiene en cuenta la deformación de las partículas y no se pueden tener en cuenta acciones a largo plazo por lo que no ha sido empleado para simular el balasto a pesar de ser computacionalmente más eficiente. En el caso del balasto han sido comúnmente empleados los modelos de contactos basados en el enfoque de “*partículas blandas*” que permiten la inclusión de fuerzas entre partículas de larga duración a expensas de un mayor tiempo de computación. En este tipo de modelos la deformación de las partículas



se tiene en cuenta permitiendo que las partículas en contacto tengan un cierto solape, por lo que los contactos en lugar de ser puntuales tienen lugar en un plano sobre el que actúan fuerzas normales y tangenciales.

En la práctica, el modelo de contacto depende de la forma de las partículas que se vayan a emplear, por lo que para cada tipo de partícula se ha desarrollado un modelo de contacto particular. Debido a la versatilidad, sencillez y gran aceptación del uso de esferas, la mayoría de los modelos de contacto desarrollados para el Método de Elementos Discretos son aplicables a partículas esféricas o circulares, dejando en segundo plano aquellos para partículas no esféricas, que también resultan más complejos.

### 2.3.1 Modelos para partículas esféricas o circulares

La mayoría de los modelos diseñados para partículas esféricas emplean sistemas de resortes y amortiguadores (Zhu et al., 2007). Existen multitud de modelos disponibles para determinar el contacto entre esferas (Mishra, 2003), pero los más empleados en la práctica al tratar modelos de las piedras de balasto son el elástico lineal desarrollado por Cundall (Cundall & Strack, 1979) y el modelo elástico no lineal, Hertz – Mindlin, desarrollado a partir de (Hertz, 1882; Mindlin & Deresiewicz, 1953).

El modelo elástico lineal originalmente propuesto en (Cundall & Strack, 1979) para simulaciones en dos dimensiones, es el modelo elástico más simple empleado en las simulaciones de Elementos Discretos. Se basa en la teoría clásica de la elasticidad de Hooke, definiendo rigideces para los contactos normal y tangencial que relacionan la deformación de la partícula con la fuerza a la que se encuentra sometida la misma mediante combinaciones en serie o en paralelo de resortes y amortiguadores.

Existen modelos de contacto elásticos no lineales para esferas basados en la teoría clásica de Hertz (Hertz, 1882), para el contacto en la dirección normal y en la solución propuesta en (Mindlin & Deresiewicz, 1953) para el contacto tangencial. Debido a que la solución conjunta para los contactos normal y tangencial, generalmente conocida como *Hertz – Mindlin* o *HM*, es muy compleja y costosa de implementar en los códigos de Elementos Discretos se han desarrollado algunas simplificaciones al mismo. La simplificación con un uso más generalizado en la simulación de las partículas de balasto es la empleada en (Tsuji et al., 1992). Dicha simplificación se basa en considerar que en los contactos tangenciales no existe deslizamiento entre las partículas.

Existen otras modificaciones realizadas sobre el modelo no lineal, como el denominado “*Conical damage model*” propuesto en (Harkness et al., 2016). Este modelo introduce dos nuevos parámetros que permiten modelizar con mayor precisión el comportamiento del balasto bajo condiciones de confinamiento, principalmente como respuesta a las inconsistencias observadas en los resultados de algunos ensayos triaxiales. Este modelo ha sido empleado en (Suhr & Six, 2017) para parametrizar una simulación en la que una muestra de piedras de balasto ofreciera resultados satisfactorios en ensayos edométricos y de corte directo al mismo tiempo.

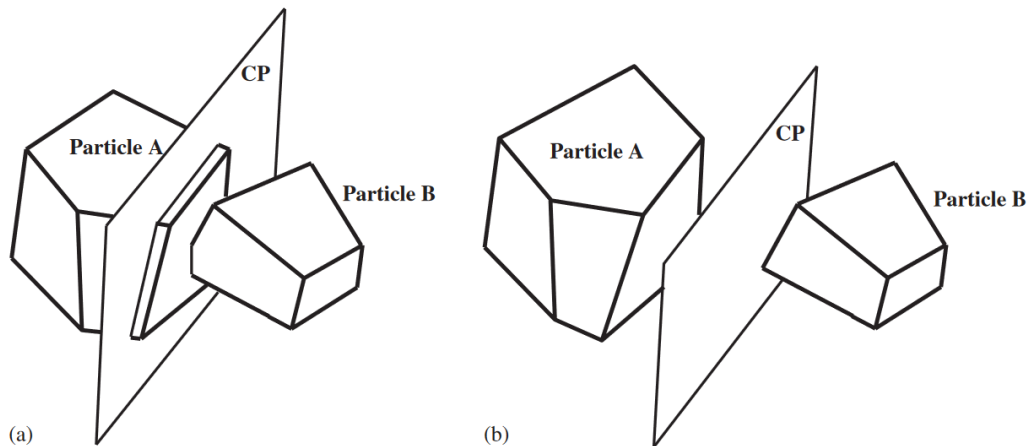
La comparación entre el desempeño de los modelos de contacto más comunes se realiza en (Di Renzo & Di Maio, 2004). En este trabajo los autores comparan tres modelos mecánicos para la simulación de colisiones elásticas entre partículas: el modelo lineal propuesto por Cundall, el modelo no lineal de Hertz – Mindlin simplificado para la solución de no deslizamiento y un modelo no lineal completo con histéresis basado en la teoría de Hertz – Mindlin. Se compararon las soluciones obtenidas microscópicamente con los resultados analíticos y macroscópicamente con los datos experimentales. Los resultados mostraron que el modelo lineal concordaba excepcionalmente con la realidad, mientras que los modelos no lineales apenas lograban mejoras significativas en el comportamiento de las partículas. Sin embargo, los autores apuntan a que esta similitud sólo se mantiene si los parámetros del modelo elástico son evaluados con precisión. Para el caso de formas esféricas de las partículas y análisis profundos del movimiento de las partículas se recomiendan los modelos no lineales. La comparación llevó a los autores a proponer una modificación del modelo Hertz – Mindlin simplificado en (Di Renzo & Di Maio, 2005). Los autores sugieren una modificación del modelo de contacto tangencial que muestra resultados más realistas que el modelo tradicional.

### 2.3.2 Modelos para partículas no esféricas

La determinación de los contactos entre partículas no esféricas, como los poliedros, supone un desafío considerable lo que hace que este tipo de modelos tiendan a ser más complejos y a consumir mayor tiempo de computación que los empleados en el caso de las esferas.

Cundall propone en su trabajo (Cundall, 1988) el denominado método del plano común para determinar los contactos entre poliedros. El planteamiento del método consiste en dividir el espacio entre dos partículas por un plano bisector, por lo que dos partículas

estarán en contacto si ambas intersecan el plano común (*Figura 7a*). Si las partículas no se encuentran en contacto ninguna intersecará con el plano bisector (*Figura 7b*). Este método ha sido mejorado por otros autores logrando una determinación rápida del plano bisector (Nezami et al., 2004, 2006), que permite reducir de forma dramática el número de iteraciones necesarias para encontrar el plano común, redundando en una mejora del tiempo de cálculo.



*Figura 7. Representación del plano común (CP) entre dos partículas: (a) partículas en contacto y (b) partículas que no intersecan el plano y por lo tanto no se encuentran en contacto. (Nezami et al., 2006)*

En (Eliáš, 2013) el autor desarrolla otro modelo de contacto entre poliedros basado en la creación de “cajas” que contengan en su interior todo el volumen de los poliedros. Se establece que los poliedros solamente se intersecarán si y sólo si las “cajas” de contorno se solapan en todos los tres ejes del espacio, pero esta condición es necesaria pero no suficiente. Tras la determinación de los candidatos de contacto entre partículas se procede a la determinación de un plano que permita separar ambas partículas, si este plano no existe entonces los poliedros estarán en contacto.

Una solución alternativa y muy relacionada con el concepto de partículas potenciales se propone en (Boon et al., 2012) planteando la detección de contactos entre poliedros desde el punto de vista de un problema de optimización. El algoritmo consta de dos fases: la primera para detectar los contactos y la segunda para calcular el punto de contacto. En la primera fase se resuelven una serie de desigualdades lineales que permiten determinar un área de contacto entre partículas, en el caso de que exista intersección entre partículas el punto de contacto se determina como el centro analítico de las desigualdades. Una vez que se ha determinado el punto de contacto, la normal

se puede calcular a partir de la definición de una partícula potencial en el interior del poliedro.

## 2.4 ROTURA DEL BALASTO

El paso de los trenes sobre las infraestructuras ferroviarias somete a la capa de balasto a cargas cíclicas y vibraciones de distintas frecuencias. Como resultado de estas cargas, se produce la rotura y fragmentación de las piedras de balasto, a parte de otros efectos como el derrame lateral del balasto. La rotura del balasto es la principal causa de la contaminación del balasto, derivando en mayores asentamientos de la vía y en posibles desestabilizaciones del emparrillado a lo largo de la vida útil de la infraestructura, que pueden afectar a la seguridad y estabilidad de las circulaciones ferroviarias.

Por todo esto, se han llevado a cabo estudios que modelan la rotura de las piedras de balasto aprovechando las posibilidades que ofrece el Método de Elementos Discretos y en los que se ha llegado a la conclusión de que, en las simulaciones, la rotura de las partículas de balasto juega un rol fundamental en el desarrollo de los mecanismos de resistencia del balasto durante la aplicación de cargas cíclicas (Indraratna et al., 2010; Lobo-Guerrero & Vallejo, 2006).

A pesar de que la importancia de considerar la rotura del balasto queda constatada, su inclusión en los modelos de Elementos Discretos no está exenta de problemas. La incorporación a una simulación de los algoritmos necesarios para determinar la rotura de los enlaces entre partículas acrecienta el principal problema del Método de Elementos Discretos, el tiempo de computación. Por ello en (Lim & McDowell, 2005; Lu & McDowell, 2006) se opta por realizar ensayos de compresión cíclica del balasto en caja sin considerar la rotura de las piedras.

Existen dos enfoques principales a la hora de plantear la rotura de las piedras de balasto: La separación de las partículas que forman parte de un cúmulo y la división de una partícula en otras menores. Ambos métodos se describen a continuación.

### 2.4.1 Rotura del enlace entre partículas de un cúmulo

Este enfoque se basa en la implementación de un modelo de uniones entre las partículas que forman un cúmulo de esferas, por lo que no es aplicable a otro tipo de partículas. Está basado en la determinación de una tensión finita entre las uniones de las partículas de un mismo cúmulo, de forma que cuando la tensión en la unión entre

dos partículas supere el límite previamente establecido, se produce la separación de las partículas pasando una de ellas a ser independiente del resto del cúmulo.

En (Indraratna et al., 2010) se desarrolla un modelo en dos dimensiones de las partículas de balasto empleando cúmulos de círculos, que tienen características similares a los de esferas, pero aplicadas al caso simplificado de las dos dimensiones. Los cúmulos creados se someten posteriormente a ciclos de carga biaxial a una frecuencia determinada para observar su comportamiento. Los resultados muestran como la mayoría de la rotura de enlaces entre partículas se produce durante los primeros ciclos de carga, provocando un gran asiento inicial permanente. Una vez que dejan de producirse nuevas roturas el asiento producido es insignificante, lo que refuerza la idea de que la rotura de las piedras de balasto es uno de los factores determinantes en la producción de deformaciones permanentes.

Este enfoque también ha sido empleado en estudios en tres dimensiones como en (Zhang et al., 2017) donde se desarrolla un modelo tridimensional para estudiar el comportamiento del balasto bajo la acción de cargas dinámicas, incluyendo la simulación de la rotura y contaminación del balasto. Los resultados muestran como la rotura de las partículas produce efectos notables en el asiento producido, produciéndose la mayoría de las roturas en la zona bajo traviesa.

#### 2.4.2 División de una partícula en otras menores

Este segundo enfoque es extensible a todo tipo de partículas, pero algunos autores lo definen como menos realista (Zhang et al., 2017). Consiste en determinar un umbral de esfuerzo soportado por la partícula. En caso de que dicho esfuerzo sea sobrepasado se produce la rotura completa de la partícula en fragmentos. Este proceso se modeliza sustituyendo la partícula original por otras de menor tamaño (*Figura 8*).

En (Lobo-Guerrero & Vallejo, 2006) se presenta la comparación de dos modelos bidimensionales de una sección longitudinal de vía con tres traviesas. La diferencia entre ambos modelos es que en uno se permite la rotura de partículas mientras que en el otro no se considera. Para la determinación del tamaño que debían presentar las partículas tras la rotura se analizó la forma de rotura de distintos materiales en ensayos de carga puntual. La *Figura 8* muestra el proceso de rotura seguido en el trabajo, solamente se produce la rotura de la partícula si el esfuerzo,  $\sigma_t$ , sobre la partícula supera una resistencia,  $\sigma_{max}$ , previamente establecida y el número de contactos de la partícula con

otras de su entorno es menor que tres. La inclusión del número de contactos, o número de coordinación, con otras partículas se fundamenta en la idea de que, en una partícula altamente confinada, los esfuerzos de confinamiento producidos por las partículas vecinas evitan la producción de esfuerzos de tracción y por tanto las partículas no se rompen.

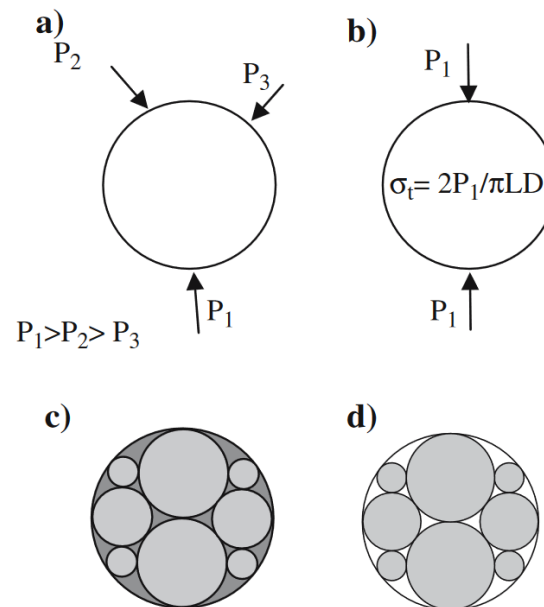


Figura 8. Posibles etapas para simular el proceso de rotura de una partícula en fragmentos (Lobo-Guerrero & Vallejo, 2006).

Este método se ha aplicado con poliedros en (Eliáš, 2014), el planteamiento inicial buscaba dividir los poliedros por la mitad (Figura 9a), pero las mitades resultantes soportaban prácticamente el mismo esfuerzo que la pieza original y se rompían de forma consecutiva, por lo que el autor abandonó esta idea. En su lugar, se optó por cortar cada poliedro a través de su centroide mediante dos planos perpendiculares paralelos al segundo esfuerzo principal,  $\sigma_{II}$ , y que forman un ángulo de  $\pi/4$  con el resto de los esfuerzos principales, tal y como se muestra en la Figura 9b.

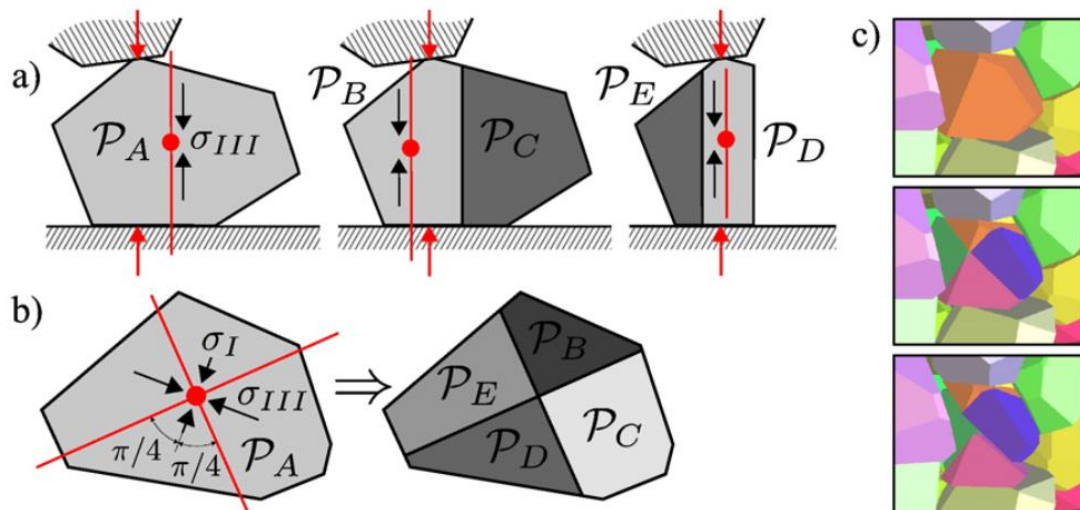


Figura 9.a) División del poliedro en dos mitades descartada; b) Método para la división del poliedro en cuatro partículas menores; c) Captura realizada del estado de la partícula en la simulación: antes de la rotura, inmediatamente tras la rotura; y una vez transcurridas un gran número de iteraciones. (Eliáš, 2014).

## 2.5 CARGAS DINÁMICAS SOBRE EL BALASTO

En el apartado anterior se ha mencionado la importancia de las cargas cíclicas y las vibraciones a las que se encuentra sometido el balasto ferroviario. Son muchos los estudios que emplean cargas estáticas o cuasi estáticas, aunque existen algunas propuestas en la literatura que utilizan modelos dinámicos para simular el paso de trenes y analizar su influencia en el balasto.

En (Balamonica et al., 2023) se realizan una serie de trabajos para determinar la rigidez dinámica del balasto utilizado por la compañía de Ferrocarriles Federales Suizos (SBB). Los autores se centran en la respuesta del balasto ante los impactos provocados por una maza de 6 kg sobre una losa de hormigón de 0.5 m x 0.5 m x 0.06 m apoyada sobre el balasto. El modelo desarrollado logró obtener valores de aceleraciones comparables en magnitud y duración, a las obtenidas en ensayos realizados en laboratorio.

En (Indraratna et al., 2010) se modelan una serie de test triaxiales a gran escala periódicos en dos dimensiones, empleando frecuencias en un rango entre los 10 – 40 Hz. Esta es una forma sencilla en la que los autores pudieron simular el paso de trenes entre los 73 km/h y 291 km/h en las vías de ancho estándar de Australia. Para ello se desarrolló una subrutina para aplicar un ciclo controlado de esfuerzo biaxial a la frecuencia deseada con la amplitud de la carga de trabajo. En la *Figura 10* se muestra el esfuerzo aplicado en función del tiempo, que presenta una curva sinusoidal típica.

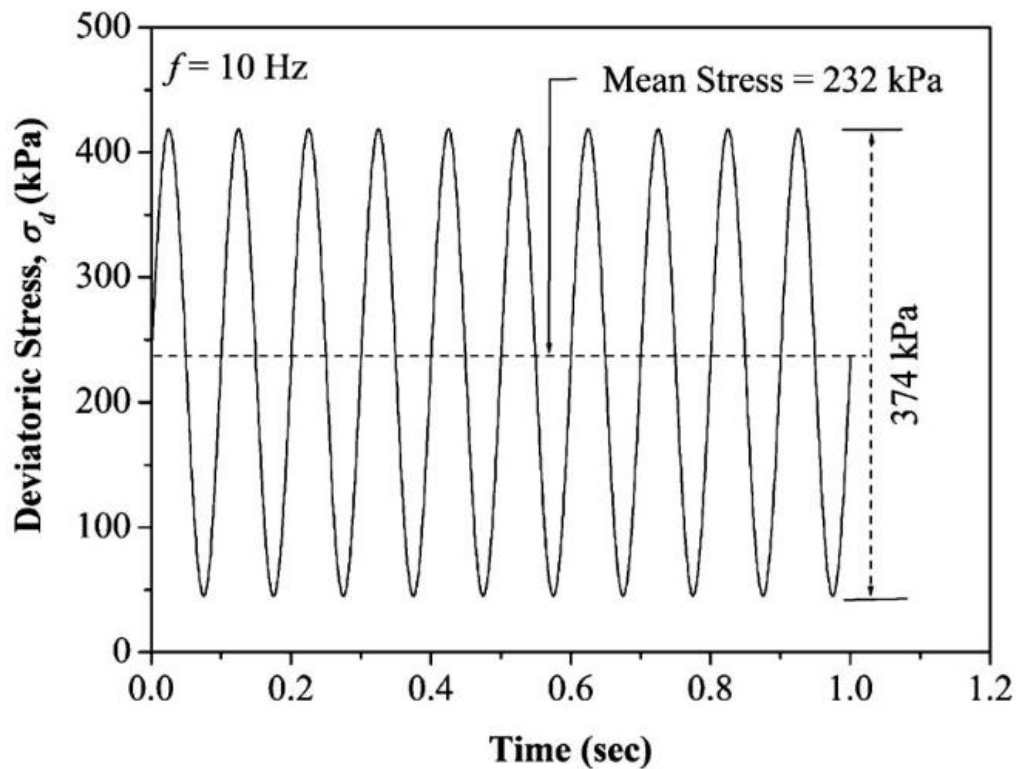


Figura 10. Ejemplo de aplicación de un esfuerzo desviador de 374 kPa aplicado con una frecuencia de 10 Hz. (Indraratna et al., 2010).

Un acercamiento más complejo respecto a este tema se puede encontrar en (Zhang et al., 2017) donde se desarrolla un modelo tridimensional para simular el comportamiento dinámico del balasto. El estudio está enfocado en las vías de tráfico pesado de mercancías chinas, por lo que se utiliza como modelo de vehículo un vagón de mercancías típico chino con una carga por eje de 30 t. La Figura 11 ilustra la fuerza dinámica transmitida por el conjunto de carril y traviesa ante el paso de un vehículo pesado circulando a una velocidad de 80 km/h.



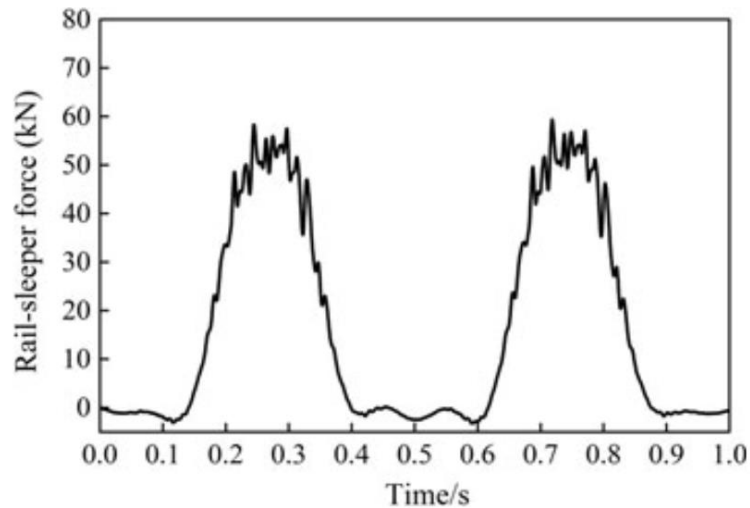


Figura 11. Representación de la variación temporal de la fuerza transmitida por el conjunto traviesa-carril. (Zhang et al., 2017).

Para el cálculo de las cargas dinámicas transmitidas por el paso de los trenes se emplea el modelo desarrollado en (Zhai et al., 2009). Este modelo modeliza el carril como una viga que se comporta según la hipótesis de Euler-Bernoulli soportada por las traviesas. Se tienen en cuenta las sujeciones y las placas de asiento bajo carril, que se modelizan mediante resortes y amortiguadores. En la Figura 12 se muestra el esquema general del modelo propuesto por Zhai et al.

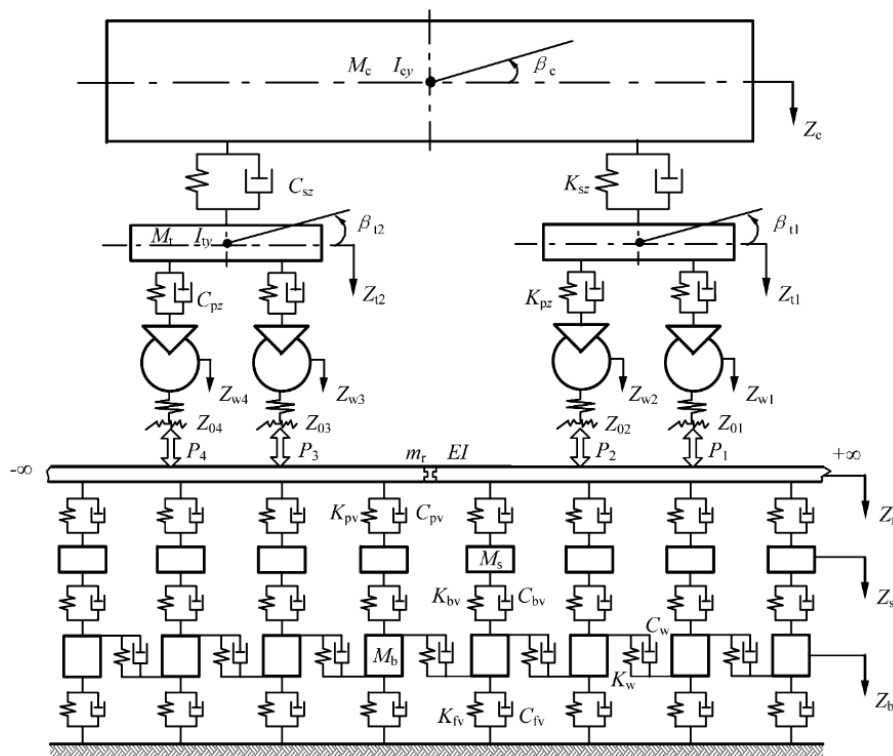


Figura 12. Esquema del modelo dinámico de interacción entre plataforma y vehículo. (Zhai et al., 2009).

En (Irazábal González, 2017) se introduce la acción de cargas dinámicas sobre el balasto empleando como modelo material rodante utilizado en la red ferroviaria española de alta velocidad. En particular, se emplea un automotor de alta velocidad de la *Serie 100* de Renfe circulando a una velocidad de 300 km/h. Su geometría, proveniente de las especificaciones técnicas definidas por Renfe, se muestra en la *Figura 13*.

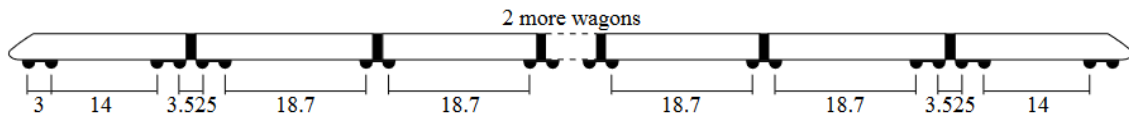


Figura 13. Geometría de un Serie 100 de Renfe. Dimensiones en metros. (Irazábal González, 2017).

Para el cálculo de la carga a la que se encuentra sometida el balasto se considera la acción conjunta del peso de la traviesa, del carril y de la carga que transmite cada eje de un bogie a su paso. Los autores proponen el uso de la *Ecuación 1* para el cálculo de la carga que ejerce un eje A sobre una determinada traviesa B. Previamente al empleo de dicha ecuación se deben determinar la rigidez general de la vía o coeficiente de balasto,  $K$ , la rigidez de los elementos sobre traviesa,  $k_{eq}$ , y la longitud elástica,  $L$ .

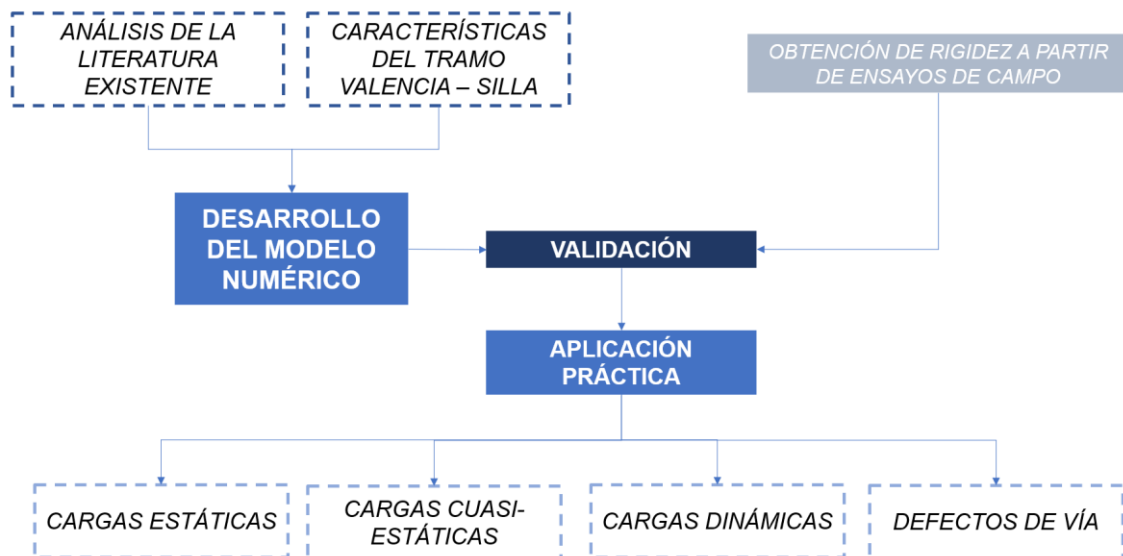
$$Q_{AB}(x, t) = Q_A \frac{k_{eq}}{K} e^{-\frac{|x-vt|}{L}} \left[ \cos \frac{|x - vt|}{L} + \sin \frac{|x - vt|}{L} \right] \quad (1)$$

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El presente capítulo pretende describir de forma general la metodología empleada para el desarrollo de un modelo numérico de la capa de balasto ferroviaria, así como las directrices seguidas en su validación y posterior aplicación al tramo ferroviario entre Valencia y Silla. En la *Figura 14* se muestra un diagrama de flujo que resume el esquema metodológico adoptado.

El modelo de comportamiento de la capa de balasto se desarrolla tras un análisis previo de la literatura existente al respecto. La inclusión de las características particulares del tramo entre Valencia y Silla facilita su posterior validación con los datos procedentes de los trabajos de campo previamente realizados en el propio tramo. Una vez que el modelo proporciona una rigidez del balasto compatible con los datos de campo se considera que es válido para representar el comportamiento del balasto, por lo que se puede proceder a aplicación en distintos casos de carga que permiten estudiar la respuesta del balasto ante ciertas sollicitaciones externas de interés.



*Figura 14. Diagrama de flujo de la metodología seguida en el desarrollo del modelo. (Elaboración propia).*

### 3.2 OBTENCIÓN DE LA RIGIDEZ DEL BALASTO EN VÍA

El desarrollo del modelo de comportamiento requiere de la obtención de datos de campo que permitan validar su comportamiento. En este caso se ha optado por emplear la rigidez de la capa de balasto como criterio de validación del modelo.



Figura 15. Superior: Situación general del desvío del que se han tomado los datos. Inferior: Zona de trabajo en la que se han realizado las mediciones. (Elaboración propia a partir de imágenes por satélite tomadas de Google Earth).

Los datos proceden de una campaña de mediciones realizada sobre un desvío que forma parte de un escape en las proximidades de la estación de Catarroja. La ubicación del desvío, que se muestra en la *Figura 15*, queda definida por las siguientes coordenadas:  $39^{\circ} 24' 14.5'' N$ ;  $0^{\circ} 23' 50.6'' W$ . Las mediciones se han realizado en el desvío que se encuentra situado sobre la que, según los criterios de Adif, se denomina Vía I, por ser aquella por la que en condiciones normales circulan los trenes impares. Es decir, aquellos que recorren la línea en el sentido del kilometraje descendente, teniendo en cuenta que habitualmente los trenes circulan por la vía de su derecha en el sentido de la marcha.

### 3.2.1 Toma de datos en campo

Los trabajos de campo se realizaron durante la noche sin ningún tipo de circulación sobre la vía. El equipo empleado para la toma de datos se compone de los siguientes instrumentos:

- Martillo de impacto instrumentado
- Acelerómetros
- Acondicionadores de señal
- Tarjetas de adquisición de datos
- GPS
- Ordenador portátil

El martillo de impacto instrumentado, similar al modelo de la *Figura 16*, permite estimar en conjunción con los acelerómetros las frecuencias propias de la vía, mediante impactos controlados sobre el carril. La maza empleada tiene una masa de 5 kg, una sensibilidad de 0,2 N/mV y una punta que permite excitar un ancho de banda de 300 Hz.



Figura 16. Martillo de impacto instrumentado. (PCB)

El flujo de trabajo consiste en realizar un golpeo con el martillo instrumentada en cada carril sobre una traviesa en la que se han instalado previamente los acelerómetros. De esta forma se determina la fuerza de impacto, a través del martillo, y de las aceleraciones y frecuencias excitadas en la traviesa, que son recogidas por los acelerómetros para finalmente ser recogidas y almacenadas en el ordenador portátil.

### 3.2.2 *Procesado de datos y obtención de la rigidez*

Las aceleraciones obtenidas en campo por los distintos golpes sobre el carril deben ser procesadas para obtener la rigidez de la capa de balasto. Para ello se obtiene en primer lugar el descenso del carril a causa del impacto del martillo instrumentado mediante la doble integración de las aceleraciones registradas.

El descenso del carril es debido principalmente a la propia rigidez del carril, a la rigidez de las placas de asiento, a la rigidez del balasto y a la rigidez de las capas de forma de la infraestructura. Para el presente trabajo resulta de especial interés aislar el descenso debido a la capa de balasto, a efectos de conocer su rigidez. Para ello se emplea el método de *Unold – Dischinger – Lorente* que permite analizar el descenso de la vía separando el efecto de la rigidez del carril del descenso debido a todos los elementos situados bajo el carril. Aplicando este método se obtiene la rigidez de la capa de balasto empleada para validar el modelo numérico propuesto.

## 3.3 MODELIZACIÓN NUMÉRICA

La elaboración del modelo numérico del balasto se realiza con la ayuda del software **YADE** en su versión *2022.01a* (Šmilauer et al., 2021). Este programa informático de código abierto incorpora los algoritmos del Método de Elementos Discretos, por lo que permite la construcción de escenas y la obtención de resultados sobre las mismas. En la *Figura 17* se muestran de manera esquemática los pasos seguidos en el desarrollo del modelo numérico. Como puede observarse, el proceso de calibración del modelo se desarrolla de forma iterativa hasta que se consigue una solución que se encuentra dentro de los estándares para su aceptación.

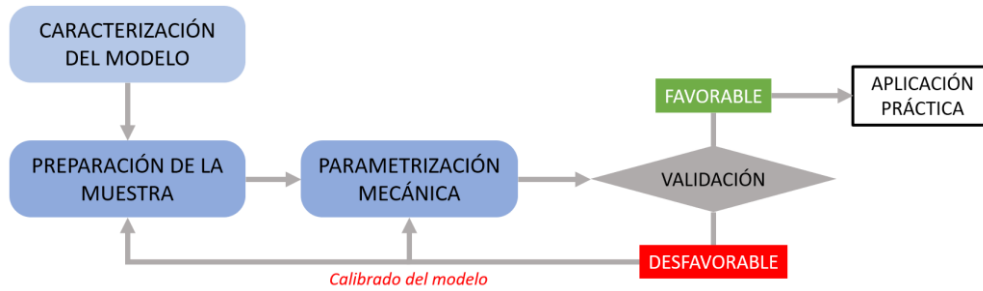


Figura 17. Diagrama de flujo seguido en la elaboración del modelo numérico

### 3.3.1 Caracterización del modelo

El primer paso en la elaboración del modelo es la determinación de los atributos que lo definen. En este caso se opta por una configuración geométrica que se asemeja al tramo sobre el que se pretende realizar la posterior aplicación práctica del modelo. Dado que el modelo propuesto se centra en el comportamiento del balasto, de todos los elementos que conforman una vía férrea solamente se implementan de forma directa el balasto y las traviesas. En la *Tabla 3* se muestra una relación de las características que se han tenido en cuenta para definir el modelo.

Tabla 3. Relación de las características que definen el modelo propuesto. (Elaboración propia)

<b>TRAVIESAS</b>	Número	Cantidad de traviesas que presentará el modelo, a mayor número de traviesas mayor fidelidad.
	Forma	Geometría y dimensiones que tendrá la traviesa
	Material	En la actualidad las más comunes en España son de hormigón, pero existen traviesas de madera y acero.
<b>CAPA DE BALASTO</b>	Longitud	Considerada la dimensión de la capa de balasto a lo largo del eje de la vía.
	Ancho	Medido transversalmente al eje de la vía.
	Espesor	Espesor de la capa bajo traviesa, en las normas técnicas de Adif se indican sus valores mínimos.
	Taludes	Pendiente que presenta el balasto en los laterales de la vía al dejarse caer libremente.
	Granulometría	Distribución de tamaños de las piedras de balasto por porcentaje en masa del total.
<b>MODELO DEM</b>	Condiciones de contorno	Definición del comportamiento de los límites del modelo, teniendo en cuenta posibles simetrías.
	Forma de las partículas	Tipo de forma geométrica con la que se representarán de forma simplificada las piedras de balasto en el modelo.
	Modelo de contacto	Tipo de ley constitutiva que controlará las interacciones entre los distintos elementos del modelo

### 3.3.2 Preparación de la muestra

El proceso de preparación de la muestra de balasto se compone de todos aquellos eventos que se desarrollan en el modelo y que se orientan a la consecución de una capa de balasto con las características requeridas apta para someterse a su validación. En otras palabras, permite que obtengamos una capa de balasto con las características geométricas que previamente hemos determinado.

Para el presente trabajo, dada su marcada aplicación práctica, se ha optado por proponer una preparación del modelo que presenta una notable semejanza con el proceso típico de puesta en obra del balasto, ver *Figura 18*, aunque actuaciones como el bateo o la estabilización dinámica no se consideran en este caso.

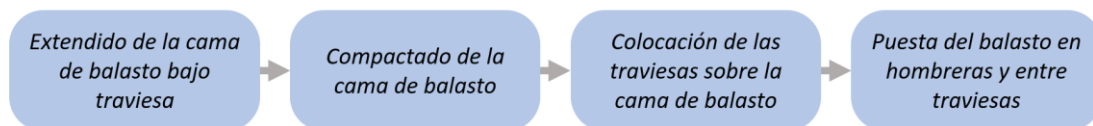


Figura 18. Proceso de puesta en obra del balasto. (Elaboración propia).

### 3.3.3 Parametrización mecánica del modelo

En las simulaciones que emplean el Método de Elementos Discretos existen una serie de parámetros que condicionan de forma directa el comportamiento mecánico de las partículas. Estos parámetros, descritos en la *Tabla 4*, deben ajustarse para que el modelo permita representar la realidad de forma apropiada.

Para el correcto ajuste de estos parámetros se realiza un estudio paramétrico en el que se van variando los valores de los distintos factores hasta lograr un conjunto de parámetros que logran representar el comportamiento deseado. Cabe destacar que, al tratarse de una idealización matemática de un fenómeno real, los parámetros como el módulo de Elasticidad y el coeficiente de Poisson no tienen por qué corresponderse de manera exacta con los auténticos del material.



Tabla 4. Principales parámetros que determinan el comportamiento mecánico del modelo. (Elaboración propia).

Módulo de elasticidad de las piedras de balasto	<i>En las simulaciones de Elementos Discretos define el grado de solape entre partículas y las fuerzas actuantes en dirección normal. Cuanto más elevado es su valor mayor es el tiempo de computación.</i>
Coefficiente de Poisson de las piedras de balasto	<i>Permite determinar el comportamiento de las partículas ante acciones tangenciales.</i>
Ángulo de rozamiento interno	<i>Al igual que en la realidad, se relaciona estrechamente con el máximo ángulo posible para la pendiente de un talud.</i>
Amortiguamiento (Damping)	<i>Amortiguamiento virtual, sin ningún significado físico, impuesto a todos los elementos del sistema para alcanzar la estabilidad.</i>
Intervalo de cálculo (Timestep)	<i>Tiempo, medido en segundos, en el cual se realizan todas las operaciones para realizar una iteración en el modelo.</i>

### 3.3.4 Calibración y validación del modelo

Para poder aplicar el modelo de comportamiento del balasto en el tramo Valencia – Silla es necesario verificar que este es capaz de representar el comportamiento de la capa de balasto en la realidad, para ello se lleva a cabo un proceso iterativo de calibración y validación del modelo.

El modelo se considerará válido cuando la rigidez que ofrezca la capa de balasto ante la aplicación de una carga estática sobre la traviesa se corresponda de forma razonable con los datos obtenidos a partir de los ensayos de campo. Para lograr esta correspondencia se realizan iteraciones para distintos valores de los parámetros definidos en el apartado anterior hasta alcanzar el resultado deseado, en ese momento el modelo se encontrará calibrado.

## 3.4 APLICACIÓN PRÁCTICA: CASOS DE CARGA

En el momento en el que la validez del modelo numérico para representar el comportamiento del balasto queda demostrada se procede a la ejecución de distintos casos de carga que permiten conocer la respuesta de la capa de balasto ante el paso de los distintos tipos de material rodante que circulan por el tramo Valencia – Silla.

Tras la demostración de la validez del modelo numérico para representar el comportamiento del balasto, se puede someter a distintos casos de carga en los que se

estudiará la respuesta que ofrece ante las solicitudes creadas por el paso de trenes por la vía. El flujo de trabajo para ejecutar cada caso de carga consistirá en:

1. Definir la magnitud de las cargas a aplicar.
2. Definir la distribución de cargas en las traviesas.
3. Simulación de comportamiento a través del modelo numérico.
4. Postprocesado de los datos obtenidos y obtención de resultados y conclusiones.

Los distintos supuestos de carga y los resultados que se obtienen de los mismos se detallan en la *Tabla 5*.

*Tabla 5. Descripción y resultados obtenidos para cada caso de carga. (Elaboración propia)*

	DESCRIPCIÓN	RESULTADOS
<b>CASO 1</b>	Solicitud estática	Descenso de traviesa
		Desplazamiento del balasto
		Velocidades
		Esfuerzos
		Diagramas de cadenas de fuerza
<b>CASO 2</b>	Solicitud estática con defectos de vía	Descenso de traviesa
		Desplazamiento del balasto
		Velocidades
		Esfuerzos
<b>CASO 3</b>	Carga cuasi - estática	Descenso de traviesa
		Desplazamiento del balasto
		Velocidades
		Esfuerzos
<b>CASO 4</b>	Carga lateral STPT	Resistencia transversal de la vía
		Desplazamiento del balasto
		Velocidades
		Esfuerzos
		Diagramas de cadenas de fuerza
<b>CASO 5</b>	Solicitud dinámica	Descenso de traviesa
		Desplazamiento del balasto
		Velocidades
		Esfuerzos

## 4 CARACTERÍSTICAS DEL TRAMO DE ESTUDIO

### 4.1 MARCO GENERAL

El modelo numérico de comportamiento de la capa de balasto propuesto en el presente trabajo enfoca su desarrollo, validación y posterior aplicación al tramo ferroviario entre Valencia y Silla. Dicho tramo forma parte de la Red Ferroviaria de Interés General (RFIG), conformada por “*las infraestructuras ferroviarias, las estaciones de viajeros y terminales de transporte de mercancías que resulten esenciales para garantizar un sistema común de transporte ferroviario en todo el territorio del Estado*”, según lo dispuesto en el Artículo 4 de la Ley 38/2015, de 29 de septiembre, del sector ferroviario.

En particular, este tramo forma parte de la Línea 300 de Adif, que conecta las estaciones de Madrid – Chamartín Clara Campoamor y Valencia – Estació del Nord, pasando por Alcázar de San Juan, Albacete y Xàtiva. En la *Tabla 6* se resumen las principales características del tramo.

*Tabla 6. Características generales del tramo Silla – Valencia. (Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en la declaración sobre la red 2024 publicada por Adif)*

<b>LÍNEA 300</b>		
<b>TRAMO SILLA – VALENCIA ESTACIÓ DEL NORD</b>		
<b>ESTACIÓN DE ORIGEN</b>	<i>Nombre</i>	Silla
	<i>P.K.</i>	100+600
<b>ESTACIÓN DE DESTINO</b>	<i>Nombre</i>	Valencia – Estació del Nord
	<i>P.K.</i>	112+700
<b>LONGITUD</b>		12,1 km
<b>ANCHO</b>		1668 mm
<b>ELECTRIFICACIÓN</b>		3 kV, corriente continua
<b>VELOCIDAD MÁXIMA</b>		160 km/h
<b>RAMPA CARACTERÍSTICA</b>	<i>Sentido par</i>	25 milésimas
	<i>Sentido impar</i>	25 milésimas
<b>CATEGORÍA DE LINEA</b>	<i>D4</i>	
	<i>Masa máxima por eje</i>	22,5 t eje
<b>LONGITUD MÁXIMA TRENES DE MERCANCÍAS</b>	<i>Básica</i>	500 m
	<i>Especial</i>	750 m
<b>TIPO DE BLOQUEO</b>		BAB con CTC

## 4.2 IMPORTANCIA ESTRATÉGICA

El tramo ferroviario Valencia – Silla se configura como una pieza indispensable en el acceso ferroviario a la ciudad de Valencia, así como un elemento vertebrador en el flujo de transporte de viajeros y mercancías a lo largo del eje mediterráneo. En la *Figura 19* se presenta un diagrama esquemático de las principales conexiones en las que interviene el tramo objeto del presente trabajo. En ella se puede apreciar como el tramo conecta los principales focos generadores de tráfico de la zona, como las principales capitales de provincia y los puertos de mayor relevancia de la zona mediterránea. También cabe destacar la presencia de intercambiadores modales, como la factoría de Ford en Almussafes, la estación de Valencia – Fuente San Luis y la propia terminal de contenedores de la estación de Silla.



*Figura 19. Diagrama de las principales conexiones en ancho ibérico en las que interviene el tramo Valencia – Silla, coloreado en rojo se encuentra el propio tramo objeto del documento. (Elaboración propia).*

En la actualidad, existe un impulso por parte de las administraciones estatales y europeas para potenciar el transporte por ferrocarril, en particular el transporte de mercancías, al ser considerado un modo de transporte más sostenible que los vehículos de carretera. Para ello se han implantado varias iniciativas como la ya previamente mencionada *Mercancías 30*, que se alinea con las propuestas establecidas en el Eje 6 de la Estrategia de Movilidad Segura, Sostenible y Conectada 2030 del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA).

Dentro de las medidas propuestas en estas estrategias para aumentar el tráfico de mercancías por ferrocarril se encuentran la habilitación de estaciones y apartaderos para permitir la circulación de trenes de 750 metros de longitud y la habilitación de autopistas ferroviarias, que permiten aprovechar las sinergias entre el transporte por carretera y el ferroviario. El corredor entre Madrid y Valencia en ancho ibérico, del que forma parte este tramo, permite la circulación de trenes de mercancías de hasta 750 m de longitud y sus gálidos se encuentran habilitados, desde 2021, para permitir el transporte del estándar de semirremolque P400, fundamental para poder desarrollar el concepto de autopista ferroviaria.

El tramo forma parte del eje mediterráneo en ancho ibérico, por lo que a pesar de presentar dificultades a la hora de transportar mercancías entre los puertos españoles y los países europeos debido a la diferencia de ancho existente en la actualidad, es de esperar que en un futuro se realice su cambio a ancho mixto, o directamente a ancho internacional para lo que las traviesas instaladas en el tramo ya están preparadas, como se verá en los siguientes apartados.

## 4.3 SUPERESTRUCTURA

### 4.3.1 Sección tipo

En todos aquellos tramos ferroviarios pertenecientes a la Red Ferroviaria de Interés General gestionados por Adif o Adif AV es de aplicación la norma “NAP 1-2-1.0 Metodología para el diseño del trazado ferroviario”, en la que se especifican las condiciones que debe cumplir un trazado ferroviario, entre ellas su sección tipo, que resulta de gran relevancia para el presente trabajo.

La *Figura 20* es un extracto de los planos desarrollados por Adif en los que se especifican las dimensiones más relevantes para una vía doble en ancho ibérico (1668 mm). De cara a la realización del modelo numérico resultan de especial interés las siguientes:

- Espesor mínimo de balasto bajo traviesa: **0,300 m**
- Distancia entre el carril y el borde exterior de las hombreras: **0,900 m**
- Talud de la capa de balasto: **3H:2V**

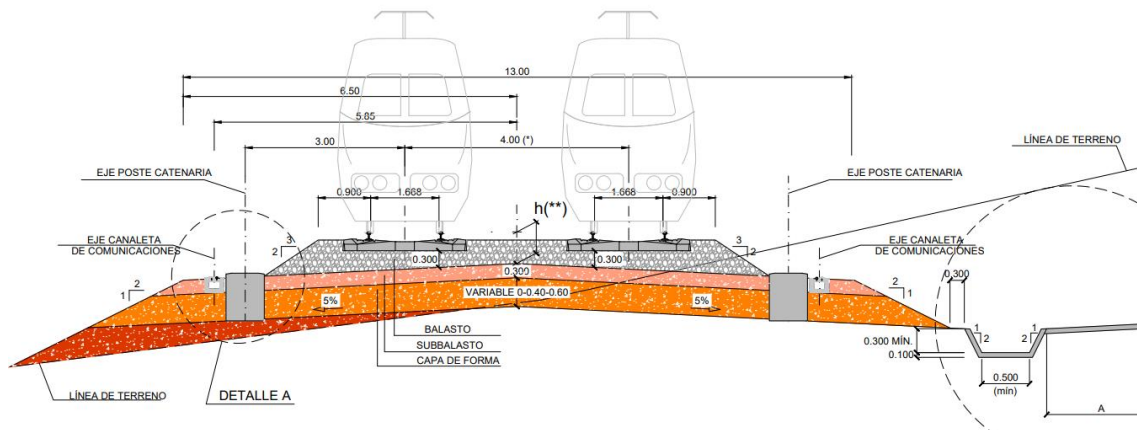


Figura 20. Sección tipo en vía general para vías de ancho ibérico. (Adif).

### 4.3.2 Balasto

Las líneas que se engloban dentro de la Red Ferroviaria de Interés General deben cumplir con las especificaciones de la norma “NAV 3-4-1.0 Dimensionado de la banqueta” en lo referido al diseño de la banqueta y puesta en obra del balasto y con la especificación técnica “ET 03.360.004.0 Balasto” para determinar las características que debe cumplir un árido y las canteras que lo extraen para ser empleado como balasto.

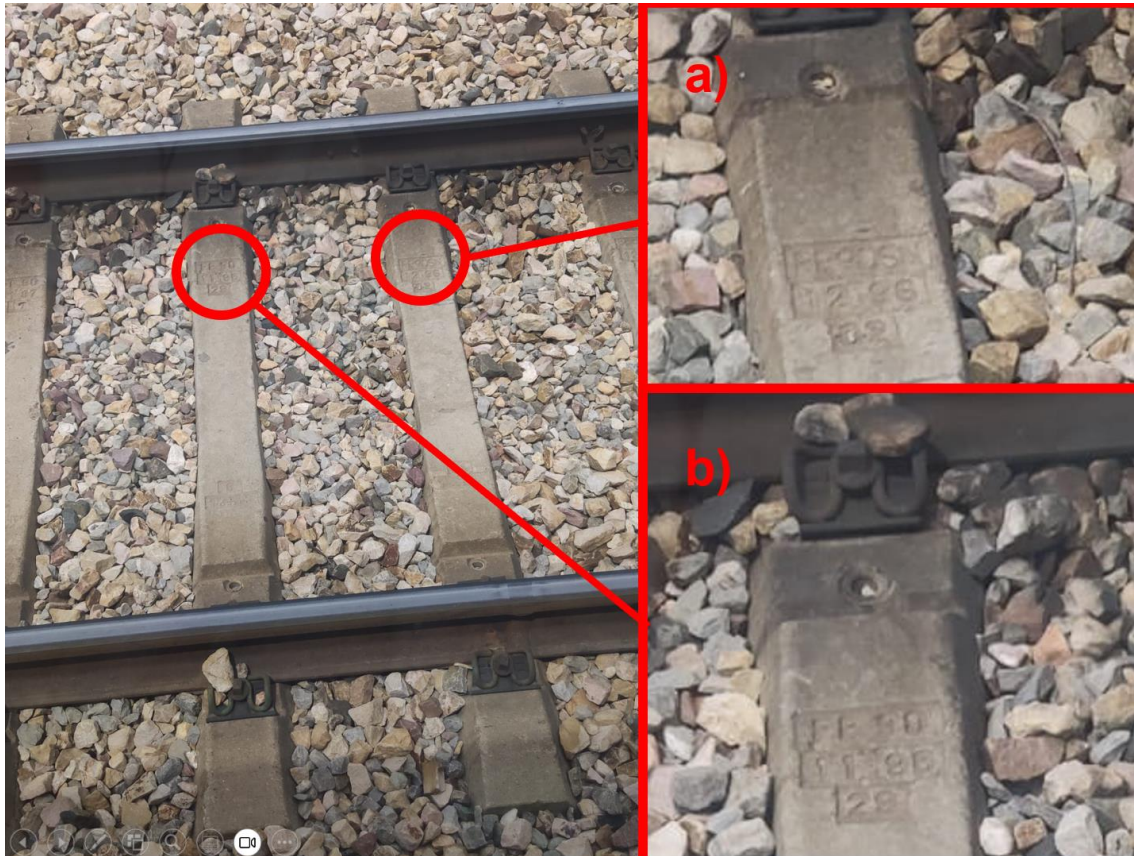
La ET 03.360.004.0, además de las características de resistencia y forma, establece el uso granulométrico que debe presentar un árido para poder ser empleado como balasto. La Tabla 7 muestra los porcentajes en peso admitidos para cada tamiz según lo descrito en la especificación técnica.

Tabla 7. Curva granulométrica del balasto. (Adaptada de ET 03.360.004.0, Adif)

CURVA GRANULOMÉTRICA DEL BALASTO	
Tamaño de tamiz (mm)	% que pasa (en peso)
63	100
50	70 – 99
40	30 – 65
31,5	1 – 25
22,4	0 – 3 (Para recepción de lotes situados en el centro de producción)
	0 – 5 (Para recepción de lotes situados en obra o acopio intermedio)

### 4.3.3 Traviesas

En el tramo Valencia – Silla se emplean en la actualidad traviesas monobloque de hormigón postesado del tipo **PR-90 SN**, como se puede apreciar en la *Figura 21*. Las dimensiones y las particularidades que deben cumplir este tipo de traviesas quedan determinadas en la norma “NAV 3-1-2.1 Traviesas monobloque de hormigón” redactada por Renfe y posteriormente adaptada por Adif.



*Figura 21. Fotografía de vía en la que, a pesar del elevado grado de desgaste de las traviesas, se puede apreciar la nomenclatura que define el modelo; a) Inscripción PR90SN; b) Inscripción PR 90. (Elaboración propia).*

Este tipo de traviesas recibe el nombre de polivalente, ya que permiten tanto la instalación de un ancho de vía ibérico de 1668 mm como la del ancho internacional de 1435 mm. Esta versatilidad ha provocado que se instalen en multitud de líneas convencionales en ancho ibérico con el objetivo de poder realizar un futuro cambio a ancho internacional de forma sencilla y sin necesidad de grandes inversiones.

La más reciente “ET 03.360.571.8 Traviesas monobloque de hormigón pretensado” considera que las traviesas PR-90 deberán ser sustituidas en futuras renovaciones de vía por otro tipo de traviesa polivalente más reciente.

En la NAV 3-1-2.1 se definen las dimensiones que deben cumplir este tipo de traviesas (Figura 22), así como otras características como el tipo de perfil de carril admitido y la sujeción que se debe emplear en conjunto con la traviesa. A continuación, se especifican los datos de mayor relevancia para el modelo:

- Longitud: **2 600 mm**
- Ancho: **220 mm – 300 mm**
- Altura: **190 mm – 249 mm**
- Perfil de carril admitido: **54E1 ó 60E1**
- Tipo de sujeción: **V0**

La sujeción, que queda impuesta por el tipo de traviesa, se compone mediante tirafondos nº9 con arandela prisionera, placa de asiento PAS, una placa acodalada metálica o plástica y un clip Vossloh tipo SKL-1. El conjunto de todos estos elementos conforma una sujeción elástica directa.

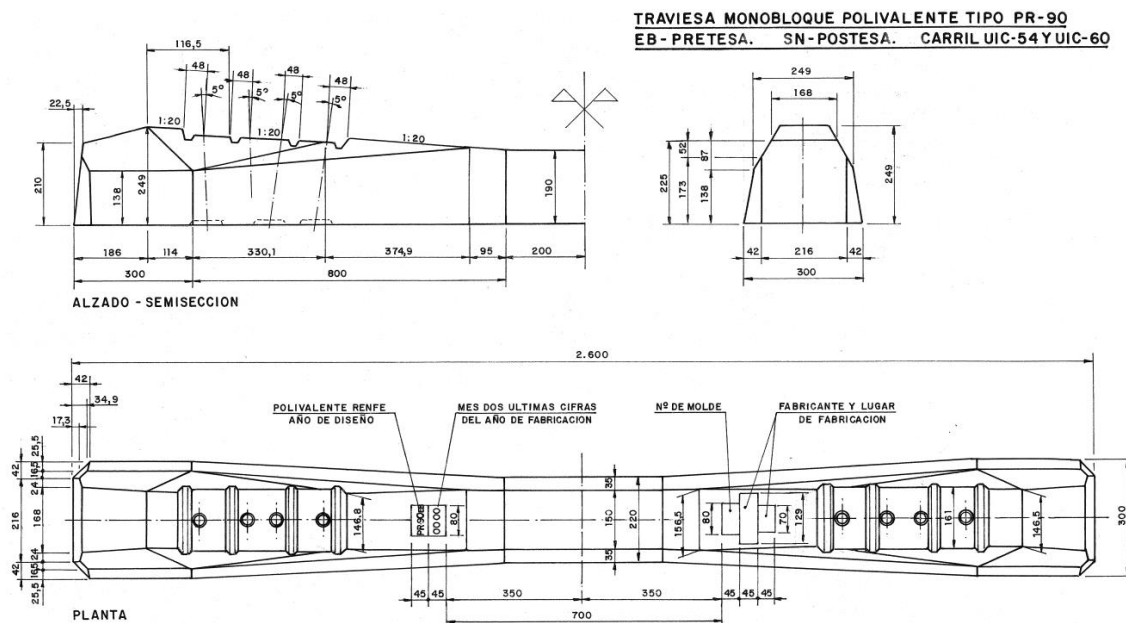


Figura 22. Planta, alzado y perfil de la traviesa PR-90 SN, cotas en mm. (Adif, 1997)



#### 4.3.4 Carriles

Al igual que sucede con el resto de los elementos de la superestructura, en España las características que deben satisfacer los carriles de la Red Ferroviaria de Interés General se han acotado por Adif en la “ET 03.360.161.8 Carril”.

En el tramo Valencia – Silla se emplean los carriles **54E1**, que son los que se emplean de forma general en aquellas líneas con una velocidad máxima inferior a los 160 km/h. En la *Figura 23* se describen sus principales características conforme a lo especificado en la norma.

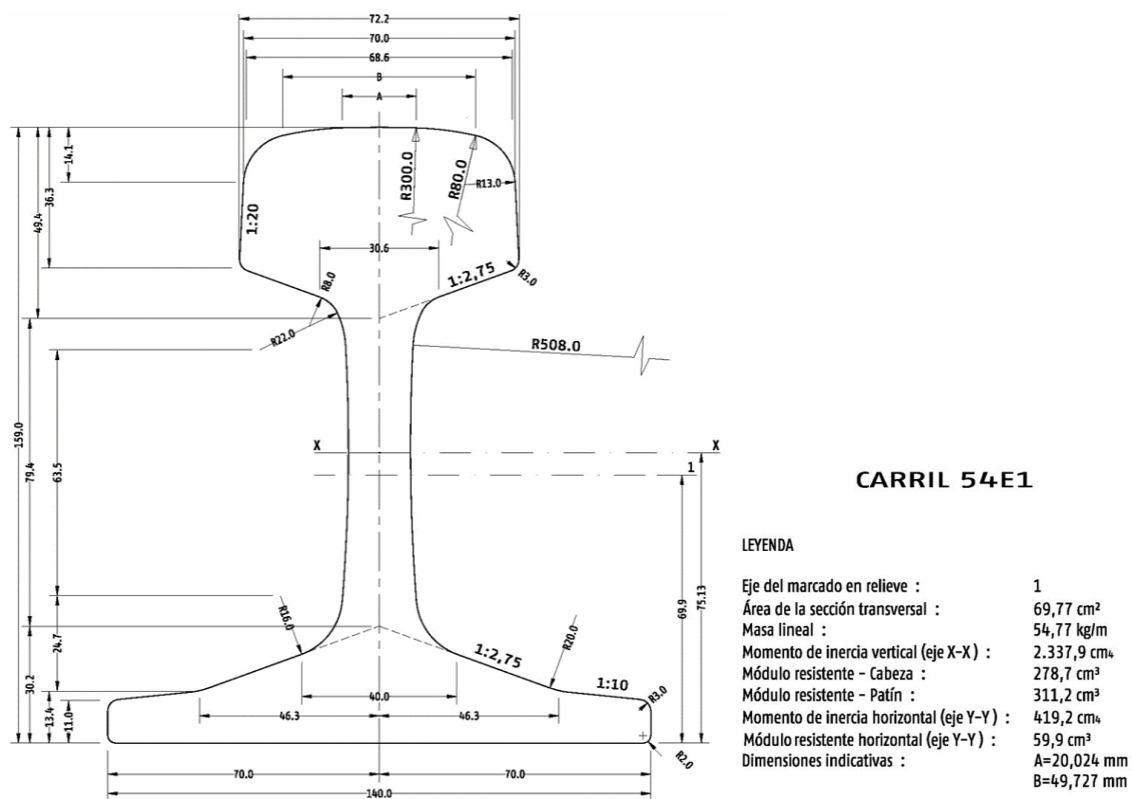


Figura 23. Principales características geométricas y mecánicas del perfil de carril 54E1. (Adif).

## 4.4 TIPOLOGÍAS DE TRÁFICO

El objeto del presente apartado es realizar una reseña sobre las diferentes tipologías de servicios que transitan por el tramo Valencia – Silla, prestando especial atención a aquellas características más relevantes en la puesta en práctica del modelo de comportamiento del balasto, como las características del material motor y las frecuencias de paso.

A grandes rasgos, según los de capacidad de las distintas líneas proporcionados por Adif en la declaración sobre la red 2024, la capacidad media de la Línea 300 a la que pertenece el tramo es de 281 trenes/día a fecha de septiembre de 2022. Por otra parte, el tráfico medio actual es de 85 trenes/día en condiciones habituales, por lo que la saturación de la línea se sitúa en el entorno del 30%, con 195 surcos de circulación todavía disponibles.

Como se ha comentado en el apartado anterior, el tramo Valencia – Silla presenta una gran variedad de tráfico ferroviario debido a su situación estratégica a la entrada de Valencia. Esto provoca que la estructura ferroviaria este sometida a cargas de gran variabilidad en términos de magnitud y frecuencia de las mismas. A continuación, se realiza una breve reseña de los principales servicios que circulan por el tramo, atendiendo a los detalles más relevantes en términos de desarrollo del modelo de comportamiento de la capa de balasto.

#### 4.4.1 Servicios del núcleo de cercanías de Valencia

El tramo Valencia – Silla es uno de los principales ejes dentro del núcleo de cercanías de Valencia. El tramo cuenta con 5 estaciones en servicio en la actualidad y por él circulan la **Línea C1 Valencia Nord – Gandía** y la **Línea C2 Valencia Nord – Xàtiva – Moixent**. En la *Tabla 8* se muestran las circulaciones diarias para cada línea de cercanías.

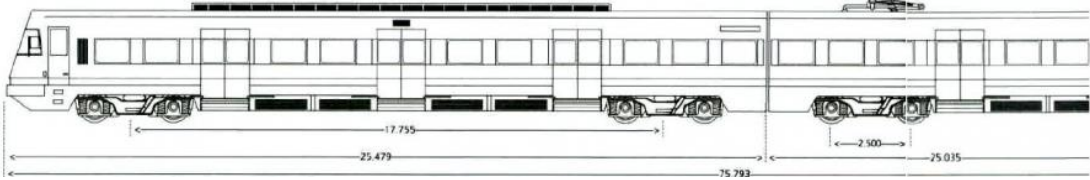
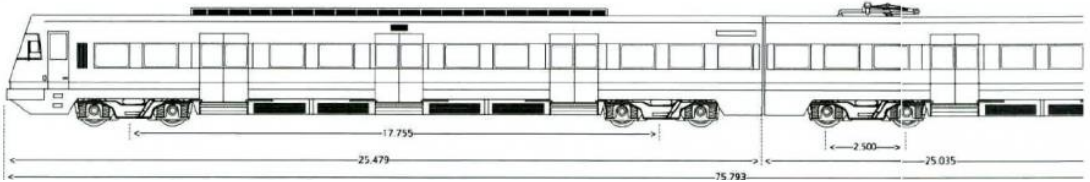
*Tabla 8. Circulaciones diarias de servicios de cercanías para un día laborable por el tramo Valencia – Silla. (Elaborada a partir de datos de [www.renfe.es](http://www.renfe.es))*


LÍNEA	ITINERARIO	CIRCULACIONES	
		IDA	VUELTA
C-1	Valencia Nord - Gandía	43	39
C-2	Valencia Nord – Xàtiva - Moixent	46	45
TOTAL		89	84
		173	

Los servicios de cercanías del núcleo de Valencia que discurren por el tramo Valencia – Silla se realizan por medio de Renfe, empleando material rodante de las series 446, 447 y 464, este último perteneciente a la familia de trenes Civia. En la *Tabla 9* se presentan las características más relevantes de estos automotores eléctricos a efectos del

presente trabajo. Nótese que la principal diferencia entre las series 446 y 447 es la velocidad máxima, mientras que de la serie Civia se ha considerado únicamente el 464 al ser la principal unidad que circula en el núcleo de cercanías de valencia de forma habitual en la actualidad.

Tabla 9. Principales características del material motor empleado en servicios de cercanías. (Elaboración propia a partir de los datos y figuras obtenidos de [www.renfe.com](http://www.renfe.com) y [www.listadotren.es](http://www.listadotren.es))

<b>MATERIAL MOTOR</b>	
<b>Serie 446</b>	
<i>Composición</i>	Bo'Bo' + 2'2' + Bo'Bo'
<i>Velocidad máxima</i>	100 km/h
<i>Peso por eje motor</i>	15,3 t/eje
<i>Peso por eje remolcado</i>	11,05 t/eje
	
<b>Serie 447</b>	
<i>Composición</i>	Bo'Bo' + 2'2' + Bo'Bo'
<i>Velocidad máxima</i>	120 km/h
<i>Peso por eje motor</i>	14,18 t/eje
<i>Peso por eje remolcado</i>	10,87 t/eje
	

<b>Serie 464 (Civia)</b>	
<i>Composición</i>	2'-B'-B'-2'
<i>Velocidad máxima</i>	120 km/h
<i>Peso por eje</i>	15,4 t
	

#### 4.4.2 Servicios de Media Distancia (MD)

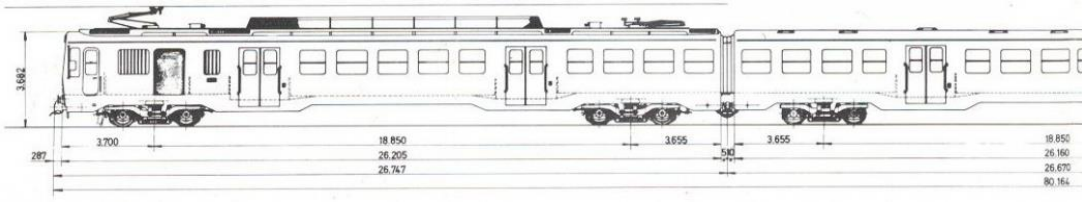
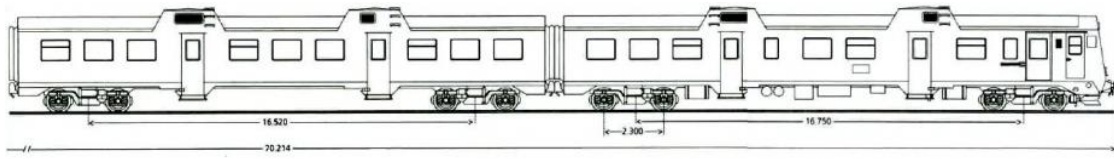
Dentro del tráfico soportado en el tramo Valencia – Silla, los servicios de Media Distancia que conectan Valencia con ciudades cercanas suponen una afección de poca relevancia en lo relativo a frecuencias como se puede observar en la *Tabla 10*.

*Tabla 10. Circulaciones diarias de servicios de Media Distancia para un día laborable por el tramo Valencia – Silla. (Elaborada a partir de datos de www.renfe.es).*

ITINERARIO	CIRCULACIONES IDA	CIRCULACIONES VUELTA
Valencia Nord – Albacete – Alcázar de San Juan	2	2
Valencia Nord – Alicante – Murcia – Cartagena	2	2
Valencia Nord - Alcoi	3	3
TOTAL	7	7
	14	

Las mayores distancias recorridas en este tipo de servicios requieren de material motor específico, siendo los más comunes los automotores eléctricos de las series 449 y 470, estos últimos se suelen ofrecer bajo la denominación comercial de Regional Exprés. Para aquellos recorridos en los que es necesario emplear vehículos diésel por la falta de electrificación de la infraestructura, como es el caso de los servicios a Alcoi y a Cartagena, se emplea material de las series 599 y 592. Las características de estos vehículos se pueden consultar en la *Tabla 11*.

Tabla 11. Principales características del material motor empleado en servicios de Media Distancia.  
(Elaboración propia a partir de los datos y figuras obtenidos de [www.renfe.com](http://www.renfe.com) y [www.listadotren.es](http://www.listadotren.es))

<b>MATERIAL MOTOR</b>	
<b>Serie 449</b>	
<i>Composición</i>	<b>B' + B' + B' + B' + B' + B'</b>
<i>Velocidad máxima</i>	<b>160 km/h</b>
<i>Peso por eje</i>	<b>14,33 t/eje</b>
<b>Serie 470</b>	
<i>Composición</i>	<b>Bo'Bo' + 2'2' + 2'2'</b>
<i>Velocidad máxima</i>	<b>140 km/h</b>
<i>Peso por eje motor</i>	<b>14,77 t/eje</b>
<i>Peso por eje remolcado</i>	<b>9,27 t/eje</b>
	
<b>Serie 599</b>	
<i>Composición</i>	<b>1A'A1'+2'2'+1A'A1'</b>
<i>Velocidad máxima</i>	<b>160 km/h</b>
<i>Peso por eje</i>	<b>13,1 t</b>
<b>Serie 592</b>	
<i>Composición</i>	<b>1A'A1'+2'2'+1A'A1'</b>
<i>Velocidad máxima</i>	<b>120 km/h</b>
<i>Peso por eje</i>	<b>12 t</b>
	

#### 4.4.3 Servicios de Larga Distancia (LD)

A diferencia de los dos tipos servicios anteriores, que son considerados Obligación de Servicio Público (OSP) y que por tanto se encuentran subvencionados por las distintas administraciones responsables, los servicios de Larga Distancia son servicios comerciales de cuya rentabilidad depende el número de circulaciones. Es por esto por lo que, en la actualidad, los servicios de Larga Distancia sólo se mantienen con aquellos destinos en los que no existe una conexión directa por medio de la alta velocidad. En la *Tabla 12* se muestran las conexiones existentes en la actualmente.

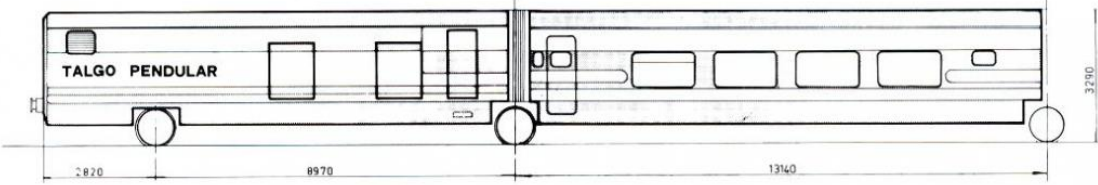
Tabla 12. Circulaciones diarias de servicios de Larga Distancia para un día laborable en el tramo Valencia – Silla. (Elaborada a partir de datos de [www.renfe.com](http://www.renfe.com)).

ITINERARIO	CIRCULACIONES	CIRCULACIONES
	IDA	VUELTA
Barcelona – Valencia Nord – Alicante – Murcia – Cartagena	2	2
Barcelona – Valencia – Cádiz (Torre del oro)	1	1
TOTAL	3	3
	6	

En servicios de Larga Distancia habitualmente se emplean locomotoras de las *Series 252* o *334* según se discurra por líneas electrificadas o no respectivamente, que arrastran composiciones de coches *Talgo*. También resulta habitual en este tipo de trayectos el empleo de la *Serie 130*. En el tramo Valencia – Silla resulta de especial interés el empleo de automotores de la *Serie 120* con bogies de rodadura desplazable que les permiten circular en ambos anchos para realizar el servicio *Torre del Oro*. En la *Tabla 13* se muestran las principales características de los automotores y de las locomotoras empleadas en estos servicios. Como referencia se añade un coche *Talgo* con la finalidad de obtener un orden de magnitud de las características de este tipo de coches.

Tabla 13. Principales características del material motor empleado en servicios de Larga Distancia.  
(Elaboración propia a partir de los datos y figuras obtenidos de [www.renfe.com](http://www.renfe.com) y [www.listadotren.es](http://www.listadotren.es))

<b>MATERIAL MOTOR</b>	
<b>Serie 130</b>	
<i>Composición</i>	Bo'Bo' + 1'1'1'1'1'1'1'1'1'1'1'1'1'1' + Bo'Bo'
<i>Velocidad máxima</i>	250 km/h
<i>Peso por eje locomotora</i>	18 t/eje
<i>Peso por eje remolcado</i>	17,5 t/eje
<b>Serie 120</b>	
<i>Composición</i>	1Ao'Ao1'+1Ao'Ao1'+1Ao'Ao1'+1Ao'Ao1'
<i>Velocidad máxima</i>	250 km/h
<i>Peso por eje</i>	14,1 t/eje
<b>Serie 252</b>	
<i>Composición</i>	Bo'Bo'
<i>Velocidad máxima</i>	220 km/h
<i>Peso por eje</i>	22,5 t

<b>Serie 334</b>	
<i>Composición</i>	Bo'Bo'
<i>Velocidad máxima</i>	200 km/h
<i>Peso por eje</i>	22,5 t
<b>Remolque Talgo TB6-602 2ª clase</b>	
<i>Velocidad máxima</i>	200 km/h
<i>Peso por eje</i>	14,1 t
	

#### 4.4.4 Servicios de transporte de mercancías


La circulación de trenes de transporte de mercancías por el tramo Valencia – Silla resulta difícil de acotar debido a que el transporte regular de mercancías no resulta común en España. Sin embargo, se puede deducir a partir de lo expuesto en lo relativo a la importancia estratégica del tramo que la gran cantidad de focos generadores de mercancías y terminales intermodales presentes en la zona someten al tramo a unas solicitudes debidas a los trenes mercantes que no resultan en absoluto desdeñables.

A la dificultad para determinar las frecuencias de paso de los trenes de mercancías se añade el hecho de la liberalización del transporte ferroviario de mercancías realizada en 2005, que provoca que sobre el tramo circule una amplia variedad de vagones de mercancías y locomotoras.

Los trenes de transporte de mercancías transmiten las mayores cargas por eje sobre la infraestructura, por lo que resulta de gran interés el estudio de sus efectos sobre la capa de balasto. Para ofrecer un orden de magnitud sobre las cargas que transmiten este tipo de vehículos se muestra en la *Tabla 14* los integrantes de una posible composición de un tren de mercancías operado por Renfe Mercancías. Como cabezas tractoras se emplea una o varias locomotoras de la Serie 253, que arrastran plataformas MMP que permiten cargas contenedores o semirremolques.



Tabla 14. Material más común empleado por Renfe para el transporte de mercancías.  
(Elaboración propia a partir de los datos y figuras obtenidos de [www.renfe.com](http://www.renfe.com) y [www.listadotren.es](http://www.listadotren.es))

<b>MATERIAL MOTOR</b>	
<b>Serie 253</b>	
<i>Composición</i>	Bo'Bo'
<i>Velocidad máxima</i>	140 km/h
<i>Peso por eje</i>	21,8 t/eje
<i>Peso por eje</i>	22,5 t
<b>Plataforma MPP – Sdgkkmss</b>	
<i>Composición</i>	2'2'
<i>Velocidad máxima</i>	120 km/h
<i>Peso por eje máximo</i>	22,5 t
<i>Longitud entre topes</i>	16,44 m
<i>Empate</i>	11,20 m
	

## 5 MODELO NUMÉRICO

En el presente capítulo se realiza la descripción del modelo numérico propuesto para simular el comportamiento de la capa de balasto ferroviaria. El principal objetivo es que el modelo desarrollado permita la recolección de datos que habitualmente no es posible obtener mediante ensayos en campo o en laboratorio empleando medios convencionales.

El modelo se basa en el Método de Elementos Discretos, que supone una idealización matemática de la vida real. El método considera las fuerzas, momentos, velocidades y aceleraciones que actúan sobre cada una de las partículas en cada momento de forma individual, de forma que puede modelizar el comportamiento de un material granular mediante las interacciones entre estas partículas. Esto es precisamente lo que resulta de gran utilidad a la hora de modelizar numéricamente un material naturalmente continuo como la capa de balasto ferroviaria.

El Método de Elementos Discretos no permite representar de forma adecuada el comportamiento de elementos continuos como los carriles, las traviesas o las sujeciones. Es por ello por lo que en el modelo numérico solamente se han representado de forma directa las traviesas, debido a que son fundamentales para estudiar la capa de balasto.

El modelo se desarrolla empleando el software de código abierto **YADE** en su versión *2022.01a* (Šmilauer et al., 2021), por lo que el proceso de desarrollo se ajusta a las posibilidades y limitaciones que presenta el programa. Este software, escrito en C++, constituye un marco de trabajo que permite construir escenas y controlar el proceso de simulación mediante Python.

En primer lugar, se realizará una descripción general de las características geométricas del modelo y de los elementos empleados para representar las traviesas y el balasto. A continuación, se describen los supuestos de partida en los que se basa el modelo y se explica el proceso seguido para la consecución de la geometría deseada. Finalmente se describe el proceso de aplicación de cargas que se llevará a cabo en la aplicación práctica del modelo.

## 5.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

### 5.1.1 Configuración geométrica

El modelo nace bajo la pretensión de estudiar el comportamiento de la capa de balasto en la Red Ferroviaria de Interés General española, en particular al tramo entre Valencia y Silla. Por ello se han implementado las dimensiones de la banqueta, de la traviesa y la granulometría del balasto en función de la normativa de aplicación de Adif en España y de la realidad del tramo de estudio en la medida de lo posible. Previamente ya se ha hecho referencia a estas características en el subcapítulo “4.3 SUPERESTRUCTURA”, por lo que solamente se describirán a continuación las características del modelo implementado, remitiendo al lector al mencionado apartado para la consulta de las características reales del tramo.

Otra de las premisas bajo las que se crea el modelo es permitir tanto el desarrollo de un estudio del comportamiento de balasto bajo una única traviesa como bajo un número determinado de ellas. La búsqueda de esta versatilidad lleva a la definición de lo que se ha denominado *Unidad Básica* del modelo, que se muestra en la *Figura 24*. Una *Unidad Básica* está compuesta por la banqueta de balasto que se asocia habitualmente con una traviesa. Como se aprecia en la *Figura 24*, dado que la separación habitual entre centros de traviesas en España es de *60 cm* la *Unidad Básica* engloba la capa de balasto situada *30 cm* antes y *30 cm* después de una traviesa cualquiera. La colocación de varias *Unidades Básicas* en serie una tras otra permite la creación de un modelo multitraviesa sin realizar ninguna modificación en las etapas de creación de la muestra de balasto.

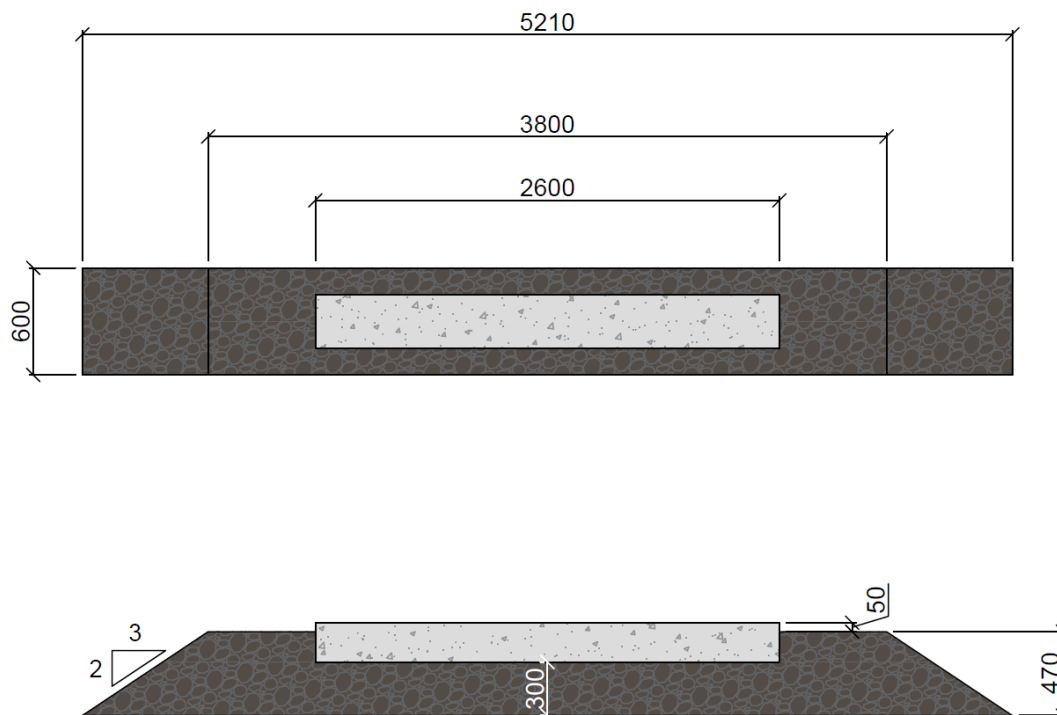


Figura 24. Descripción esquemática de una Unidad Básica del modelo. Vista en planta (superior) y vista en alzado (inferior). Dimensiones en mm. (Elaboración propia)

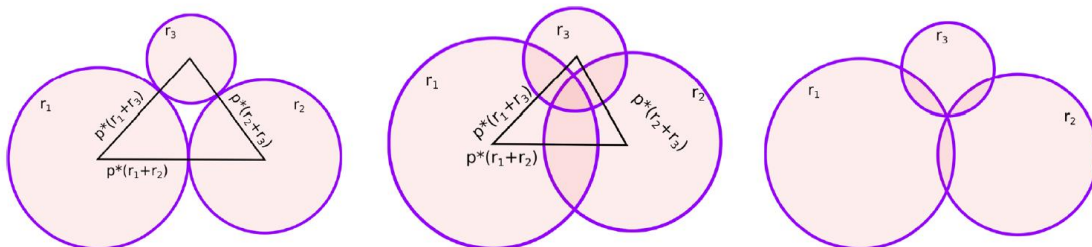
Como se ha visto anteriormente, el tramo ferroviario entre Valencia y Silla discurre en vía doble en todo su recorrido, exceptuando las estaciones y sus proximidades. A pesar de que teóricamente el concepto de la *Unidad Básica* permite la modelización de una doble vía posicionando las unidades en paralelo teniendo en cuenta la entrevía, el modelo se desarrolla para una sola vía. Esto es debido a varios factores:

- A efectos de las sollicitaciones verticales, en las que se centra fundamentalmente este trabajo, se considera que cada una de las vías se comporta de manera independiente puesto que el efecto provocado por la vía contigua es despreciable.
- Una vía doble presenta simetría respecto a su eje central, por lo que cada una de las partes debe presentar un comportamiento similar.
- En lo que respecta al Método de Elementos Discretos, la inclusión de un mayor número de partículas en el modelo penaliza el rendimiento y los tiempos de cálculo. Este efecto se acentúa si la inclusión de estas partículas no influye de forma notable en el comportamiento del modelo, como en este caso.

### 5.1.2 Balasto

El principal desafío en el desarrollo del modelo es la elección del tipo de representación de las piedras de balasto, pues su influencia en el comportamiento del conjunto y en el tiempo de cálculo no resulta en absoluto despreciable. En este caso se busca un equilibrio entre la similitud con la realidad y la sencillez, ya que el modelo planteado supone una representación a gran escala de la banqueta que involucra una gran cantidad de partículas, por lo que unas partículas excesivamente complejas penalizan en exceso el tiempo de cálculo del modelo.

Por todo ello se ha optado por el modelo propuesto en (Suhr & Six, 2020), representando cada piedra de balasto como un cúmulo de tres esferas con radios y solape variables, como se muestra en la *Figura 25*. La construcción de un cúmulo con tres esferas es la más simple que permite la trabazón entre partículas y que impide los movimientos libres en los tres ejes del espacio, lo que resulta fundamental para modelar el balasto. Esta simplicidad impide que se pueda aproximar la forma de las partículas a la de una piedra real visualmente, por lo que en lugar de eso los autores optaron por aproximar los principales descriptores de la forma del balasto comparando los obtenidos de los cúmulos generados con trabajos previos de los autores sobre muestras reales de balasto (Suhr et al., 2020).



*Figura 25. Representación simplificada de los tres tipos de cúmulos considerados. Construcción sin solape entre las esferas,  $p=1$  (Izquierda), construcción con solape,  $p<1$  (centro) y construcción con el mínimo solape posible (derecha). (Suhr & Six, 2020)*

Los descriptores analizados son: la elongación,  $e$  (*Ecuación 2a*), índice de lajas o flatness,  $f$  (*Ecuación 2b*), esfericidad,  $\psi$  (*Ecuación 2c*), y el índice de convexidad,  $c$  (*Ecuación 2d*). En dichas ecuaciones se denota por  $L$ ,  $I$ ,  $S$ , el eje más largo, intermedio y más corto, respectivamente, del mínimo paralelepípedo que envuelve completamente el cúmulo. Por otra parte,  $A$ , se corresponde con la superficie de la partícula y,  $V$ , con su volumen.

$$e = I/L \tag{2a}$$

$$f = S/I \tag{2b}$$

$$\psi = \sqrt[3]{(36\pi V^2)/A} \tag{2c}$$

$$c = V(\text{envolvente convexa})/V_{\text{total}} \tag{2d}$$

En (Suhr & Six, 2020) los autores proponen tres colecciones distintas de cúmulos construidas variando el solape entre partículas y los radios relativos de los miembros del cúmulo, conformando un total de 33 cúmulos distintos. De estas partículas los autores seleccionan 20 cúmulos que aproximan razonablemente bien los descriptores propuestos como se muestra en la *Figura 26*. Estos 20 cúmulos serán los empleados en el presente trabajo para el modelado de la capa de balasto, en el *Anejo N°2: Geometría de las partículas de balasto* se ofrece un listado con las posiciones relativas y los radios con los que se ha construido cada cúmulo.

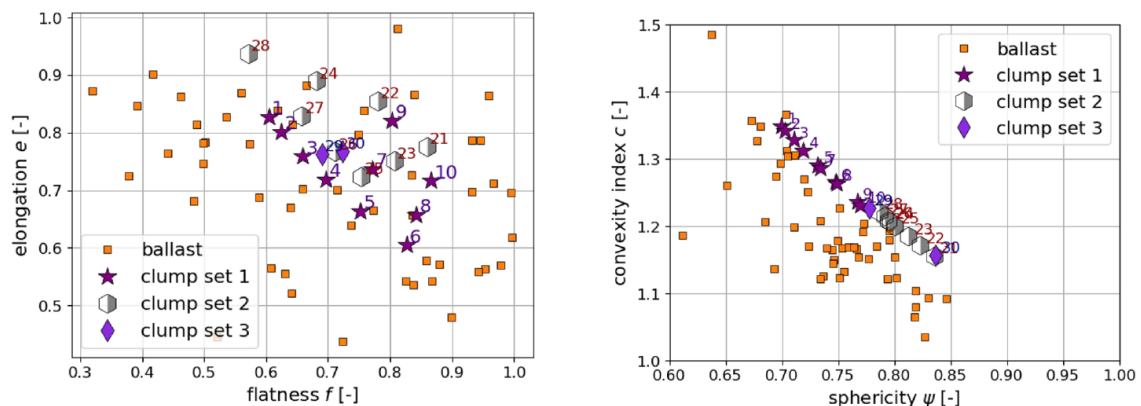
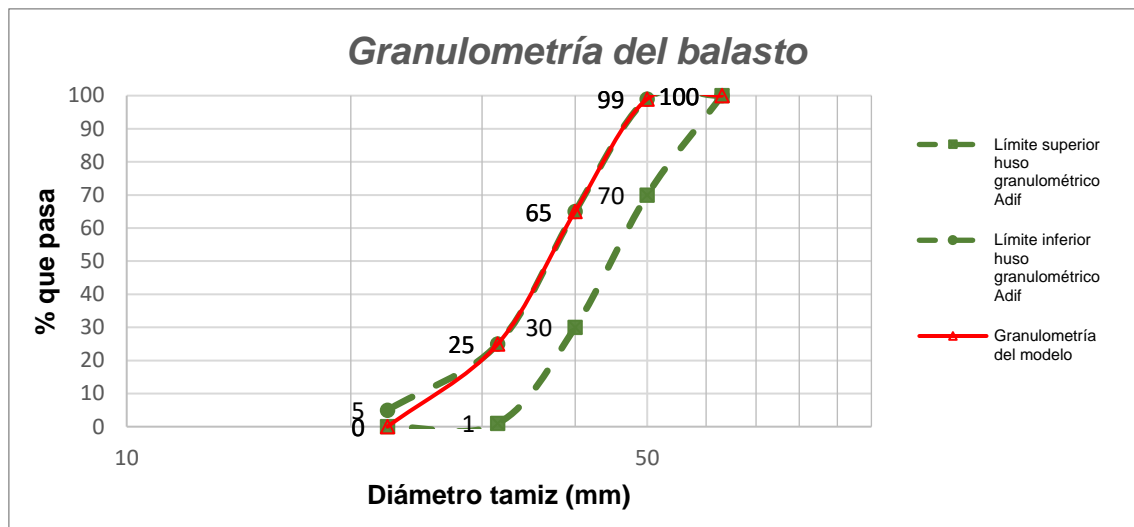


Figura 26. Comparación de los descriptores de forma propuestos entre el balasto (amarillo) y las partículas seleccionadas de cada una de las tres colecciones. (Suhr & Six, 2020)

Otro aspecto que resulta fundamental a la hora de representar las partículas de balasto es la adopción de una granulometría adecuada. Para este caso se toma como referencia el huso granulométrico admitido por Adif para el balasto. En el modelo se implementa la

curva granulométrica representada en rojo en la *Figura 27*, que se corresponde casi al completo con las partículas más finas que son aceptadas para su uso en el balasto.



*Figura 27. Representados en verde los límites del huso granulométrico aceptado por Adif para el balasto. En rojo la granulometría del balasto empleado en el modelo. (Elaboración propia)*

### 5.1.3 Traviesas

Dentro del modelo numérico las traviesas constituyen el elemento que permite la aplicación de cargas sobre la banqueta de balasto, además la medición de su descenso ante la aplicación de cargas permite realizar la validación del modelo. Como se vio en capítulos anteriores las traviesas que integran el tramo Valencia – Silla son del tipo PR-90, por lo que la traviesa implementada en el modelo la tomará como referencia.

Hay que tener en cuenta que el Método de Elementos Discretos presenta serias limitaciones a la hora de tratar con cuerpos continuos como las traviesas. Por una parte, no se puede conocer la distribución de esfuerzos dentro de la misma y por otra, como el DEM considera que todas las partículas son completamente rígidas la traviesa no presenta ningún tipo de deformación. Debido a estas limitaciones la implementación de la traviesa en el modelo de Elementos Discretos se realizará de manera simplificada.

La traviesa presenta forma de paralelepípedo, con un largo de 2600 mm, un ancho de 300 mm y una altura de 220 mm. La traviesa se compone de tres paralelepípedos, comúnmente llamados cajas, unidos de forma rígida de forma similar a los cúmulos de esferas que representan el balasto. Cada una de estas cajas tiene igual ancho y altura, pero la longitud es distinta, 847 mm para las cajas de ambos extremos y 906 mm para

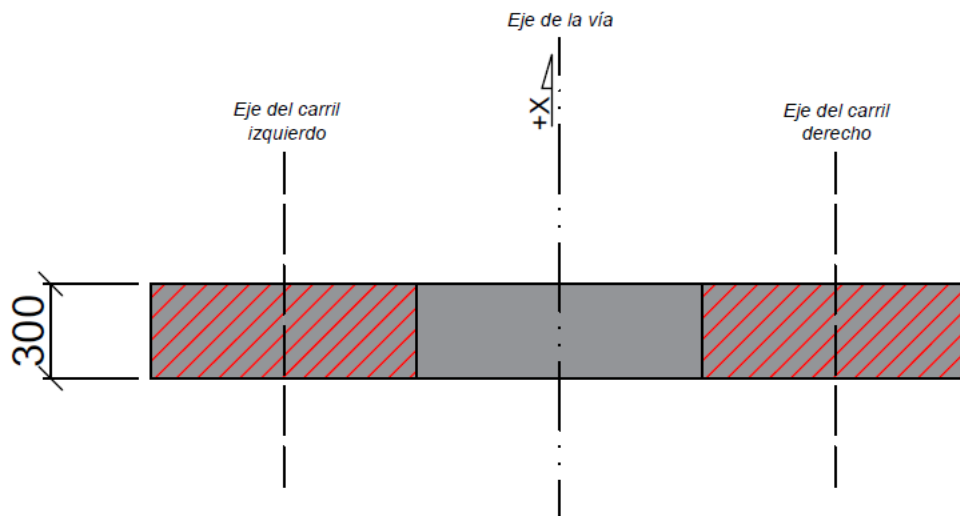
la caja central. En la *Figura 28* se ha representado la planta y el alzado de la traviesa, así como los puntos en los que se realiza la aplicación de cargas sobre la misma.

La división de la traviesa en tres cajas solidarias viene condicionada por la aplicación de las cargas del paso de los trenes sobre la misma. El software empleado únicamente permite la inclusión de fuerzas externas de tipo puntual, que se aplican sobre el centro de gravedad de los elementos. Por ello se ha realizado la división en tres segmentos de forma que se pueda considerar de forma independiente la carga aplicada sobre cada carril, así como la zona en la que se aplica.

La división de la traviesa en tres cajas unidas de forma solidaria viene condicionada por la forma en la que se aplica la fuerza que simulará el paso de los trenes. El software empleado solamente permite la adición de fuerzas externas si son de tipo puntual. Además, estas fuerzas puntuales se aplican sobre el centro de gravedad de los elementos. La longitud de cada una de las cajas se ha seleccionado de tal forma que el centro de gravedad de las cajas extremas se corresponde con la posición del centro del patín del carril, teniendo en cuenta la inclinación del mismo.



## PLANTA DE LA TRAVIESA



## ALZADO DE LA TRAVIESA

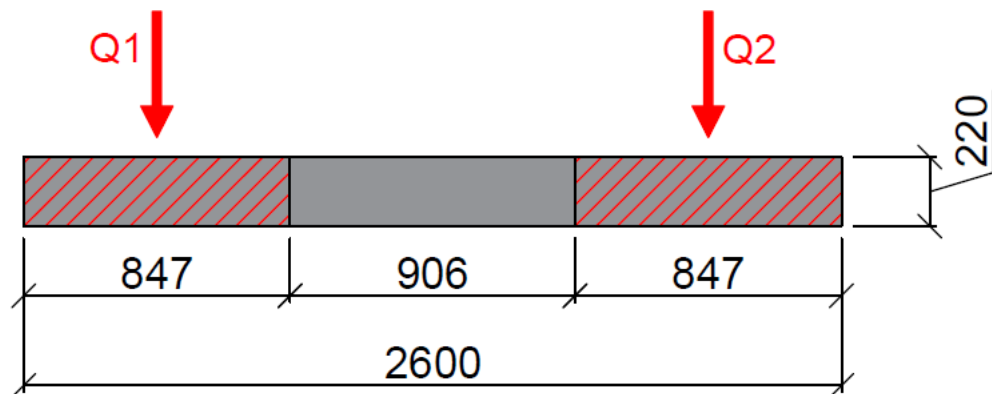


Figura 28. Planta y alzado de la traviesa, se han representado la posición  $t$

## 5.2 HIPÓTESIS DE PARTIDA

### 5.2.1 Parámetros de la simulación

Bajo esta categoría se engloban dos parámetros básicos en el Método de Elementos Discretos: el intervalo de cálculo y el amortiguamiento, *timestep* y *damping* respectivamente por sus nombres en inglés, por los que son conocidos habitualmente. Estos parámetros, a pesar de no ser conceptos físicos se encuentran estrechamente ligados al resultado final ofrecido por el modelo, es por ello por lo que su selección debe ejecutarse de forma cuidadosa.

El intervalo de cálculo es el tiempo que transcurre entre cada iteración, es decir el tiempo transcurrido entre cada proceso de cálculo de fuerzas y aceleraciones sobre las

partículas. Un intervalo de cálculo muy pequeño penaliza los tiempos de computación, mientras que un valor demasiado elevado puede provocar que se omitan contactos relevantes entre partículas, produciendo resultados irreales. Es por ello por lo que existe un intervalo de tiempo crítico que es función del tamaño, la masa y la rigidez de las partículas de la simulación. Para que una simulación sea estable es recomendable que el *timestep* se sitúe razonablemente por debajo del intervalo crítico calculado, para ello se emplea un factor de seguridad con valores situados entre 0 y 1. A efectos del presente trabajo se considera un **coeficiente de seguridad** de **0,5** que responde a un compromiso entre velocidad de cálculo y estabilidad de la simulación.

Por otra parte, el *damping*, según lo propuesto por Cundall y adaptado en (Šmilauer et al., 2021), es un amortiguamiento sin sentido físico que actúa sobre las fuerzas y velocidades de las partículas del modelo para ayudar a alcanzar un estado de reposo más fácilmente. Para simulaciones en las que se pretenden realizar simulaciones del comportamiento dinámico de las partículas, como el presente trabajo, se recomiendan valores reducidos cercanos a cero en la medida de lo posible. Por ello para el desarrollo del modelo propuesto se ha empleado un **coeficiente de amortiguamiento numérico** igual a **cero**.

### 5.2.2 Modelo de contacto

El modelo de contacto define el modo de interacción entre las distintas partículas del modelo, por lo que resulta un condicionante para el resultado final. Para el presente trabajo se empleará una ley de contacto de rigidez no lineal, la ley de **Hertz – Mindlin** simplificada a la solución de no deslizamiento entre partículas. Este modelo de contacto se basa en emplear la ley clásica de Hertz para los contactos normales y la simplificación de la ley tangencial de Mindlin considerando que no existe el deslizamiento entre las partículas en contacto.

De la comparación realizada entre distintos modelos de contacto en (Di Renzo & Di Maio, 2004) se concluye que para modelos en los que los parámetros elásticos no puedan ser evaluados con precisión, como aquellos en los que las formas son esféricas, y para modelos en los que se realice un análisis profundo del movimiento de las partículas es recomendable emplear un modelo de contacto no lineal. Este es el motivo por el que para el presente modelo se ha decidido emplear el modelo de contacto de **Hertz – Mindlin simplificado**.

### 5.2.3 Materiales

En las simulaciones de Elementos Discretos se debe asignar un material a cada uno de los elementos constituyentes del modelo. El material determina las características mecánicas que condicionarán el comportamiento del elemento al interactuar con el resto de los componentes del modelo. Las características mecánicas suelen corresponderse con parámetros considerados habitualmente en la resistencia de materiales como el Módulo de Young o el ángulo de rozamiento interno.

La cantidad de parámetros mecánicos que definen un material vienen condicionados por el propio tipo de material y por el modelo de contacto escogido. Es importante señalar que, debido a que el modelo numérico es una simplificación de la realidad, los valores de los parámetros empleados no necesariamente tienen por qué corresponderse con los valores reales del material. Para este trabajo, el conjunto de valores escogido es aquel que ha permitido validar el modelo de comportamiento a través de los datos de campo.

El modelo que se describe en este capítulo se ha desarrollado empleando el modelo de contacto Hertz – Mindlin Simplificado y un tipo de material friccional que no presenta cohesión. Se ha considerado que este tipo de material es el más adecuado para representar el balasto, que es una capa granular con partículas de una granulometría elevada que no presenta cohesión. En base a esto, los parámetros que se deben definir para cada material son: el módulo de Young o de elasticidad,  $E$ , el ángulo de rozamiento interno,  $\varphi$ , el coeficiente de Poisson,  $\nu$ , y su densidad,  $\rho$ .

En el modelo se implementan tres tipos distintos de materiales: el material que conforma las partículas de balasto, el hormigón para la traviesa y un material de contorno para los límites del modelo. Los valores de cada uno de los parámetros para cada material, que pueden consultarse en la *Tabla 15*, se han asignado en concordancia con la literatura (Ahmed et al., 2016; Irazábal González, 2017; Suhr & Six, 2017, 2020) y con el objetivo de asemejarse a los resultados obtenidos a partir de los ensayos de campo.

Tabla 15. Materiales definidos en el modelo y valores otorgados a sus principales características mecánicas. (Elaboración propia)

<b>BALASTO</b>	E (GPa)	10
	$\Phi$ (°)	46
	$\nu$	0,2
	P (kg/m <sup>3</sup> )	2660
<b>HORMIGÓN</b>	E (GPa)	30
	$\Phi$ (°)	31,5
	$\nu$	0,3
	P (kg/m <sup>3</sup> )	2500
<b>CONTORNOS</b>	E (GPa)	100
	$\Phi$ (°)	46
	$\nu$	0,2
	P (kg/m <sup>3</sup> )	2660

#### 5.2.4 Límites del modelo

Debido a la imposibilidad de realizar simulaciones de la vía completa como consecuencia de las limitaciones del Método de Elementos Discretos, se hace necesario establecer límites en el modelo, que deben interferir en la menor medida posible en la respuesta de la simulación. Debido a las características geométricas del modelo propuesto no es preciso establecer una gran cantidad de condiciones de contorno. Se han implementado dos tipos de límites en el modelo:

- **La frontera entre la capa de balasto y la capa de subbalasto**, que conforma la base de apoyo del modelo. Esta frontera se ha materializado mediante un plano horizontal de elevada rigidez, como se detalla en el apartado anterior, a efectos de sustituir el subbalasto y las capas de base de la infraestructura.
- **Los límites longitudinales del modelo**, que determinan el número de traviesas que conforman el mismo y evitan que el balasto se derrame longitudinalmente a la vez que le proporciona la rigidez longitudinal adecuada al modelo. Es por ello que estos límites se materializan mediante sendos planos verticales, normales

al eje de la vía, empleando el mismo material de contorno que para la base del modelo.

### 5.3 ETAPAS DE PREPARACIÓN

El objetivo final es obtener un modelo numérico que simule la banqueta de balasto con las características y geometría deseadas, que se han descrito previamente. Para ello resulta necesario ejecutar unas etapas de preparación que permitan la aplicación de cargas sobre el modelo para su validación y aplicación práctica.

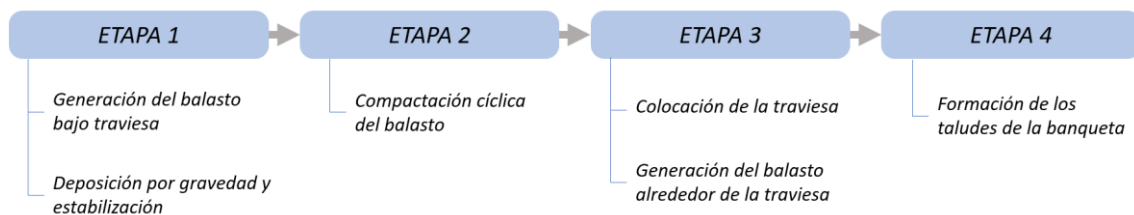


Figura 29. Etapas seguidas durante el proceso de generación del modelo. (Elaboración propia).

Estas etapas, que se resumen en la *Figura 29*, de preparación se ejecutan de forma sucesiva y se pueden aplicar tanto a un modelo con una única traviesa como a un modelo con múltiples traviesas. Para la definición de cada una de las fases se ha seguido el criterio de asimilarlas en la medida de lo posible al proceso real de puesta en obra del balasto. De esta forma, una variación en el proceso de generación puede servir como indicador de los efectos de malas prácticas o problemas en el proceso constructivo en la capacidad portante de la vía.

#### 5.3.1 ETAPA 1: Generación y deposición por gravedad

Durante la primera etapa de preparación se generan las partículas que corresponderán con el balasto bajo traviesa. Los cúmulos se generan de manera aleatoria en una caja de 600 mm x 4500 mm x 1500 mm para cada unidad básica del modelo. La generación aleatoria evita cualquier efecto externo que pueda producir un empaquetamiento regular en el comportamiento del balasto. Durante esta primera etapa se generan 22 000 cúmulos por cada unidad básica del modelo, lo que constituye un total de 66 000 esferas.

Tras la generación aleatoria, se inician una serie de iteraciones en las que las partículas se depositan libremente por gravedad dentro de unos límites establecidos, coincidentes con las dimensiones de la caja en la que se han generado previamente las partículas, que se materializan mediante planos en el modelo. Nótese que en esta etapa no se deja

que las partículas conformen los taludes de la banqueta, como sí sucede en la realidad, ya que se crearán en la última etapa de preparación por motivos que se especifican más adelante.

Llegados a este punto resulta adecuado definir el concepto de la ratio de fuerzas desequilibradas descrito en (Šmilauer et al., 2021), que rige la mayoría de los cambios entre etapas de preparación. Esta ratio se define como la suma de las fuerzas medias actuantes en cada cuerpo entre la suma de las interacciones medias entre cuerpos. Para un equilibrio perfectamente estático la suma de las resultantes de las fuerzas sobre todos los cuerpos es cero, por lo que la ratio tiende a cero conforme la simulación se estabiliza. Es por ello que se utiliza este criterio para determinar cuándo una etapa ha finalizado y se puede proceder con la siguiente.

Para considerar que la deposición por gravedad ha finalizado y se puede pasar a la siguiente etapa se deben cumplir simultáneamente dos condiciones. Por una parte, que la ratio de fuerzas desequilibradas se encuentre por debajo de un determinado umbral cercano a cero, hay que tener en cuenta que debido a la precisión de los cálculos resulta imposible alcanzar el cero. Por otra parte, se establece un umbral mínimo de iteraciones desde el inicio de la simulación, ya que al inicio el valor para la ratio de fuerzas desequilibradas es muy bajo pues aún existen pocas interacciones entre partículas.

### 5.3.2 ETAPA 2: Ciclos de compactación

La deposición por gravedad de la etapa anterior genera una muestra de balasto suelta y muy poco compacta, que no es capaz de soportar las sollicitaciones del paso de trenes. Es por ello por lo que en esta etapa se realizan una serie de ciclos de compactación que permiten alcanzar una banqueta de balasto densa, compacta y capaz de soportar las cargas al paso de los trenes sin sufrir asientos excesivos.

En cada ciclo de compactación, una placa comprime verticalmente la muestra de balasto descendiendo a una velocidad constante, una vez que la reacción sobre la placa supera un determinado umbral se inicia la carga retirando la placa hasta que la reacción sobre la misma se anula, en ese momento da inicio un nuevo ciclo de compactación si procede. Cabe mencionar que los ciclos de compactación se realizan manteniendo las partículas de balasto totalmente confinadas por las paredes entre las que se encontraban tras la deposición por gravedad. De esta forma, la aplicación de la carga se destina de forma

íntegra a la densificació del balasto, evitant el desparrame lateral del balasto que se produeix quan els laterals no se troben confinats.

El procés de compactació de la mostra queda definit completament per tres variables: Reacció màxima sobre la placa,  $F_n$ , velocitat de descens de la placa,  $v$ , i nombre de cicles de compactació,  $N_{cyc}$ . Per a l'execució del model se han pres com a valors fixos la velocitat de descens de la placa i la màxima reacció sobre la mateixa. El nombre de cicles se ha variat fins a aconseguir una compactació adequada. Els valors emprats en el model final són els següents:

- Reacció màxima,  $F_n = 50\,000\text{ N}$
- Velocitat de descens,  $v = 0,1\text{ m/s}$
- Nombre de cicles de compactació,  $N_{cyc} = 200$

Aquesta etapa pretén semblar-se al pas d'un rodillo compactador que es realitza sobre la primera capa de balasto posada en obra, abans de col·locar les travesses. Si bé és cert que el nombre de passes de la màquina en la realitat no arriba a un nombre tan alt de cicles com en aquest cas. Això és degut a que aquesta etapa serveix també per oferir el grau de consolidació que es obtenen en la realitat després de realitzar operacions com el bateo i la estabilització dinàmica de la via, que tenen un fort impacte en el grau de compactació de la capa de balasto. Aquestes operacions no s'han inclòs de forma directa en el model ja que resulten fenòmens complexos que no són l'objectiu d'estudi del present treball, per la qual cosa s'ha optat per una solució simplificada en la qual se consideren totes les operacions de consolidació de forma global.

### 5.3.3 ETAPA 3: Colocació de travessa i balasto restant

Una vegada finalitzats els cicles de compactació se procedeix a la col·locació de les travesses i el balasto que les rodeja. Abans de l'inici d'aquesta fase se controla que la capa de balasto resultant de les operacions anteriors ha arribat a un espesor mínim de 30 cm.

Les travesses se posicionen simplement sobre la capa de balasto creada, deixant que s'asentïn per gravetat. Les partícules de balasto que les envolten se creen novament de forma aleatòria en una caixa sobre les travesses, per cada unitat bàsica se creen 10 000 cúmuls, és a dir, 30 000 noves esferes en total. Aquestes noves

partículas deben depositarse nuevamente por gravedad hasta que la ratio de fuerzas desequilibradas alcanza un umbral razonable que permite considerar que se ha alcanzado el equilibrio estático. En este instante se eliminan aquellas partículas que se encuentren situadas por encima de la traviesa, dejando un resguardo respecto a la cara superior de la traviesa de 50 mm, de forma que no se encuentra totalmente embebida en el balasto.

Sobre estas nuevas partículas no se realizarán nuevamente ciclos de compactación, ya que se considera que la resistencia vertical de la vía no tiene una fuerte correlación con el grado de compactación del balasto alrededor de la traviesa, que realiza funciones de resistencia longitudinal y transversal.

#### 5.3.4 ETAPA 4: Finalización del modelo

En este punto el modelo se encuentra compactado y con todos los elementos necesarios para la aplicación de cargas en su lugar. Para lograr que la representación sea lo más fiel posible al comportamiento de la banqueta de balasto en la realidad se eliminan las paredes que contenían lateralmente el balasto. De esta forma se permite que el balasto caiga libremente y se formen los taludes naturales del material. Durante este proceso se comprueba que los taludes obtenidos se encuentran dentro de los valores deseados.

De nuevo se realizan iteraciones hasta que la ratio de fuerzas desequilibradas se aproxima razonablemente a cero. En ese momento se da por finalizado el proceso de preparación de la muestra de balasto y puede dar comienzo la aplicación de cargas.

## 5.4 APLICACIÓN DE CARGAS

### 5.4.1 Distribución de cargas

La carga transmitida por el eje de un tren no recae completamente sobre una sola traviesa, sino que se distribuye por medio del carril a lo largo de varias traviesas, alcanzando su valor máximo en el punto sobre el que se encuentra situado el eje y decreciendo con la distancia. Para el presente trabajo se emplea la distribución de cargas propuesta en (Ramunas et al., 2014), donde se considera que la carga total de un solo eje se distribuye en su totalidad a lo largo de cinco traviesas, como se puede apreciar en la *Figura 30*.



De esta forma, la traviesa situada inmediatamente bajo la carga puntual soporta el 40% de la carga total, las dos traviesas adyacentes un 25 % del total de cada una y las dos traviesas más alejadas solamente un 5% de la carga total.

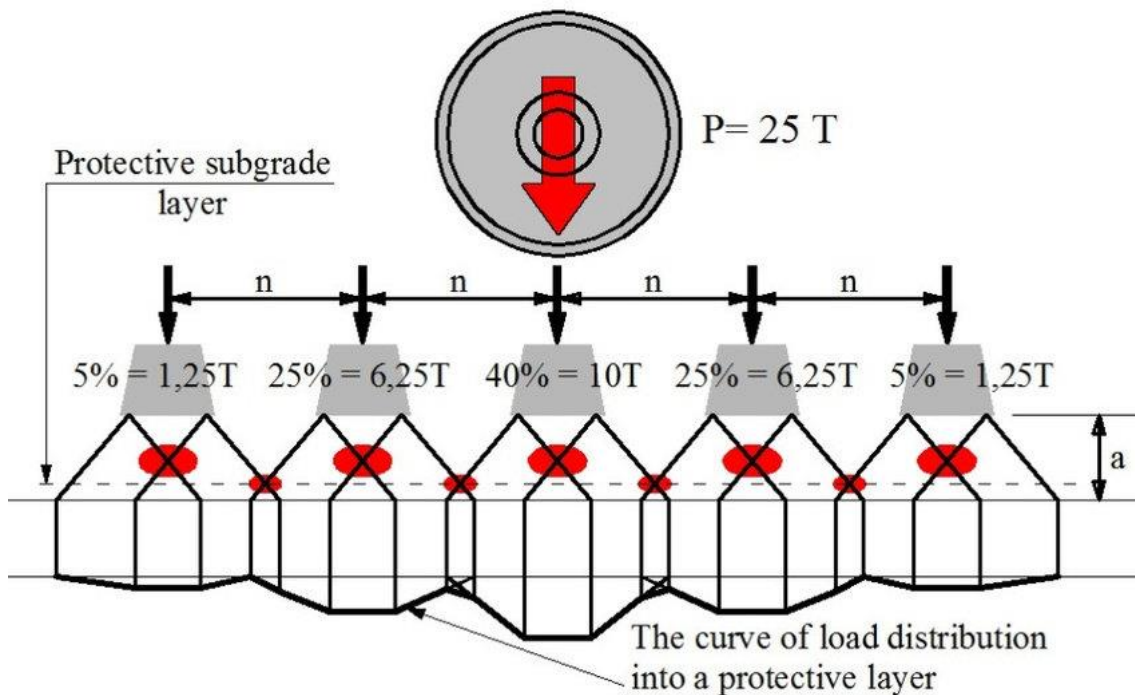


Figura 30. Distribución de una carga puntual a través de las traviesas hacia la capa de balasto. (Ramunas et al., 2014).

#### 5.4.2 Carga estática

La aplicación de una carga estática se constituye como el método más simple para determinar el comportamiento de la capa de balasto, aunque se encuentra alejado de la realidad. Se ejecuta mediante la aplicación de una carga  $Q$  sobre el centro de gravedad de las cajas que conforman los extremos de la traviesa, tal y como se muestra en la Figura 28. La carga  $Q_i$  que se aplica sobre cada carril se determina por medio de la Ecuación 3, donde,  $P$ , es la carga por eje transmitida por material rodante y,  $R$ , es el porcentaje de reparto en función de la traviesa considerada.

$$Q_i = P \times 0,5 \times \frac{R}{100} \quad (3)$$

Debido a la independencia entre las cargas aplicadas en las cajas de los extremos de las traviesas, existe la posibilidad de aplicar cargas diferenciales, de esta forma se considera el efecto de una posible concentración de la carga sobre un lado de la traviesa debido a defectos de la vía.

### 5.4.3 Carga cuasi – estática

La carga transmitida por un tren en circulación dista mucho de ser una carga estática, la velocidad, el estado del material rodante y las imperfecciones de la vía juegan un papel fundamental que producen que las cargas transmitidas sean mayores que las teóricas estáticas debidas al peso propio del tren. Debido a esto, surge el concepto de carga cuasi – estática, que considera que la carga transmitida al paso de un tren es la carga estática multiplicada por un coeficiente de mayoración,  $\alpha$ , que tiene en cuenta los efectos de la velocidad y los defectos de vía.

En la literatura existen multitud de criterios que se han ido desarrollando a lo largo de los años para determinar el valor del coeficiente  $\alpha$ , pero para este trabajo se empleará el criterio propuesto por Eisenmann, 1969. Según el autor, el coeficiente de mayoración,  $\alpha$ , se puede determinar mediante la expresión mostrada en la *Ecuación 4*, donde solamente se emplean tres factores que se definen a continuación:

- **El factor estadístico,  $t$** , introduce el concepto de una distribución normal para determinar la variabilidad de la carga. Para el modelo se emplea un factor  $t = 3$
- **El parámetro de calidad de la vía,  $S$** , que tiene en cuenta el mantenimiento al que se somete la vía y el grado de imperfecciones esperables en la misma. Para el modelo se toma  $S = 0,15$ , valor de referencia para vías principales y de alta velocidad.
- **El parámetro de velocidad,  $\phi$** , que pondera los valores anteriores en función de la velocidad de paso del tren y si se trata de un tren de mercancías o de viajeros. Este factor se determina para cada caso en función de la velocidad considerada.

$$\alpha = 1 + t \times S \times \phi \quad (3)$$

Debido a que, en esencia, la carga cuasi – estática no es más que una carga estática puntual mayorada, el método de aplicación en el modelo es similar al considerado para la carga estática. Simplemente se multiplica el valor de  $Q_i$  obtenido por el reparto de cargas por el coeficiente de mayoración correspondiente.

### 5.4.4 Carga lateral: STPT

Los ensayos de carga lateral tienen como finalidad determinar la resistencia lateral de la vía ante las sollicitaciones externas. Para estimar esta resistencia el método más

empleado es la realización de ensayos SPTP, *Single Tie Push Test* por sus siglas en inglés. Este ensayo se ejecuta soltando la traviesa de sus sujeciones y aplicando carga lateral a la misma para medir su desplazamiento. Este método se ha impuesto frente a ensayos en los que se aplica carga lateral sobre un conjunto de traviesas por la sencillez del equipo necesario para ejecutarlo, la facilidad de recuperación del estado inicial de la vía y la buena correlación de los resultados obtenidos con la realidad.

En el modelo, la aplicación de carga lateral sobre la traviesa se implementa mediante la aplicación de una fuerza horizontal, sobre el centro de gravedad de una de las cajas externas de la traviesa, que la empuja hacia el exterior de la capa de balasto. La ejecución del mismo proceso con diferentes valores de carga lateral permite determinar el límite de la resistencia lateral de la capa de balasto del modelo.

#### 5.4.5 Carga dinámica

En todos los casos anteriores las solicitaciones consideradas sobre la traviesa permanecían invariantes a lo largo del tiempo, algo que se encuentra alejado de la realidad de un tramo ferroviario real, pero que nos permite obtener datos valiosos. Como complemento a estos casos, se desarrolla la aplicación de una carga dinámica que varía con el tiempo en función de las dimensiones y velocidad del material motor que circule por la vía.

Para el presente trabajo se contemplan dos posibilidades, la simulación del paso de un solo eje por la vía y la simulación del paso de una unidad completa de la *Serie 447* utilizada en servicios de cercanías. En ambos casos se parte de la distribución de carga sobre la traviesa representada en la *Figura 31*, que permite determinar la longitud de vía afectada por el paso de cada eje del tren, así como la magnitud de la carga soportada en función de la distancia al eje. De esta forma, mediante una función a trozos que interpola los valores definidos se puede aplicar una carga dinámica sobre la traviesa que varía de forma continua en función del tiempo y la velocidad de paso de cada tren.

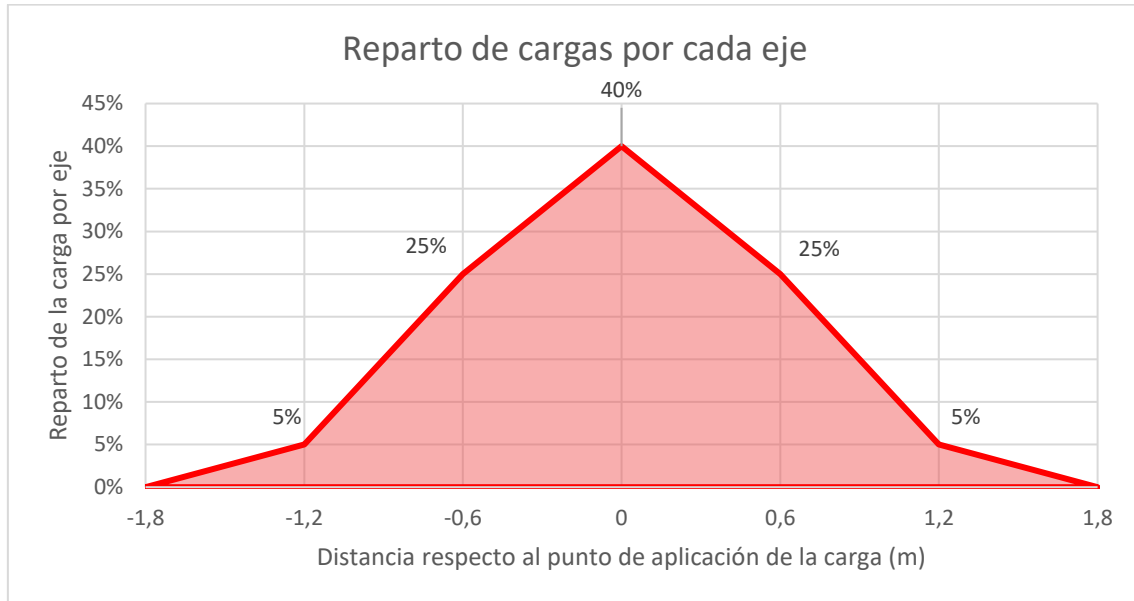


Figura 31. Representación de la distribución de la carga de cada eje de un tren a lo largo de la vía, tomando como referencia el punto de aplicación de la carga. (Elaboración propia):

Para el caso de un solo eje basta con aplicar la distribución de carga mostrada en función de la distancia del eje a la traviesa. Sin embargo, en la simulación del paso de una unidad completa de la *Serie 447* la proximidad de los ejes en los bogies provoca que exista solape entre las cargas transmitidas por ejes distintos, por lo que se deben tener en cuenta sus efectos en conjunto. La geometría empleada para representar un tren de la *Serie 447* es la mostrada en la *Tabla 9* del subapartado 4.4.1 *Servicios del núcleo de cercanías de Valencia*. La distribución de cargas que actúa sobre la vía debido al paso del tren se muestra en la *Figura 32*, nótese que el solape entre cargas solamente se produce levemente entre ejes de un mismo bogie. Por otra parte, el peso por eje no es constante, siendo mayor en las cabezas tractoras que en los ejes pertenecientes al coche intermedio, debido a que estos últimos no son ejes motores.

**Distribución de cargas de un tren Serie 447**

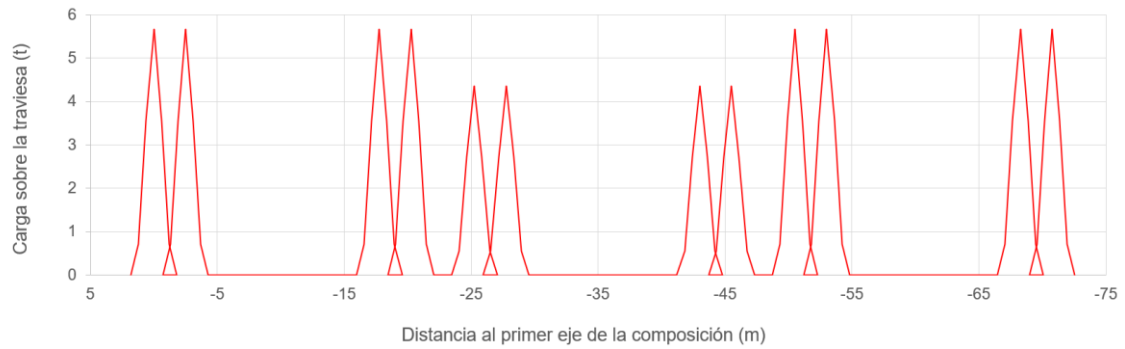


Figura 32. Distribución completa de las cargas transmitidas a la vía por un tren de la Serie 447 de Renfe, como referencia se ha tomado el primer eje de la composición. (Elaboración propia).

En último lugar cabe destacar que la carga por eje que se ha empleado para la simulación de la carga dinámica es la carga estática por eje del tren mayorada según el criterio de Eisenmann para representar los efectos dinámicos provocados por la velocidad y las imperfecciones de vía. Todos los casos se inician con la primera traviesa situada a 2 m del primer eje del tren, de forma que se parte de un estado de reposo.

## 6 APLICACIÓN PRÁCTICA

El objetivo de este capítulo es aplicar el modelo de comportamiento previamente desarrollado al tramo ferroviario entre Valencia y Silla, empleando para ello las cargas transmitidas por el material rodante que circula por el mismo. El empleo del Método de Elementos Discretos permite analizar los efectos sobre la capa de balasto de manera profunda y detallada, que no se puede alcanzar mediante ensayos de campo.

Para el análisis de las principales acciones transmitidas por el material rodante a la capa de balasto se han empleado tres modelos con distinto número de traviesas, concretamente con una traviesa, tres traviesas y cinco traviesas. De esta manera es posible analizar los resultados de una manera rápida y eficiente empleando el modelo de traviesa única que posteriormente se pueden extrapolar y comparar con los resultados de los modelos multitraviesa, más cercanos a la realidad, para observar las posibles diferencias de comportamiento.

### 6.1 VALIDACIÓN

El proceso de validación del modelo permite determinar que las distintas hipótesis y simplificaciones que se han efectuado durante el proceso de desarrollo del modelo son válidas y adecuadas para aproximar de manera razonable el comportamiento real de la capa de balasto. Para el presente trabajo, la validación del modelo numérico desarrollado se realiza mediante la comparación de la rigidez del modelo ante la aplicación de cargas con los resultados obtenidos mediante ensayos de campo en el tramo Valencia – Silla, en un desvío próximo a la estación de Catarroja según se ha descrito en el *Capítulo 3*.

La *Tabla 16* muestra las rigideces obtenidas para cada uno de los seis golpes realizados sobre traviesas situadas en plena vía, a continuación del desvío mencionado. Debido a que el modelo pretende representar fundamentalmente el comportamiento del tramo en plena vía se considera adecuada la elección de estas tres traviesas como mecanismo de comparación. Como puede deducirse a partir de los datos de la *Tabla 16*, el valor de la rigidez de una vía en servicio puede resultar muy variable. Por ejemplo, en la traviesa 101 se obtienen rigideces en el entorno de los 75 kN/mm, en la 102 estos valores descienden hasta el entorno de los 65 kN/mm, mientras que para la traviesa 103 la mayoría de los golpes arrojan valores por encima de los 160 kN/mm. Es por esta variabilidad por lo que el modelo se considerará válido cuando aproxime el orden de

magnitud de la mayoría de estos resultados, renunciando a obtener resultados precisos que no podemos obtener mediante los ensayos de campo.

Tabla 16. Rigideces deducidas a partir de los ensayos de campo en traviesas situadas en plena vía. (Elaboración propia).

TRAVIESA		Rigidez (kN/mm)
Traviesa 101	Golpeo nº1	79,47
	Golpeo nº2	71,60
	Golpeo nº3	71,57
	Golpeo nº4	74,94
	Golpeo nº5	72,91
	Golpeo nº6	71,66
Traviesa 102	Golpeo nº1	103,16
	Golpeo nº2	103,14
	Golpeo nº3	66,50
	Golpeo nº4	67,40
	Golpeo nº5	62,00
	Golpeo nº6	62,02
Traviesa 103	Golpeo nº1	167,79
	Golpeo nº2	162,81
	Golpeo nº3	163,30
	Golpeo nº4	164,42
	Golpeo nº5	73,64
	Golpeo nº6	85,03

En la *Tabla 17* se ofrece una relación de las rigideces obtenidas con el modelo propuesto, medidas a partir del descenso de la traviesa tras la aplicación de distintos tipos de solicitaciones. Para las solicitaciones estáticas se ha considerado el descenso una vez el modelo se ha estabilizado, mientras que para las dinámicas se ha considerado el descenso instantáneo en el momento de aplicación de la carga máxima. Como se puede observar, al definir un modelo de contacto no lineal entre las partículas, las rigideces aumentan al aumentar las cargas que soportan las partículas.

Tabla 17. Rigideces del modelo numérico ante distintos tipos de carga. (Elaboración propia).

SOLICITACIÓN		DESCENSO TRAVIESA (mm)	RIGIDEZ VERTICAL (kN/mm)
TIPO	MAGNITUD (kN)		
Estática	56,72	0,937	60,5
Estática	90,00	1,315	68,4
Estática	135,60	1,733	78,2
Estática	140,60	1,795	78,3
Estática	145,68	1,833	79,5
Dinámica	86,00	0,763	112,7
Dinámica	66,40	0,749	88,1

Al realizar la comparativa entre las rigideces obtenidas a partir de las mediciones de campo y las rigideces proporcionadas por el modelo se puede concluir que la aproximación resulta razonable y que las rigideces se engloban dentro de un mismo orden de magnitud. Es por todo lo expuesto anteriormente que el modelo numérico desarrollado se considera válido, procediendo a la obtención de resultados que muestren el comportamiento de la capa de balasto del tramo entre Valencia y Silla.

## 6.2 SOLICITACIÓN ESTÁTICA

### 6.2.1 Descripción

Durante este caso de carga se somete la traviesa a una carga estática, correspondiente al peso por eje del tren considerando el reparto de cargas expuesto en el capítulo anterior, de forma que una única traviesa no soporta el peso completo del eje. Durante la aplicación de esta solicitud se pueden distinguir dos fases claramente, la primera se corresponde con la aplicación de la carga sobre la traviesa que provoca un descenso brusco de la misma que es amortiguado por la capa de balasto, una vez disipada la energía del impacto inicial comienza la segunda fase, en la que el modelo es estable y la traviesa ya no desciende, este último será el descenso de traviesa considerado en las solicitudes estáticas y cuasiestáticas.

Como se muestra en la *Tabla 18*, se han realizado cuatro casos bajo distintas condiciones, lo que permite realizar la comparación entre los mismos. Un modelo de traviesa única resulta versátil para realizar varios casos de carga con tiempos de cálculo reducidos, a la vez que permite un análisis de resultados más intuitivo y sencillo. Sin embargo, la realidad en el tramo es bien distinta, las traviesas no se encuentran aisladas y forman un conjunto con la capa de balasto. Esto ha condicionado la realización de dos modelos multitraviesa, con tres traviesas y con cinco traviesas que permiten estudiar las



diferencias de comportamiento con el modelo de traviesa única y determinar el alcance de los efectos de las solicitaciones sobre la capa de balasto.

Por estos motivos, el modelo de traviesa única será empleado como base de comparación entre multitud de estados de carga, cuyos resultados podrán trasladarse a un emparrillado completo mediante la comparación de los resultados obtenidos en los modelos multitraviesa.

Tabla 18. Casos de carga ejecutados bajo solicitación estática. (Elaboración propia).

Número de traviesas del modelo	Tipo de tren	Carga por eje
1 traviesa	Mercancías	22,5 t/eje
	Cercanías 447	14,18 t/eje
3 traviesas	Mercancías	22,5 t/eje
5 traviesas	Mercancías	22,5 t/eje

### 6.2.2 Descenso de traviesa

La *Figura 33* muestra la comparativa entre el descenso de la traviesa debido a la carga de un tren de mercancías y el descenso debido a un tren de cercanías en un modelo con una única traviesa. En ambos casos se observa cómo se produce un movimiento oscilante de la traviesa tras la aplicación de la carga producido por el efecto amortiguador de la capa de balasto que poco a poco disipa la energía del impacto inicial hasta que se alcanza la estabilidad y la traviesa alcanza un valor de descenso estable a partir de los 100 ms. También se puede observar cómo, en ambos casos, en los instantes consecutivos a la aplicación de la carga se alcanzan temporalmente valores entorno a un 15 - 20% superiores al valor final alcanzado tras la estabilización.

Como cabría esperar, el descenso producido por el tren de mercancías es mayor que el producido por el de cercanías, *0,937 mm* frente a *1,315 mm* respectivamente. Estos valores sugieren que el incremento en la carga no se traduce en un incremento proporcional en el descenso de la traviesa. Destaca como a pesar del incremento en la carga el tiempo necesario para alcanzar un valor estable resulta muy similar en ambos casos, si bien es cierto que en el caso del tren de mercancías el descenso es más abrupto respecto al tiempo transcurrido, lo que a priori puede provocar un mayor desgaste sobre las piedras de balasto.

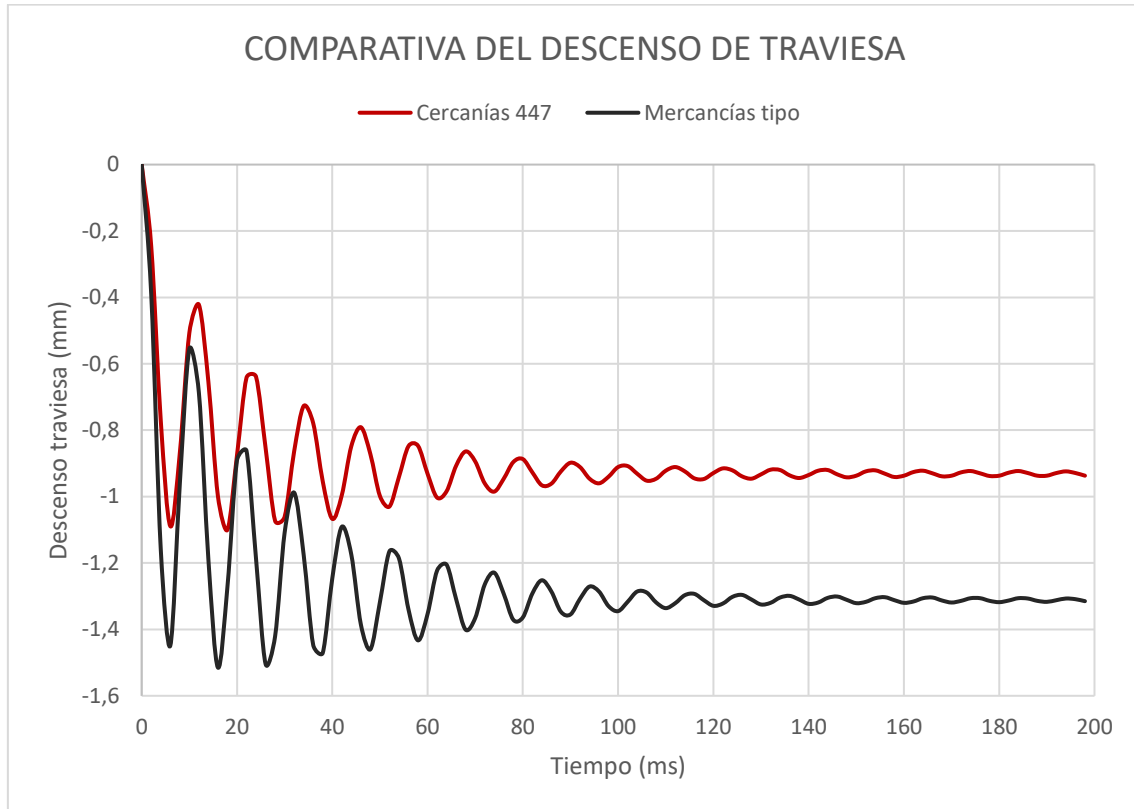


Figura 33. Comparativa entre el descenso de una traviesa bajo la solicitud estática de un tren de cercanías y bajo la solicitud de un tren de mercancías. (Elaboración propia).

### 6.2.3 Desplazamiento del balasto

Una de las consecuencias principales del paso de trenes sobre la vía y el descenso de las traviesas es el desplazamiento de las piedras que conforman la capa de balasto. A continuación, se realiza un análisis de los movimientos que se producen en la capa de balasto debido a la aplicación de una carga estática, comparando la diferencia entre trenes de cercanías y trenes de mercancías.

#### Desplazamiento total

La Figura 34, permite conocer la magnitud y la dirección de los desplazamientos de las partículas de balasto a lo largo del proceso de estabilización del modelo bajo la acción de un tren de mercancías, de su análisis se puede recabar información valiosa sobre el proceso de absorción de impactos por parte de la capa de balasto. Es posible observar cómo, al inicio, la mayoría del desplazamiento tiene lugar en la zona bajo traviesa. El descenso de estas piedras fuerza al balasto de las hombreras a desplazarse hacia el exterior en los instantes posteriores, alejándolo de la traviesa y provocando un leve hinchamiento en los alrededores de la traviesa.

Para un tiempo de  $0,198$  s, correspondiente con el estado final del modelo, se aprecia como las piedras de balasto de la zona bajo traviesa han descendido siguiendo pequeñas ondulaciones, aunque cuanto más próximas se encuentran a los extremos de la traviesa más evidente se hace el desplazamiento del balasto hacia los laterales de la banqueteta. Ya en la zona de las hombreras es mucho más claro cómo el balasto se ha desplazado hacia el exterior. Del análisis de estos factores se puede concluir que el descenso de la traviesa se debe en gran medida al desplazamiento de las piedras de balasto hacia los laterales, expulsándolas del área bajo la traviesa y provocando el derrame lateral y el hinchamiento de la capa de balasto, que pueden explicar la existencia de una pequeña deformación plástica entre distintas aplicaciones de carga, más allá de la rotura de las partículas.

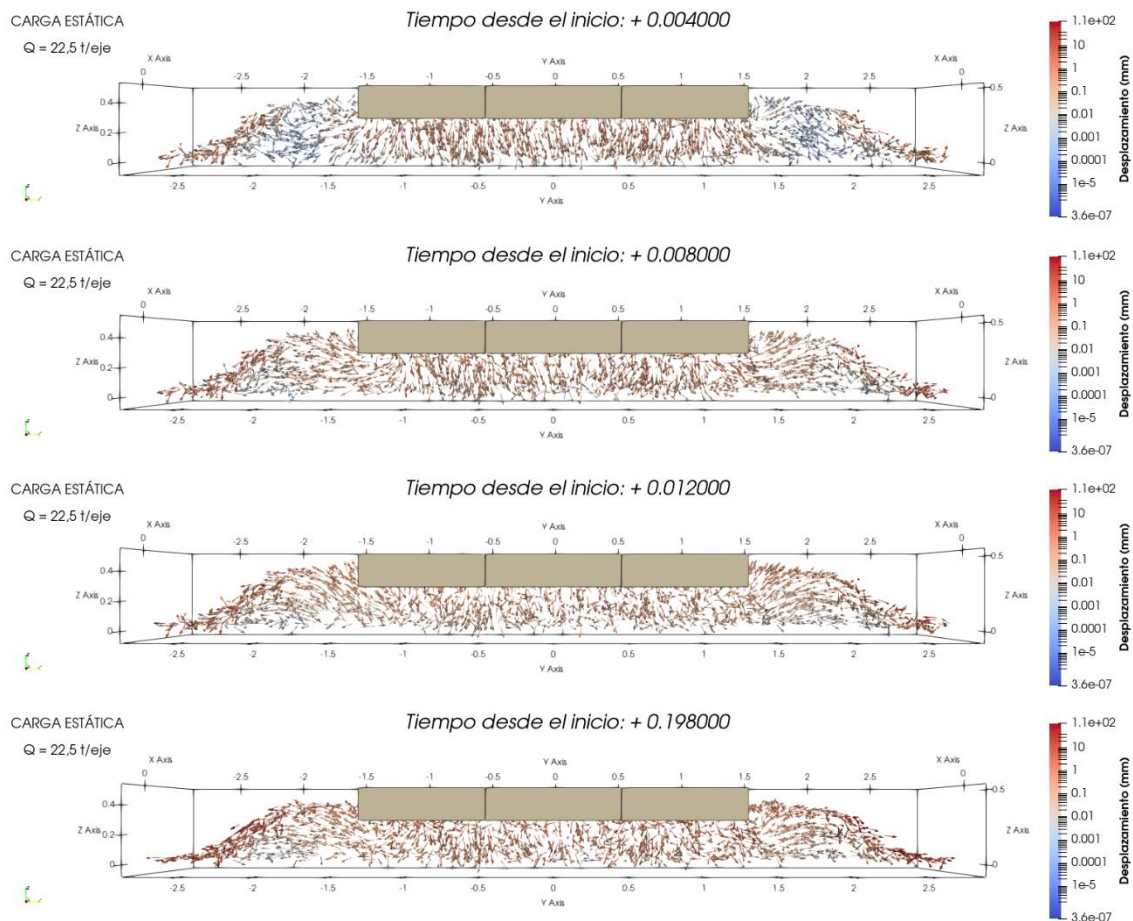


Figura 34. Evolución de la magnitud total del desplazamiento de las partículas de balasto bajo la carga de un tren de mercancías. (Elaboración propia).

La Figura 35 muestra el estado final de los desplazamientos totales para el caso de un tren de cercanías. Cualitativamente, los efectos producidos sobre las partículas de balasto resultan similares a los del tren de mercancías, sin embargo, la magnitud de los

desplazamientos producidos es menor como cabría esperar. Aunque en ambos casos existen pocas partículas que se han desplazado menos de 0,01 mm, en el caso del tren de cercanías se puede apreciar como existe un mayor número de partículas apenas movilizadas, representadas en azul en las Figuras. Estas partículas que prácticamente permanecen estáticas se localizan sobre la zona inferior de las hombreras.

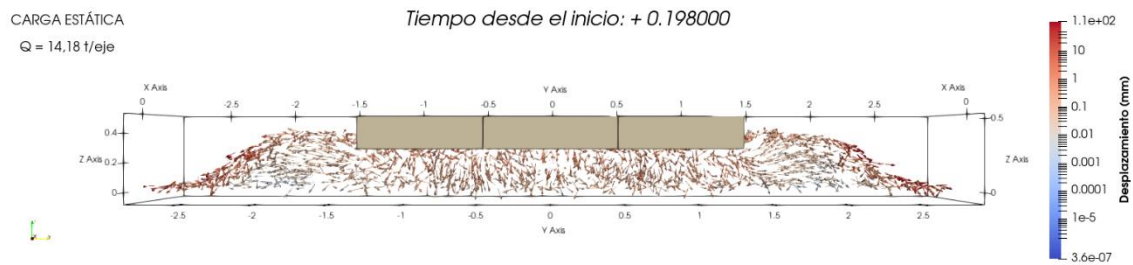


Figura 35. Desplazamientos finales de las partículas para un tren de cercanías (Elaboración propia).

### Desplazamiento vertical (Eje Z)

Si se aísla el desplazamiento de las partículas en el eje vertical, como se muestra en la Figura 36 para el caso de un tren de mercancías, se puede observar cómo, obviando el desprendimiento de las partículas sueltas en los taludes, la mayoría del desplazamiento se ha producido en la zona situada inmediatamente bajo la traviesa. En esta zona las partículas descienden algo más de 1 mm, lo que se corresponde en gran medida con el descenso sufrido por la traviesa. El valor del descenso de las partículas se reduce progresivamente hasta alcanzar las partículas de la base que no pueden descender y que permanecen estables verticalmente. Observando la vista en planta, donde claramente se aprecia la zona de apoyo de la traviesa por la fuerte coloración azul de las partículas, destaca el hecho de que el descenso de las partículas bajo la traviesa no es homogéneo, sino que presenta importantes heterogeneidades, esto se explica por el diferente grado de contacto que tienen las partículas con la traviesa al ser la superficie de la banqueta irregular.

Como añadido, es notable como no todas las partículas bajo la traviesa han descendido, pues existen algunas que han sido arrastradas hacia la superficie a causa del descenso del resto de partículas. Otro aspecto que no se debe pasar por alto son las leves elevaciones de las piedras de balasto situadas inmediatamente tras los extremos de la traviesa, que producen el leve hinchamiento que se comentaba anteriormente. Los ascensos son del orden de los 0,2 mm en el caso de un tren de mercancías.

CARGA ESTÁTICA  
 $Q = 22.5 \text{ t/eje}$

Tiempo desde el inicio: + 0.198000

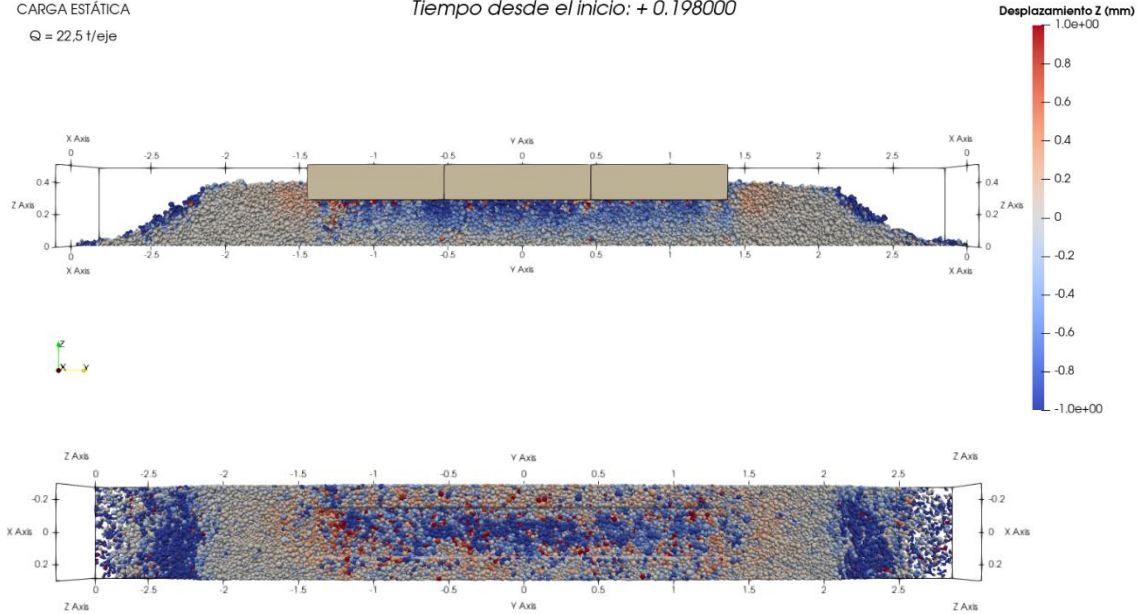


Figura 36. Vista en una sección por el centro de la traviesa en alzado (arriba) y una vista en planta (abajo) de los desplazamientos verticales del balasto para un tren de mercancías. (Elaboración propia).

Un corte longitudinal a través del eje de la vía, como el mostrado en la Figura 37, permite corroborar los hechos mencionados con anterioridad sobre el desplazamiento de las partículas. Además, permite mostrar como el desplazamiento de las partículas cercanas a los límites transversales del modelo apenas presentan desplazamiento, lo que puede ser debido a efectos de contorno.

CARGA ESTÁTICA  
Q = 22,5 t/eje

Tiempo desde el inicio: + 0.198000

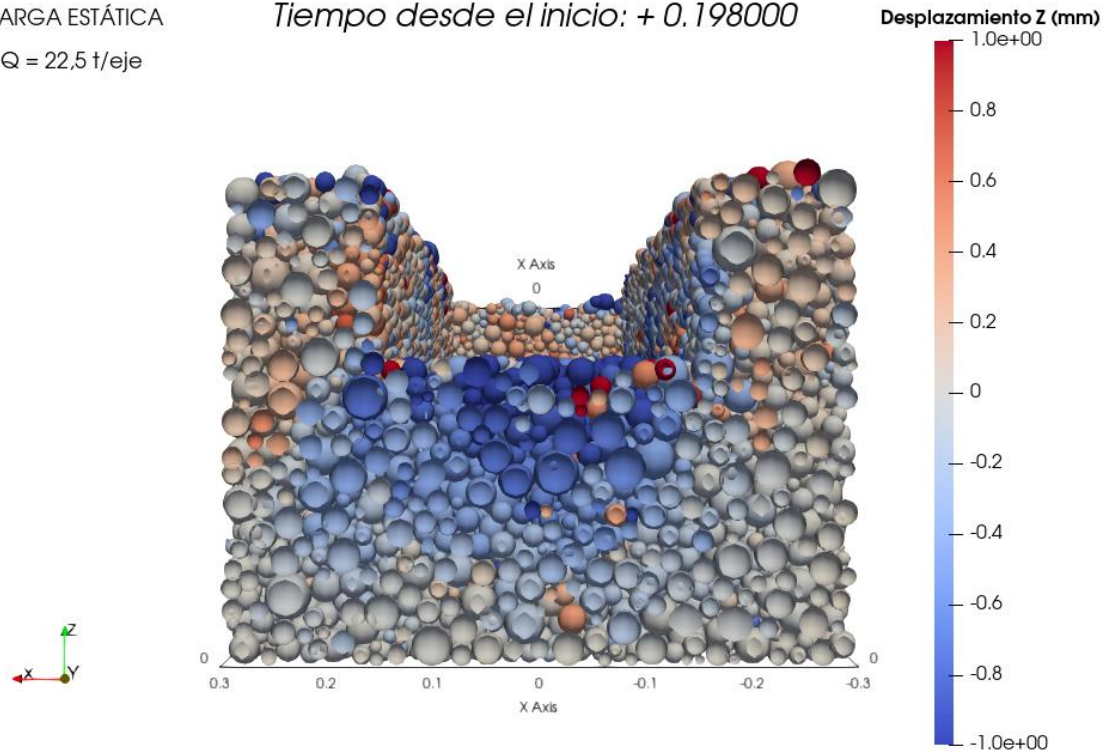


Figura 37. Corte longitudinal de la capa de balasto por  $Y=0$ , que muestra los desplazamientos verticales de las partículas. (Elaboración propia).

### Desplazamiento transversal (Eje Y)

La otra mayor componente de los desplazamientos de las partículas es el desplazamiento en el eje transversal de la vía. Obviando nuevamente los desplazamientos de las partículas que se desprenden en la superficie del talud, los mayores desplazamientos transversales se producen en las zonas extremas de la traviesa, como se muestra en la *Figura 38*. Estos desplazamientos son del orden de los 5 mm para un tren de mercancías, lo que resulta un desplazamiento significativo para las piedras de balasto.

CARGA ESTÁTICA  
Q = 22,5 t/eje

Tiempo desde el inicio: + 0.198000

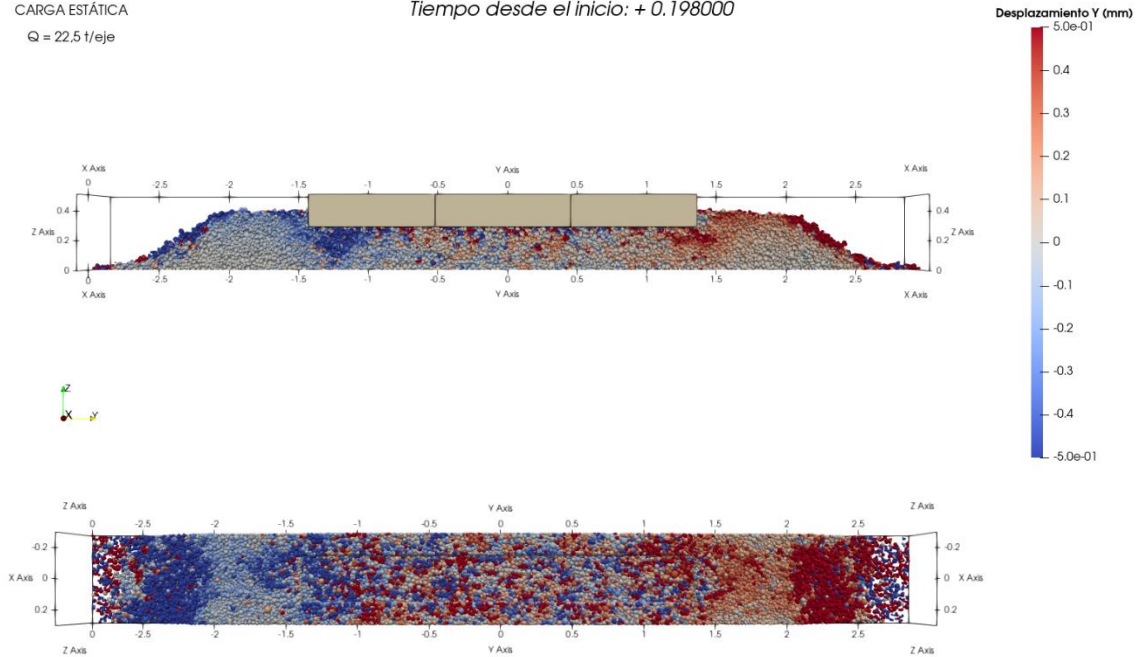


Figura 38. Vista en una sección por el centro de la traviesa en alzado (arriba) y una vista en planta (abajo) de los desplazamientos verticales del balasto para un tren de mercancías. (Elaboración propia).

#### 6.2.4 Velocidades

En una sollicitación estática las velocidades de las partículas tras la estabilización carecen de relevancia en el estudio del comportamiento del balasto. Sin embargo, se pueden estudiar las velocidades impuestas sobre las partículas de balasto durante el inicio de la aplicación de carga y el intervalo de tiempo que transcurre hasta alcanzar la estabilización, en la *Figura 39* se muestran extractos de los instantes más significativos durante el proceso de disipación de la fuerza. Es posible observar cómo de forma análoga a lo que ocurre con los desplazamientos las primeras partículas en adquirir una velocidad destacable son aquellas situadas inmediatamente bajo la traviesa, en el instante siguiente estas partículas fuerzan el movimiento del balasto situado en la zona de las hombreras. De esta forma se crea un gradiente de velocidad hacia el exterior de la banqueta que varía entre los 1,5 m/s en las partículas en contacto con la traviesa a los 0,01 m/s para aquellas más alejadas en el caso de un tren de mercancías. Un tren de cercanías, al ser más ligero induce menores velocidades en cada instante sobre la capa de balasto, como se muestra en la *Figura 40*, donde se puede apreciar como las partículas que presentan las velocidades más elevadas son menores que en el caso de un tren de mercancías.

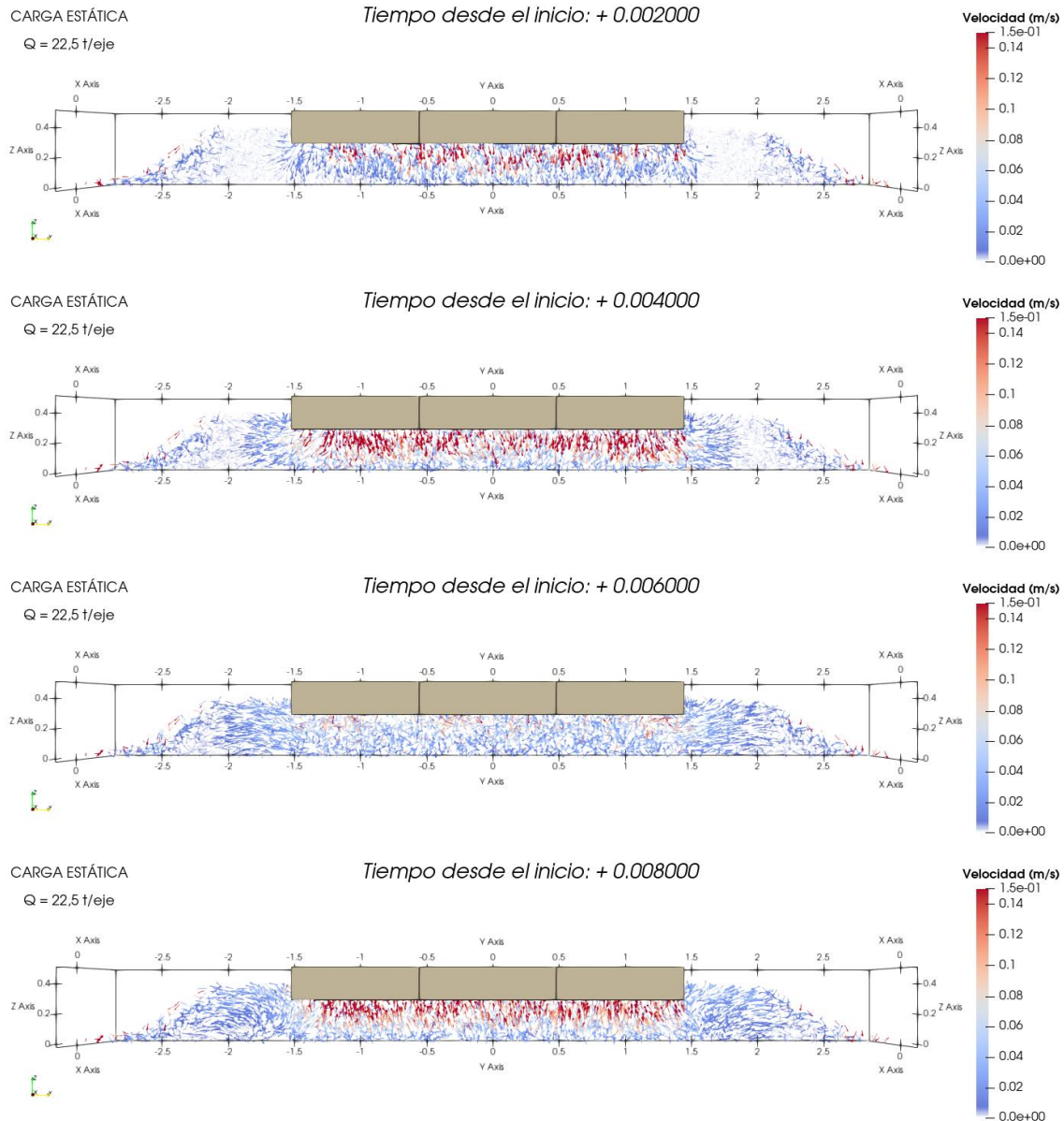


Figura 39. Velocidad de las partículas de balasto en los instantes iniciales tras la aplicación de una carga estática de un tren de mercancías. (Elaboración propia).

Una vez que se ha producido la absorción del impacto de la traviesa las partículas pierden velocidad y se estabilizan durante unos breves instantes, antes de ascender nuevamente mostrando una respuesta elástica produciéndose un proceso inverso al comentado anteriormente. Este proceso de ascensos y descensos se produce de forma cíclica reduciendo en cada repetición su intensidad, hasta que el impacto inicial es totalmente disipado y el modelo se estabiliza. Este comportamiento es el esperado por parte de una capa granular que tiene como función principal ser elástica y absorber las vibraciones de la circulación de los trenes.



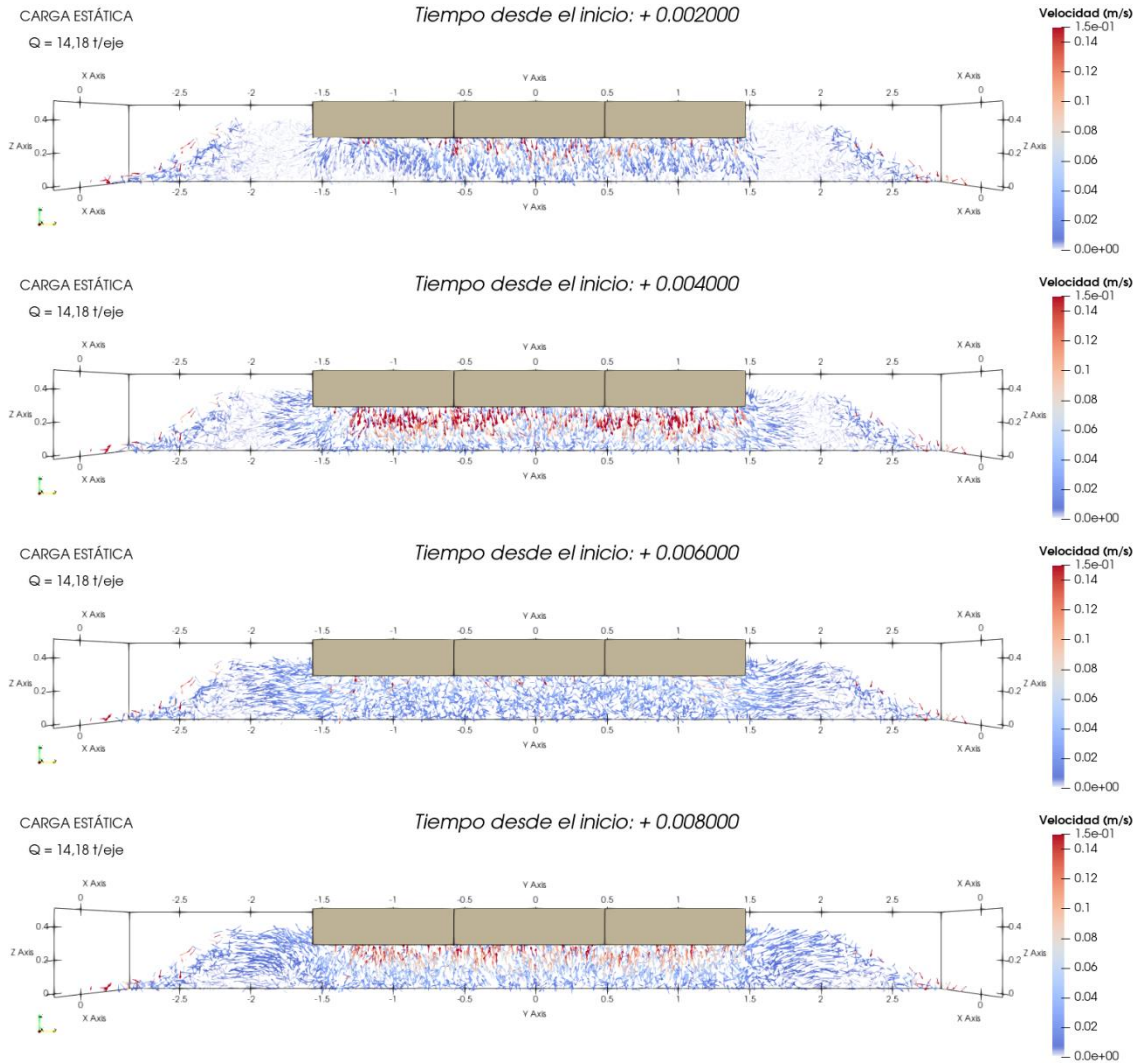


Figura 40. Velocidad de las partículas de balasto en los instantes iniciales tras la aplicación de una carga estática de un tren de cercanías. (Elaboración propia).

En la *Figura 41* se muestra una vista transversal de las velocidades inducidas en el balasto por el impacto inicial de la traviesa. Destaca como el campo de velocidades en la zona del eje de la vía es mucho presenta trayectorias más definidas que en el caso de la sección bajo el carril, donde se aprecia un movimiento más “turbulento” de las partículas, causado por la cercanía de la hombrera de la vía.

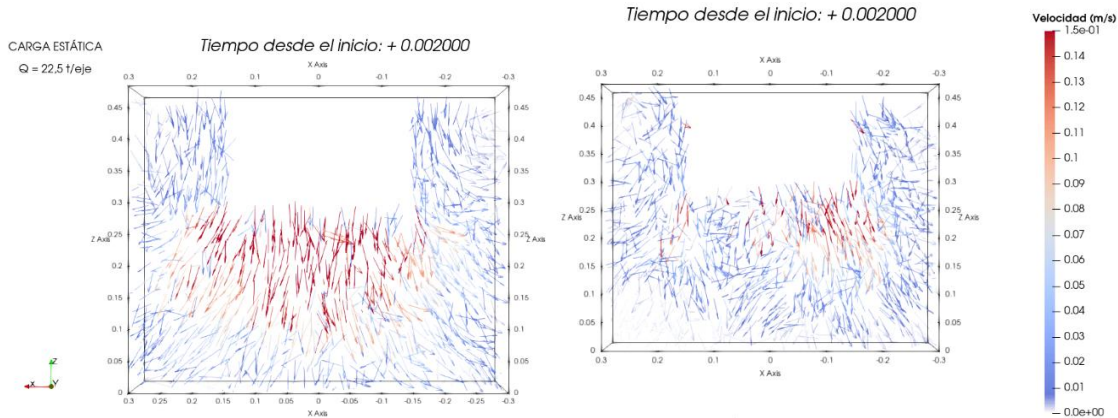


Figura 41. Velocidades inducidas al inicio de la aplicación de la carga por eje de un tren de mercancías en una sección transversal por el eje de la vía (izquierda) y en una sección situada a un metro de eje (derecha). (Elaboración propia).

### 6.2.5 Esfuerzos

En la *Figura 42*, se ha representado el tercer esfuerzo principal sobre las partículas,  $\sigma_{III}$ , que es considerado el más relevante para el estudio del comportamiento del balasto al ser el mayor esfuerzo de compresión soportado por las piedras de balasto. La situación mostrada se corresponde con el momento en el que el descenso de la traviesa se ha estabilizado.

El análisis del esfuerzo que soporta cada una de las partículas de la capa de balasto arroja datos interesantes. Por una parte, resulta notable cómo no todas las partículas que se encuentran próximas a la traviesa están sometidas al mismo esfuerzo, de hecho, existen partículas que prácticamente se encuentran libres de esfuerzos. A través de este fenómeno se observa la importancia que tiene el contacto de las piedras de balasto con la traviesa. Además, muchas de estas partículas que soportan los mayores esfuerzos lo transmiten en forma de columnas hacia las partículas situadas en la base, conformando columnas verticales o cadenas de partículas que se encuentran sometidas a esfuerzos muy superiores a los de sus vecinas. Es de esperar que estas partículas sufran un desgaste prematuro contribuyendo a la degradación de la capa de balasto del tramo, para evitar esta situación se hace relevante un adecuado bateo y nivelación de la banquetta de forma que su superficie sea lo más regular posible, evitando las concentraciones puntuales de esfuerzos.

Más allá de estas cadenas principales, sometidas a esfuerzos de compresión de hasta 2 000 kPa, la mayoría de las partículas situadas bajo la traviesa presentan esfuerzos entre los 200 kPa y 800 kPa. Teniendo en cuenta que Adif exige una resistencia a la

compresión mínima de 120 MPa para los áridos empleados como balasto, se puede asegurar que durante la operación habitual no se produce la fractura a gran escala de las piedras de balasto, pero sí que se produce desgaste por fricción y redondeamiento de las mismas.

Es destacable como cerca de los extremos de la traviesa y más allá de estos el esfuerzo soportado por las partículas desciende drásticamente. Por lo que se puede concluir que la mayoría de la resistencia de la capa de balasto se moviliza inmediatamente bajo la traviesa, además de ser la zona que presumiblemente sufrirá un mayor desgaste de las piedras de balasto.

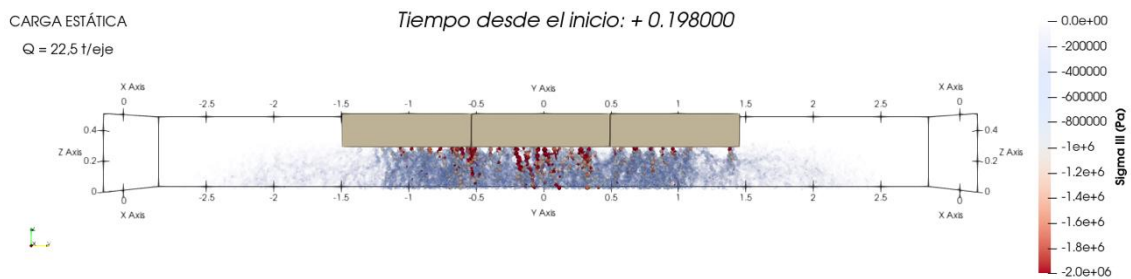


Figura 42. Distribución de los esfuerzos sobre la capa de balasto para la carga estática de un tren de mercancías. (Elaboración propia).

En la Figura 43 se muestran el mayor esfuerzo de compresión en dos secciones transversales a lo largo de la traviesa. En la sección correspondiente con el eje de la vía las concentraciones de esfuerzos de compresión en columnas son mucho mayores que en la sección por la hombrera de la banqueta. La existencia de las paredes que confinan el modelo longitudinalmente no permite determinar si los esfuerzos se agrupan en la zona bajo traviesa o se extienden por la capa de balasto, esto supone una limitación que debe ser resuelta por los modelos multitraviesa.

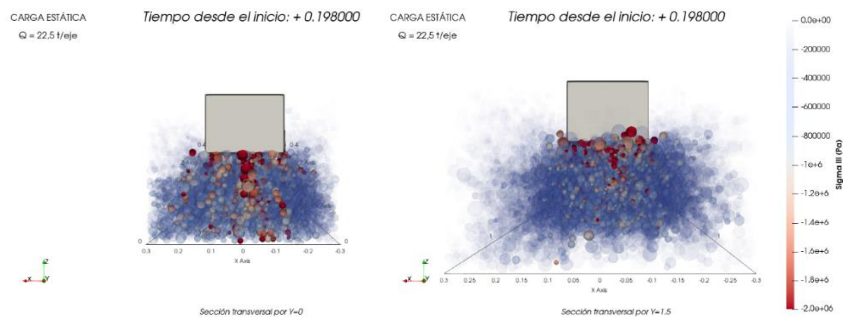


Figura 43. Vista lateral de la distribución de esfuerzos en la capa de balasto causada por un tren de mercancías. (Elaboración propia).

### 6.2.6 Cadenas de fuerza normal

Las cadenas de fuerza permiten mostrar cómo se distribuye la fuerza normal entre las piedras de balasto en el espesor de la banqueta. En las Figuras 44 y 45 se muestra la fuerza normal entre partículas para el instante de tiempo en el que el descenso de la traviesa ya se encuentra estabilizado, comparando el caso del tren de cercanías con el tren de mercancías.

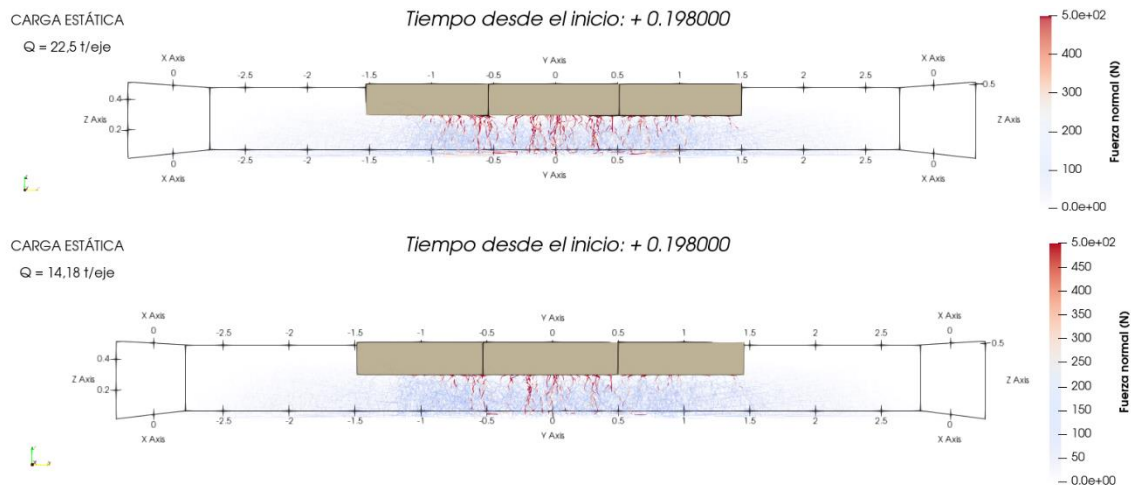


Figura 44. Vista frontal comparativa entre la fuerza normal transmitida entre partículas de balasto para un tren de mercancías (arriba) y un tren de cercanías (abajo). (Elaboración propia):

En ambos casos, la transmisión de fuerzas desde la traviesa hasta la base de la traviesa de balasto muestra cadenas de partículas que transmiten mayores esfuerzos que las adyacentes, esto se debe a que la traviesa no contacta de forma uniforme con todas las partículas de su base, si no que debido a la disposición de cada una de ellas existen contactos preferentes que constituyen las principales vías de transmisión de fuerzas. Como se puede apreciar en las figuras, estas cadenas no se encuentran necesariamente bajo los carriles por ser la zona donde se transmiten las cargas. Esto se debe principalmente a dos factores: por una parte, el Método de Elementos Discretos no permite considerar la flexión de la traviesa, por la otra parte se hace de relevancia la importancia que juega la uniformidad de la capa de balasto bajo la traviesa en la reducción de las fuerzas actuantes sobre las piedras. Más allá de estas cadenas principales, el balasto bajo traviesa muestra un reparto bastante uniforme de las fuerzas a lo largo de todo el volumen bajo la misma observándose cómo más allá de los límites de la misma las fuerzas normales empiezan a dispersarse.

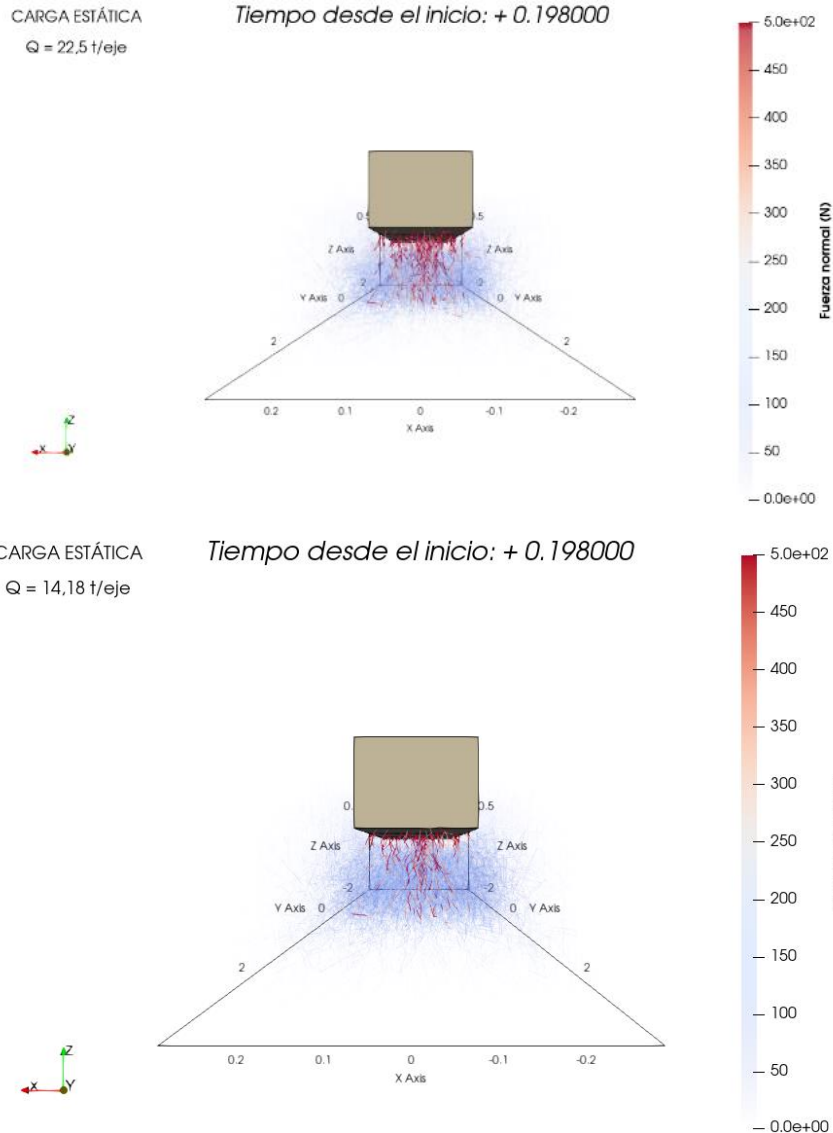


Figura 45. Vista lateral comparativa de la fuerza normal transmitida entre partículas de balasto para un tren de mercancías (arriba) y un tren de cercanías (abajo). (Elaboración propia).

La vista lateral de la transmisión de fuerzas respalda las conclusiones obtenidas a partir de la vista frontal, en ellas se observa como la fuerza se transmite principalmente en cadenas verticales que parten de la traviesa y alcanzan la base. Es reseñable como ninguna de las cadenas de mayor magnitud se dirige hacia las paredes laterales que delimitan el modelo pudiendo afirmar que no son un factor que condicione en gran medida el comportamiento vertical del balasto.

En lo referido a la magnitud de la fuerza normal entre las piedras de balasto se puede observar que naturalmente es mayor en el caso de un tren de mercancías donde un gran número de cadenas de fuerza superan los 500 N, con contactos puntuales que

pueden sobrepasar los 2000 N, ocasionando la fractura de las partículas. Sin embargo, la mayoría de las interacciones entre partículas bajo la traviesa se encuentran en un orden de magnitud entre los 100 N y los 300 N.

### 6.2.7 Modelo con tres traviesas: Defectos en la capa de balasto

La Figura 46 muestra el descenso de cada una de las traviesas de un emparrillado constituido por tres traviesas bajo la acción de una carga estática debida un tren de mercancías de 22,5 t/eje, aplicando el reparto de cargas correspondiente. Como se puede observar, la gráfica muestra resultados que resultan contraintuitivos a simple vista. Por una parte, la *Traviesa nº2*, que se corresponde con la más cargada alcanza un descenso estable de 1,56 mm, que resulta superior al descenso obtenido por el modelo de una única traviesa, pero que resulta un valor razonable. El problema se hace evidente comparando el descenso de las traviesas restantes, las dos menos cargadas del modelo, que reciben a partes iguales un 25% de la carga total cada una. Mientras que el descenso de la *Traviesa nº3* se ajusta a lo esperado, la *Traviesa nº1* presenta un descenso anormalmente alto, que iguala el de la traviesa más cargada.

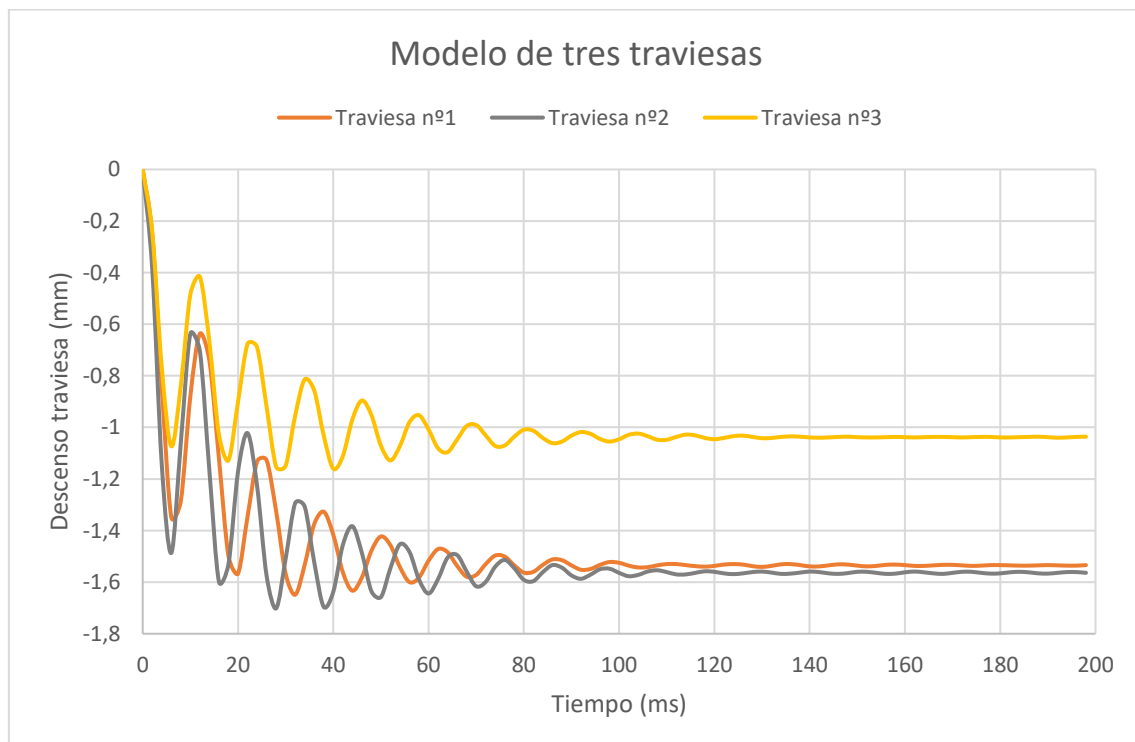
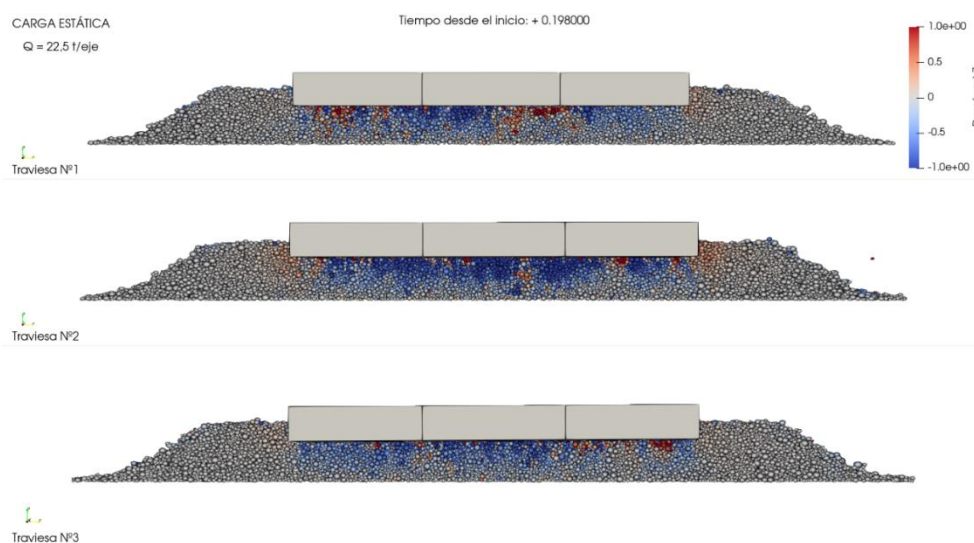


Figura 46. Descenso de las distintas traviesas que componen un modelo con tres traviesas. La numeración de cada traviesa se corresponde con el orden de la misma en el sentido de avance de la marcha. (Elaboración propia).

Como se puede observar en la *Figura 47*, el elevado descenso de esta traviesa se puede achacar a la presencia de una depresión en la capa de balasto que crea una zona de la banqueta que no resiste esfuerzos de la forma esperada, redundando en asientos importantes aún cuando las cargas son menores. Es por ello por lo que no se ha rechazado este modelo, pues se ha considerado ilustrativo de los efectos que puede tener el apoyo diferencial de las traviesas sobre la vía, los defectos en el bateo o la falta de apoyo de la traviesa por la elevación de la misma.

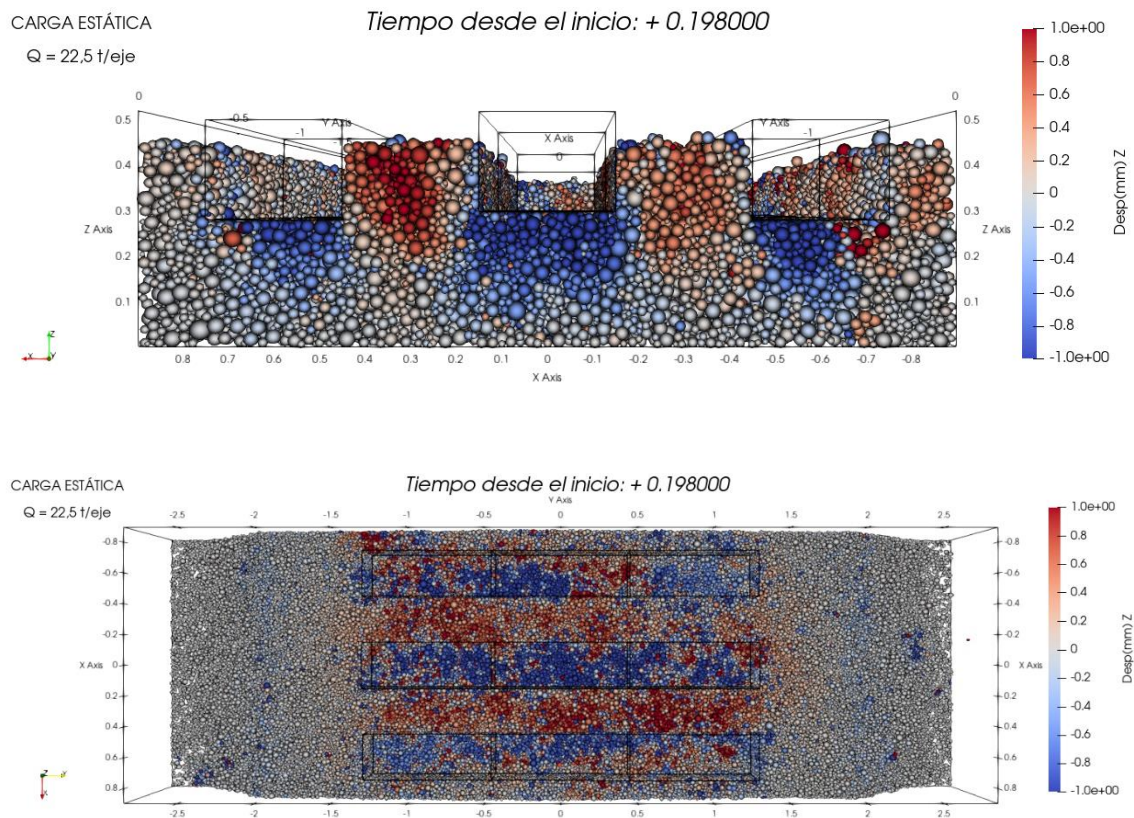
Sin embargo, esto quiere decir que los resultados obtenidos pueden verse fuertemente afectados por el procedimiento de generación del modelo, quedando la interpretación de los resultados a interpretación del técnico. La variabilidad de los resultados provocada por la generación del modelo se tratará y acotará más adelante dentro de este capítulo.

En la *Figura 48* se muestra en planta y alzado la componente vertical de los desplazamientos de la capa de balasto al final de la simulación. Se puede apreciar como los desplazamientos bajo la traviesa central se asemejan en gran medida a los obtenidos en el modelo de una única traviesa, teniendo en cuenta las heterogeneidades de la capa de balasto. En la *Traviesa nº1* se aprecian los efectos de la depresión en la capa de balasto, que ha provocado que en esa zona se concentren partículas que han ascendido verticalmente debido a la acción de sus vecinas, ocupando el hueco que estaba disponible.



*Figura 47. Vista frontal del desplazamiento en el eje vertical del balasto para cada una de las traviesas del modelo. (Elaboración propia).*

La vista transversal de la *Figura 48* tampoco presenta grandes diferencias con respecto al modelo de una única traviesa. La más notable se da en el balasto situado entre las distintas traviesas, que ha ascendido considerablemente más que en el modelo con una traviesa única. Esto se debe a la combinación de dos efectos, por una parte, no existe ninguna pared que actúe de límite y restrinja el movimiento. Por otra parte, ya se ha visto como el empuje de la traviesa provoca que el balasto de sus alrededores sufra un hinchamiento, en un modelo multitraviesa este efecto se ve incrementado por el empuje de dos traviesas de forma simultánea. En la vista en planta de la *Figura 47* se puede apreciar la fuerte coloración roja, indicando el ascenso de las partículas, en el espacio entre dos traviesas consecutivas.



*Figura 48.* (Arriba) Vista lateral del desplazamiento en el eje vertical del balasto, sección por el eje de la vía y (Abajo) vista en planta del desplazamiento en el eje vertical del balasto.

(Elaboración propia).

Los desplazamientos transversales de las partículas no presentan ningún tipo de diferencia con el modelo de una única traviesa y se observa que se encuentran muy condicionados por el estado de la banqueta de balasto. En la *Figura 49* se puede observar como para la *Traviesa nº1*, el rebaje en la capa de balasto en la zona derecha



de la traviesa ha provocado que se desplacen partículas desde el centro hacia esa zona lateralmente en mayor medida de lo que sucede en el resto de las traviesas.

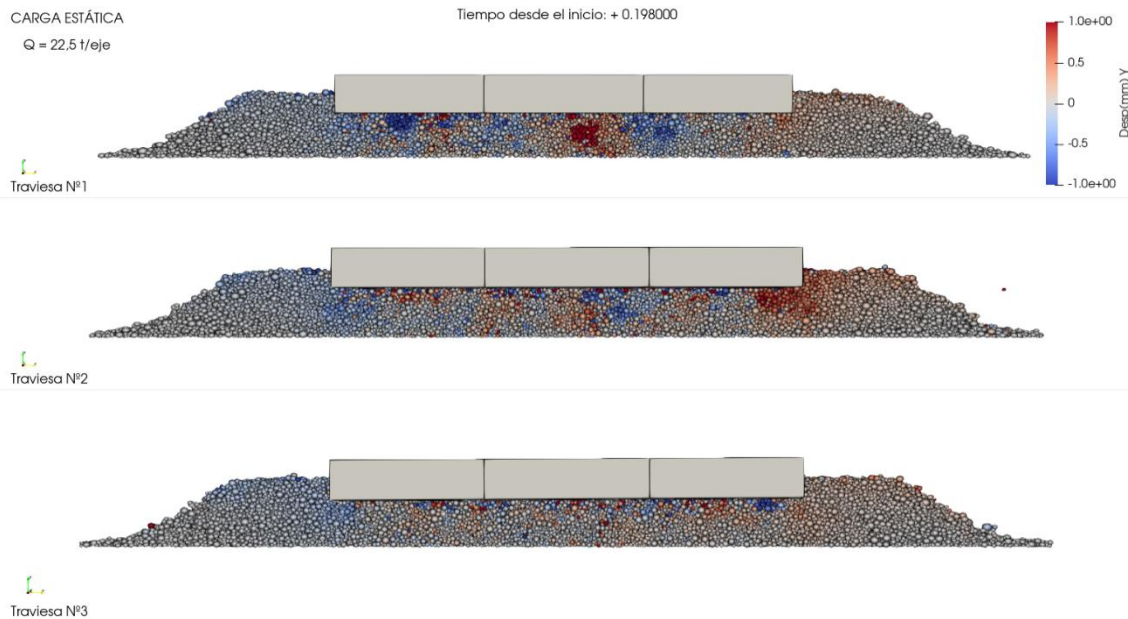


Figura 49. Vista frontal del desplazamiento en el eje transversal del balasto para cada una de las traviesas del modelo. (Elaboración propia).

El esfuerzo de compresión soportado por las partículas está representado en la *Figura 50* de la que se pueden extraer varias conclusiones. Naturalmente destaca el gran vacío en la zona central derecha de la *Travesía Nº1*, que representa como una gran zona de la banqueta no está siendo eficaz en la transmisión de esfuerzos. Esta es la máxima expresión de la importancia de un buen contacto entre las partículas de balasto y la traviesa, fundamental para reducir las concentraciones de esfuerzos y los asentos indeseados. En lo que respecta a las traviesas que contactan adecuadamente con la capa de balasto se puede observar cómo la distribución de esfuerzos se asemeja a la observada en los casos anteriores.

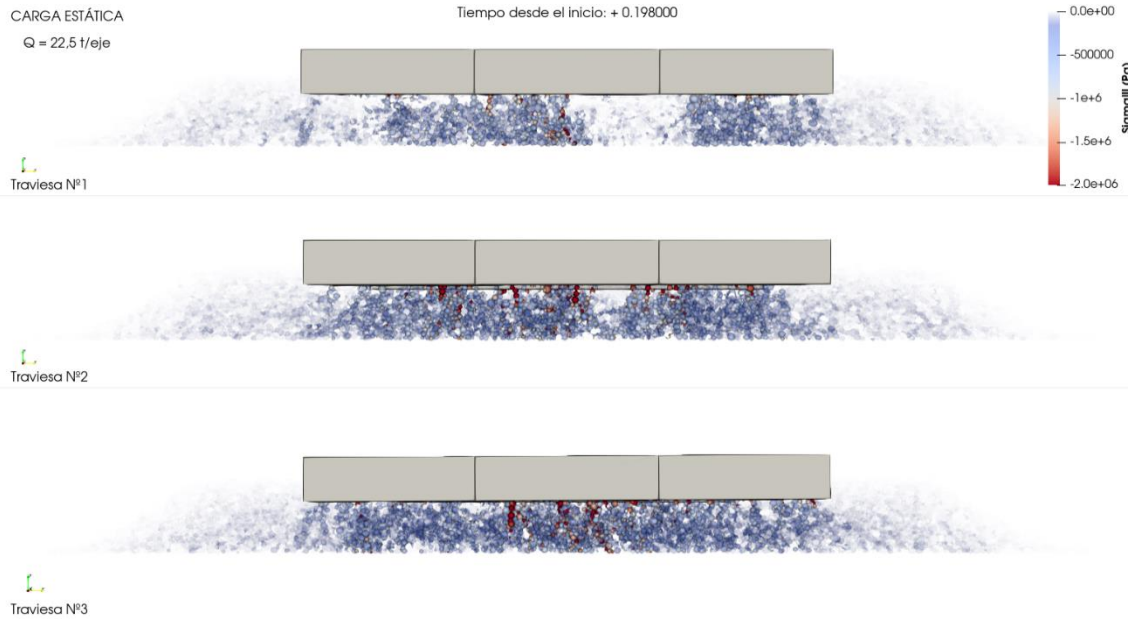


Figura 50. Vista frontal de la distribución de esfuerzos en la capa de balasto para cada una de las traviesas del modelo. (Elaboración propia).

En el modelo de traviesa única quedaba indeterminado el alcance lateral de la distribución de esfuerzos en el balasto, debido a la presencia de los límites del mismo. En la *Figura 51* se puede observar como el bulbo de tensiones creado por la traviesa alcanza en cierta medida el de las traviesas colindantes, por lo que puede existir cierto solape entre las tensiones de las traviesas que no quede adecuadamente representado en un modelo de una única traviesa. No obstante, no se aprecia que las principales cadenas de transmisión de tensiones se extiendan más allá del área de una traviesa.

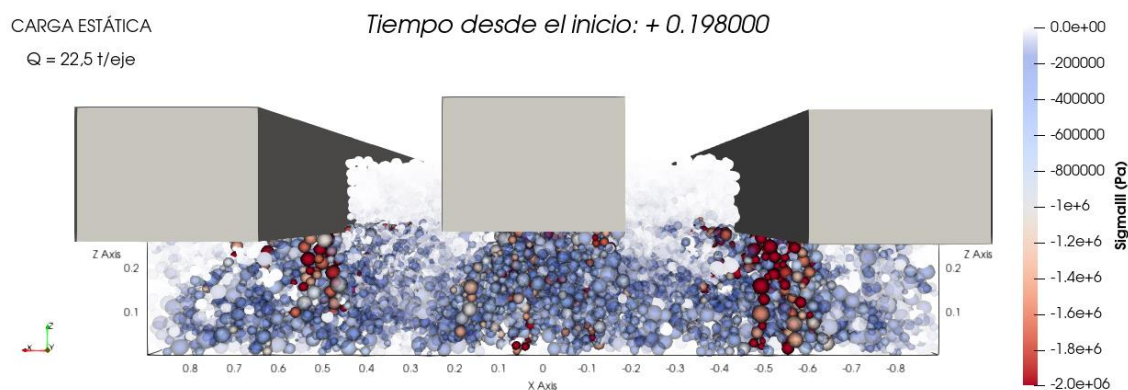


Figura 51. Vista lateral de la distribución de esfuerzos en el modelo de tres traviesas, sección por eje de la vía. (Elaboración propia).

### 6.2.8 Modelo con cinco traviesas

El modelo de cinco traviesas ofrece valores de descenso acordes a lo esperado en la vía. El descenso de la traviesa central, la más cargada, es de  $1,462\text{ mm}$ , valor muy próximo al descenso de  $1,315\text{ mm}$ . El mayor asiento es debido a una combinación entre la disposición aleatoria de las partículas en cada modelo y los efectos exclusivos de los modelos multitraviesa, como el mayor hinchamiento del balasto en los alrededores de la traviesa y el solape entre los distintos bulbos de tensiones, efectos ya mencionados en el modelo de tres traviesas.

En la *Figura 52* se representa a modo de comparación el descenso de las cinco traviesas que conforman el modelo. Se aprecia como en función de la carga aplicada, el asiento de la traviesa es mayor o menor. De esta forma tenemos que la traviesa central, la *Traviesa nº3* es la que más desciende, seguida por las *Traviesas nº2* y *nº4*, mientras que las que menos descienden son las traviesas que reciben solamente el 10% de la carga total del eje la *nº1* y la *nº5*. Comparando el descenso de las *Traviesas nº2* y *nº4* con el de la *Traviesa nº3* del anterior modelo se observa como todos los descensos se encuentran razonablemente agrupados dentro de un mismo orden de magnitud, por lo que se dan por válidos.

Después de observar los resultados obtenidos se puede afirmar que resulta inherente al comportamiento de la capa de balasto ofrecer un comportamiento heterogéneo en el tiempo y en el espacio. Es por ello que resulta esperable y adecuado que a pesar de soportar la misma carga dos traviesas no tengan el mismo asiento. Si este asiento se encuentra dentro de un orden de magnitud parecido, como es el caso, constituye una prueba del buen funcionamiento del modelo representando la irregularidad de la capa de balasto.

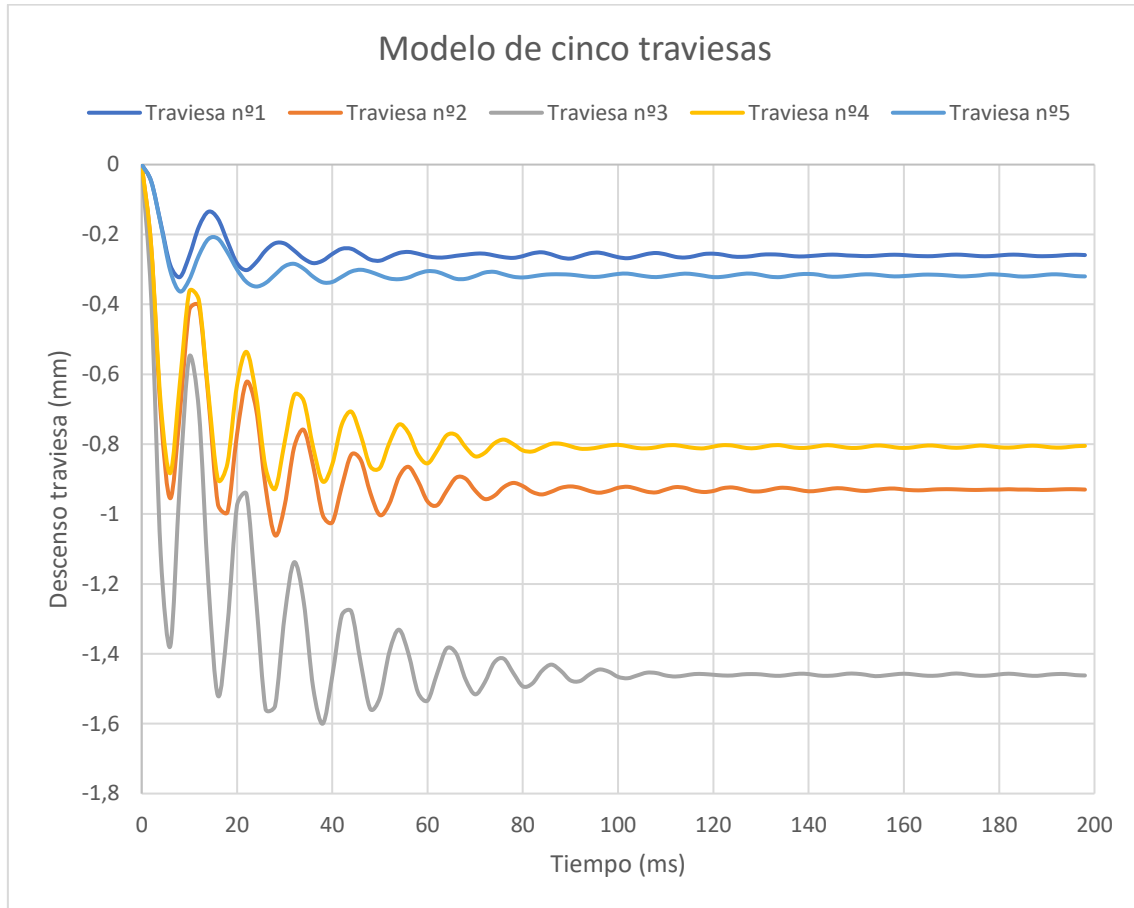


Figura 52. Descenso de las distintas traviesas que componen un modelo con cinco traviesas. La numeración de cada traviesa se corresponde con el orden de la misma en el sentido de avance de la marcha. (Elaboración propia).

Analizando la componente vertical del descenso de las partículas (Figura 53) se puede comprobar como el comportamiento cabe dentro de lo esperado y se correlaciona bastante bien con el modelo de una única traviesa, con la salvedad de la *Traviesa nº5*. Nuevamente se ha generado una zona de menor compacidad, que ante la aplicación de carga sobre la traviesa ha creado un asiento localizado inusual en las partículas de la zona. Presumiblemente en este caso no existe afección sobre el descenso de la traviesa debido a que la carga soportada es menor que en el caso anterior, lo que confirma algo evidente: aumentar las cargas sobre la infraestructura magnifica los efectos negativos de los defectos en la vía, por lo que se incrementa la necesidad de mantener un estado de conservación adecuado.

Por otra parte, la aparición de otro defecto no planificado en un modelo multitraviesa sugiere que la generación del modelo se vuelve inestable conforme aumenta el número de partículas del modelo lo que unido a la velocidad de cálculo y a la buena correlación

de los resultados obtenidos refuerza el empleo del modelo de una única traviesa para estudiar el comportamiento del balasto.

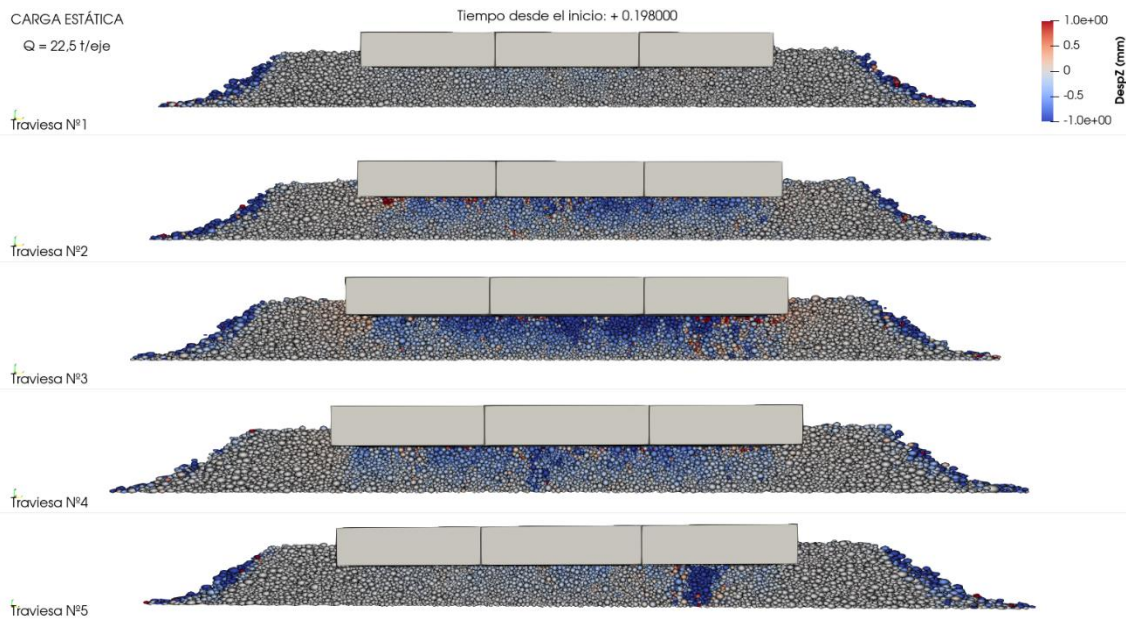


Figura 53. Vista frontal del desplazamiento en el eje vertical del balasto para cada una de las traviesas del modelo. (Elaboración propia).

El modelo de cinco traviesas nos permite constatar que, aparte de que las traviesas extremas generan poca afección sobre la banqueta debido a la reducida carga que soportan, el hinchamiento que producen resulta prácticamente inapreciable. Como se puede apreciar en la *Figura 54* el hinchamiento se concentra fundamental en el balasto situado alrededor de la traviesa más cargada.

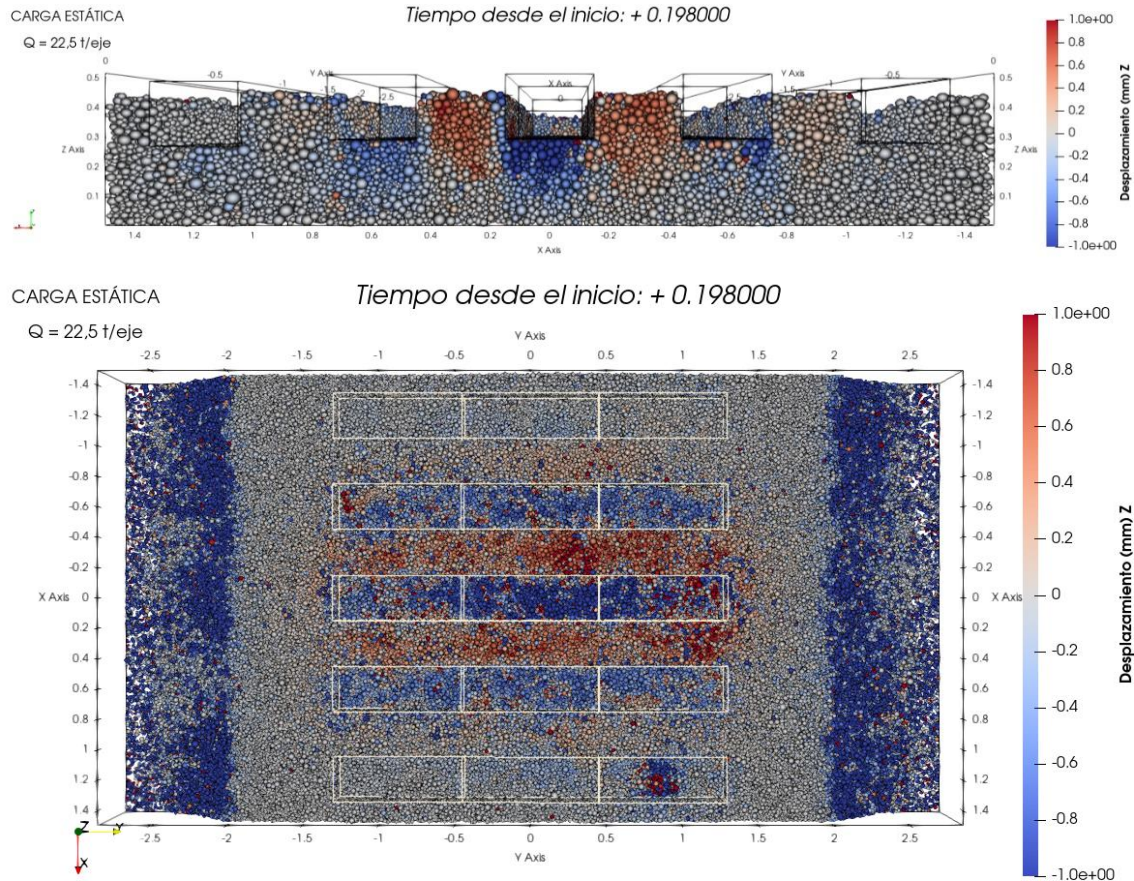


Figura 54. (Arriba) Vista lateral del desplazamiento en el eje vertical del balasto, sección por el eje de la vía y (Abajo) vista en planta del desplazamiento en el eje vertical del balasto para el modelo de cinco traviesas. (Elaboración propia).

Analizando los esfuerzos que se transmiten a la banqueta (Figura 55) se debe mencionar como a rasgos generales los esfuerzos se reparten según lo previsto y en consonancia con los resultados anteriores. Pero se debe hacer hincapié una vez más en cómo la falta de contacto con la traviesa incrementa y desequilibra el reparto de esfuerzos sobre la banqueta, creando concentraciones perjudiciales para la vida útil de esta. En la Figura 55 se muestra claramente como para las dos traviesas con menor carga, la nº1 y la nº5, la concentración de tensiones y la exigencia para las piedras de balasto situadas en la zona con defectos es mucho mayor de lo esperado.

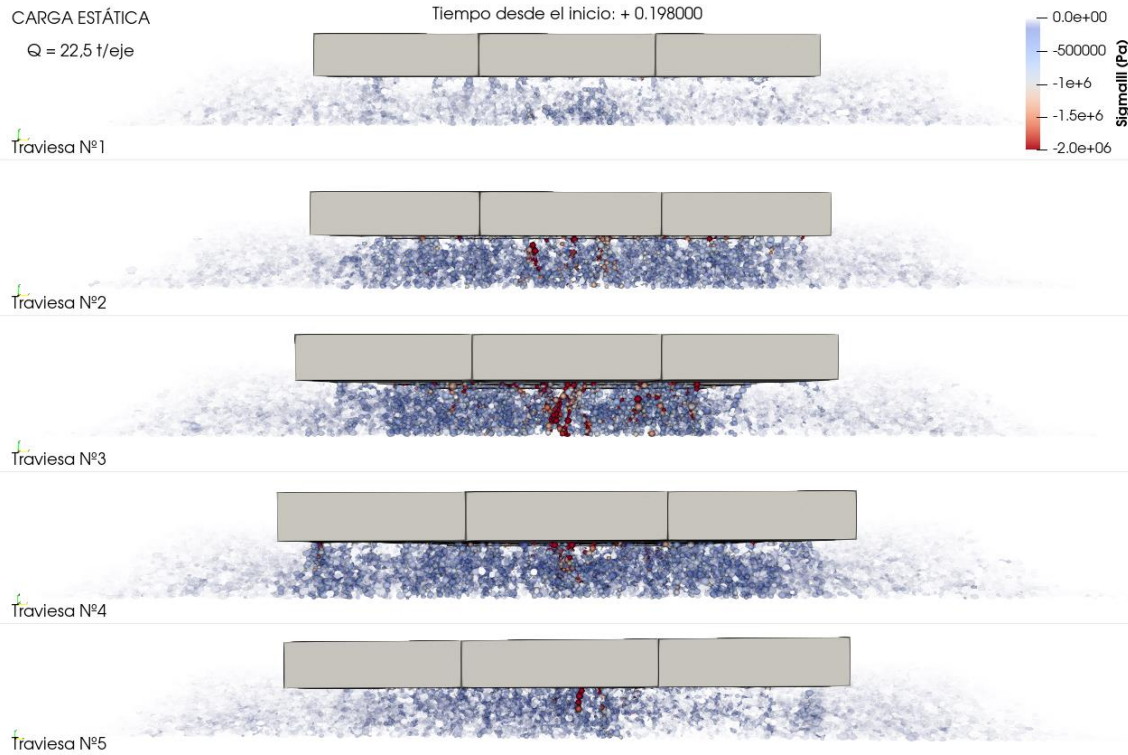


Figura 55. Vista frontal de la distribución de esfuerzos en la capa de balasto para cada una de las cinco traviesas del modelo. (Elaboración propia).

En la *Figura 56*, se puede apreciar como en este caso, en el que las traviesas centrales no presentan ninguna anomalía en sus apoyos, el bulbo de tensiones bajo cada traviesa a penas se solapa con los de las traviesas contiguas para una carga relativamente alta como la de un tren de mercancías, lo que supone de nuevo un punto a favor de los modelos de una única traviesa.

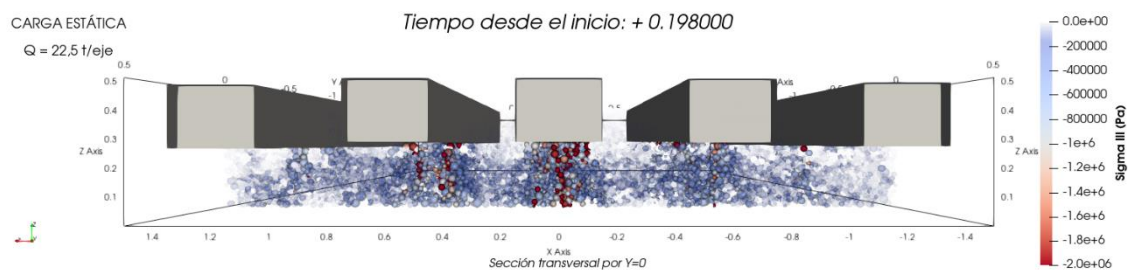


Figura 56. Vista lateral de la distribución de esfuerzos en el modelo de cinco traviesas, sección por el eje de la vía. (Elaboración propia).

## 6.3 SOLICITACIÓN ESTÁTICA CON DEFECTOS DE VÍA

### 6.3.1 Descripción

Las circulaciones cíclicas de los trenes por la infraestructura y el desgaste del balasto, de los elementos de la vía y del material rodante provocan situaciones en las que el balasto puede soportar la carga de una manera asimétrica, el objeto de esta solicitud es considerar el efecto de una concentración del peso de un eje en un lado de la traviesa. Este efecto se puede dar en el tramo debido a planos en las ruedas, defectos de carril o diferenciales de compactación del balasto que provocan que el peso del eje del tren se concentre sobre un lado de la traviesa.

Para realizar esta solicitud se ha seleccionado la carga por eje de un tren de mercancías que se aplicará sobre el modelo con una única traviesa y que permitirá la comparación con el resto de las solicitudes. La *Tabla 19* muestra las concentraciones de tensión que se han llevado a cabo en este estudio. Hay que tener en cuenta de que se parte bajo la premisa de que la carga total por eje se mantiene, simplemente se aplica de manera diferencial sobre la traviesa. Para esta solicitud se mantiene el reparto de cargas entre traviesas, por lo que se muestra el comportamiento de la traviesa más solicitada, es decir aquella que se encuentra justo bajo el eje del tren.

*Tabla 19. Valores de las cargas aplicadas sobre la traviesa, la carga Q1 se aplica sobre la posición del carril izquierdo en el sentido de la marcha, mientras que la carga Q2 se aplica sobre el derecho. (Elaboración propia).*

Diferencial	Q1	Q2
5%	4,725 t	4,275 t
10%	4,950 t	4,050 t
20%	5,400 t	3,600 t

### 6.3.2 Descenso de traviesa

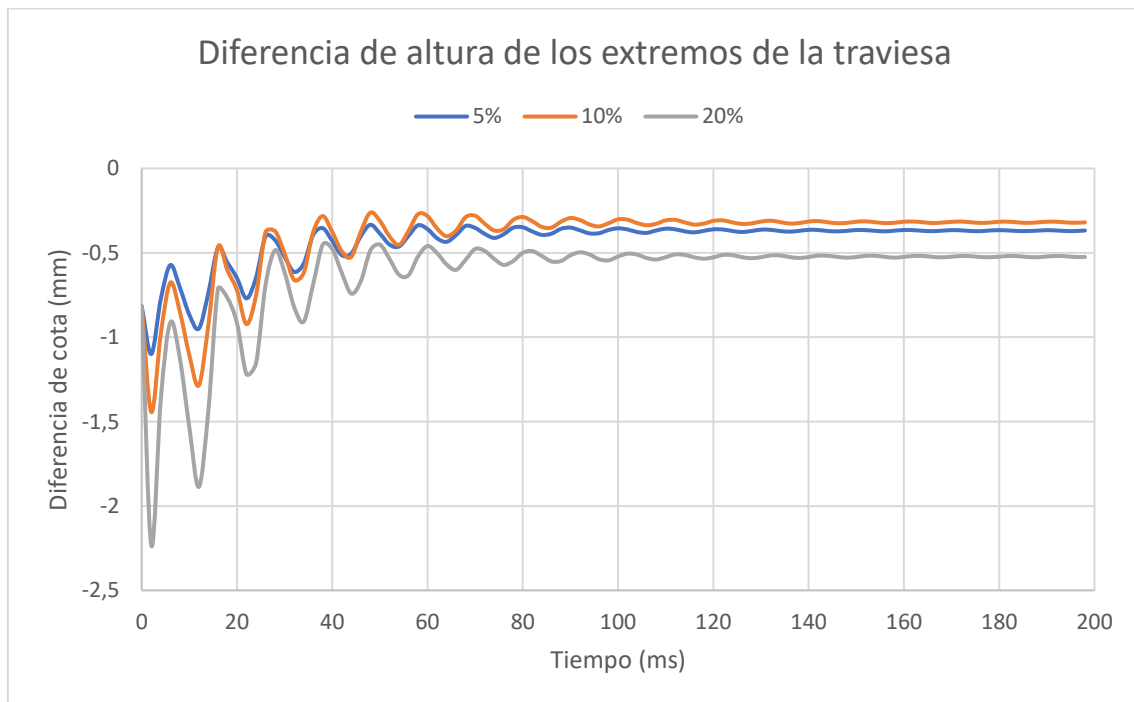
El proceso de generación del modelo numérico implica que la posición en la que se tiende la traviesa no es completamente horizontal, por tanto, en la mayoría de los casos siempre existe una diferencia de alturas entre ambos extremos de la traviesa, para el caso del modelo generado esta diferencia inicial es de *0,817 mm*.

Aunque en un primer momento puede parecer que permitir estas diferencias puede resultar incorrecto y alejado de la realidad, la verdad es que en un tramo real existe la posibilidad de que existan pequeñas diferencias de altura entre los extremos de las



traviesas a lo largo de ciertos tramos, si bien la presencia de los carriles impide que estas diferencias sean muy diferentes entre traviesas continuas. Para el modelo de una única traviesa que nos ocupa esto no supone un problema, además se favorece el correcto apoyo de la traviesa sobre el balasto, al evitar restringir movimientos que podrían crear zonas en voladizo.

Debido a estos factores, para medir el efecto provocado por la aplicación de una carga diferencial sobre la traviesa se recurre al seguimiento de la diferencia de altura entre los dos extremos de la traviesa. En la *Figura 57* se muestra la evolución en la diferencia de alturas para los tres diferenciales de carga propuestos. La diferencia de altura se calcula como la resta entre la cota del extremo de la traviesa más cargado, el correspondiente con la carga *Q1* y la cota del extremo opuesto de la traviesa.



*Figura 57. Comparativa de la diferencia de cota entre el extremo más cargado y el menos cargado de la traviesa para cada una de las concentraciones de carga planteadas. (Elaboración propia).*

Para comprender la información de la *Figura 57* es necesario entender que se parte de una situación inicial en la que el extremo más cargado de la traviesa, *Q1*, se encuentra a menor cota que el extremo menos cargado, *Q2*, de ahí los valores negativos de la diferencia de alturas. A priori, la carga *Q1* debería provocar que esta situación se agravara, es decir, que la diferencia alcanzara un valor más negativo, pero se observa

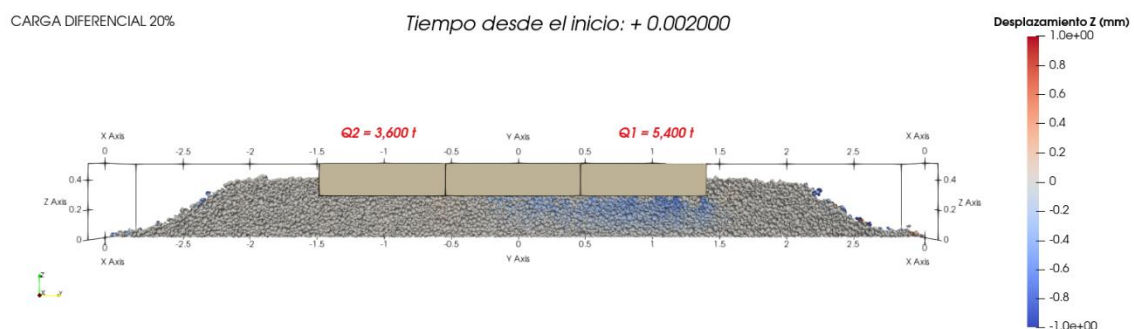
todo lo contrario, la tendencia es al equilibrio de ambos extremos de la traviesa. Esto se debe a que la zona más elevada sufre mayor asiento al tener el balasto de esta zona menor compacidad.

Pero el efecto del diferencial de carga se observa en otros factores. Por ejemplo, se observa que en los instantes iniciales se produce un descenso brusco del extremo más cargado, aumentando la diferencia de cota, aunque este valor tiende a equilibrarse con el tiempo. Por otra parte, se puede observar como para el caso de una descompensación del 20%, la diferencia de cota es mayor que para los otros dos casos.

El análisis de los distintos parámetros del balasto se realizará en los instantes iniciales de aplicación de la carga por resultar de mayor interés debido a la gran carga diferencial que se produce sobre el balasto.

### 6.3.3 Desplazamiento del balasto

En la *Figura 58* se muestran los desplazamientos verticales del balasto al inicio de la aplicación de cargas sobre la traviesa, para el caso del 20 % de descompensación de las cargas, que como es de esperar es el caso en el que mayor magnitud presentan. Estos desplazamientos no resultan demasiado elevados, pero ponen de relevancia la asimetría que se produce en la banqueta de balasto y que puede provocar asientos diferenciales en la vía, peligrosos para la circulación.



*Figura 58. Desplazamiento vertical de las partículas de balasto bajo una carga diferencial del 20%. (Elaboración propia).*

### 6.3.4 Velocidades

En la *Figura 59* se puede apreciar claramente como la aplicación de una carga descompensada se traduce inicialmente en un mayor incremento de las velocidades en la zona de aplicación de la mayor carga. Cuanto mayor es la diferencia entre los dos extremos de la carga mayor es la magnitud de las velocidades de las partículas y más

concentradas se encuentran bajo la zona del carril más cargado. Por ello se recomienda mantener la vía en unas condiciones apropiadas que eviten la acumulación de esfuerzos que provoca un comportamiento diferencial de la capa de balasto. Para el tramo propuesto, una descompensación de un 20% de la carga aplicada se considera un valor elevado, que provoca que las partículas movilizadas se concentren prácticamente en una única mitad de la traviesa.

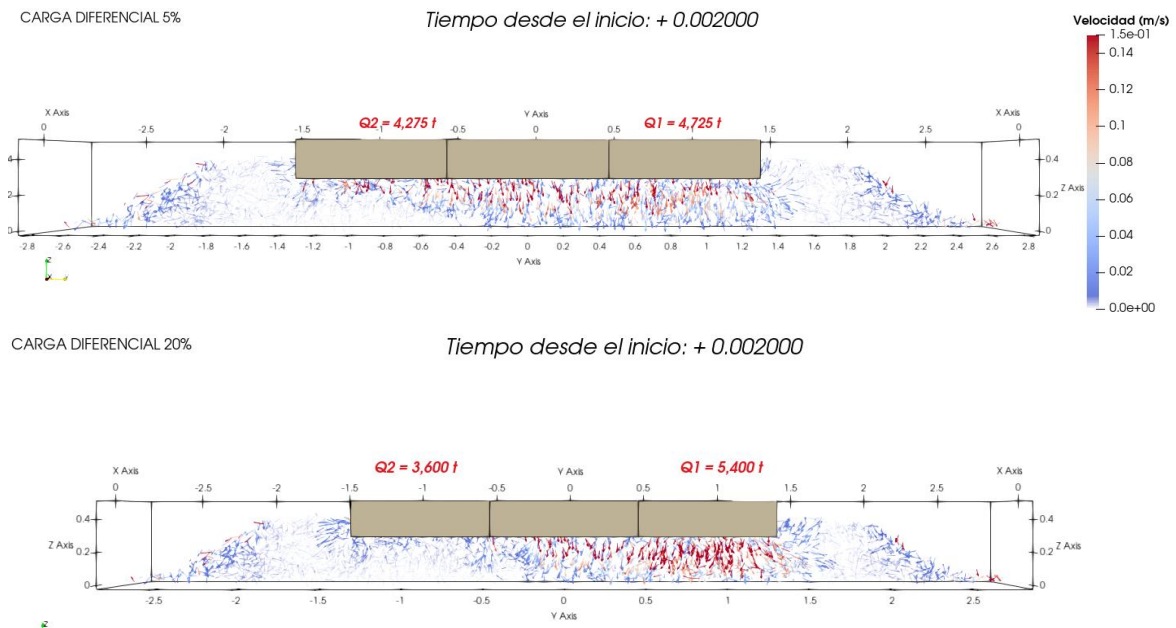


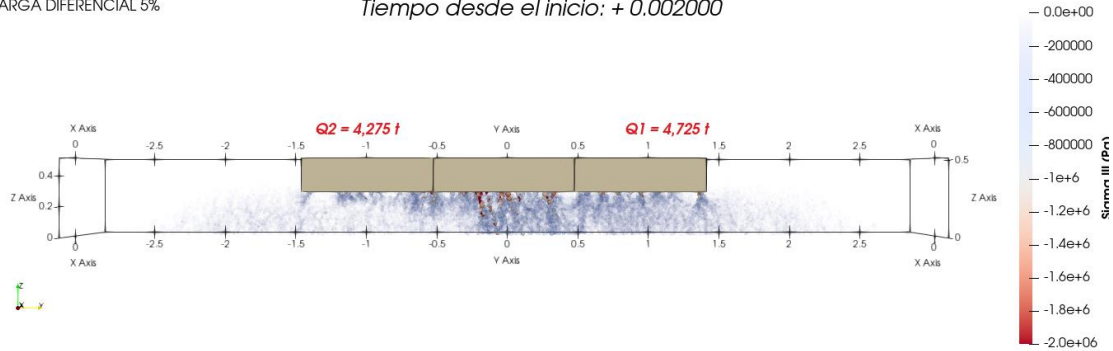
Figura 59. Comparativa entre las velocidades en la capa de balasto en entre una descompensación del 5% (arriba) y una descompensación del 20% (abajo). (Elaboración propia).

### 6.3.5 Esfuerzos

En la *Figura 60* se puede observar como conforme la diferencia de carga entre un lado y otro de la traviesa va aumentando se produce una descompensación en la distribución de esfuerzos de compresión en la banqueta de balasto. Como los esfuerzos se pueden relacionar fácilmente con el desgaste de las partículas, es fácil llegar a la conclusión de que no se debe permitir que el tramo llegue a un estado de conservación deficiente que provoque esfuerzos diferenciales sobre la capa de balasto. Además, esta situación resulta doblemente peligrosa pues se retroalimenta, la acumulación de cargas provoca un desgaste diferencial de la banqueta de balasto, que a su vez provoca una mayor acumulación de cargas, entrando en un estado de desgaste acelerado de la vía.

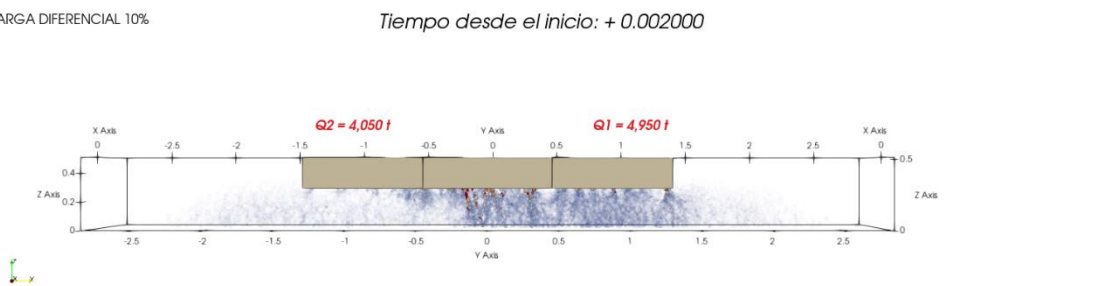
CARGA DIFERENCIAL 5%

Tiempo desde el inicio: + 0.002000



CARGA DIFERENCIAL 10%

Tiempo desde el inicio: + 0.002000



CARGA DIFERENCIAL 20%

Tiempo desde el inicio: + 0.002000

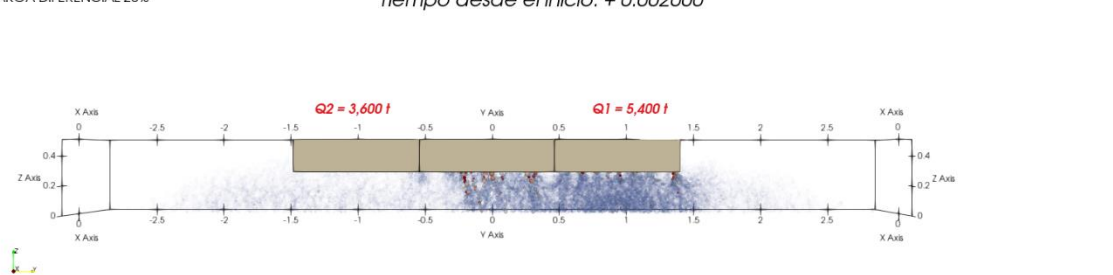


Figura 60. Comparativa entre los esfuerzos en la capa de balasto en las tres situaciones de desequilibrio planteadas. (Elaboración propia).

## 6.4 SOLICITACIÓN CUASIESTÁTICA

### 6.4.1 Descripción

Mediante la aplicación de una sollicitación cuasiestática sobre la vía se pretende determinar el efecto diferencial provocado por la velocidad de paso de los trenes y por los defectos e imperfecciones de la vía, aplicando el coeficiente de mayoración para las cargas estáticas propuesto por Eisenmann. A efectos comparativos se simula el paso de un tren de mercancías de 22,5 t/eje a tres velocidades distintas, como se muestra en la *Tabla 20*. El empleo del modelo de una traviesa nos permite realizar la comparación con la sollicitación estática bajo un tren de mercancías para resaltar las diferencias entre ambos casos.

Tabla 20. Casos de carga considerados para la aplicación de la carga cuasiestática. (Elaboración propia).

Tipo de tren	Velocidad de paso	Carga por eje mayorada por Eisenmann
Mercancías	80 km/h	33,90 t/eje
Mercancías	100 km/h	35,15 t/eje
Mercancías	120 km/h	36,42 t/eje

#### 6.4.2 Descenso de traviesa

Los descensos sufridos por la traviesa al paso de un tren de mercancías a distintas velocidades se muestran en la *Figura 61*. Como cabría esperar, ya que la carga por eje se incrementa con la velocidad según lo dispuesto en el criterio de Eisenmann, el descenso es mayor cuanto mayor es la velocidad de paso del tren. Sin embargo, las diferencias entre el asiento de la traviesa a las distintas velocidades de paso no son demasiado elevadas agrupándose todos los descensos en el entorno de los 1,8 mm, mientras que para el caso de la carga estática sin mayorar el asiento era de 1,3 mm para el tren de mercancías, por lo que se tiene un incremento medio de 0,5 mm al considerar los efectos de la dinámica vertical del tren.

Se puede concluir que la variación en la velocidad de paso de un tren de mercancías durante un servicio normal no se repercute en grandes variaciones en los asientos sobre las traviesas del tramo. Es por ello que para un tramo convencional como el que ocupa el presente trabajo, la variación en la velocidad de paso de los trenes no es un condicionante significativo en los asientos verticales producidos. No obstante, sí que existe una variación significativa al introducir los efectos dinámicos frente a la solicitud estática. Es por ello que se recomienda considerar en todo caso los efectos dinámicos del paso de los trenes a la hora de programar actuaciones de mantenimiento o renovaciones del material de la capa de balasto del tramo.

Debido a la poca diferencia observada entre los efectos producidos en el balasto a las distintas velocidades propuestas, para el resto del subcapítulo se tomarán los datos correspondientes a un tren de mercancías a 120 km/h y se compararán con los datos obtenidos anteriormente para una carga estática sin mayorar.

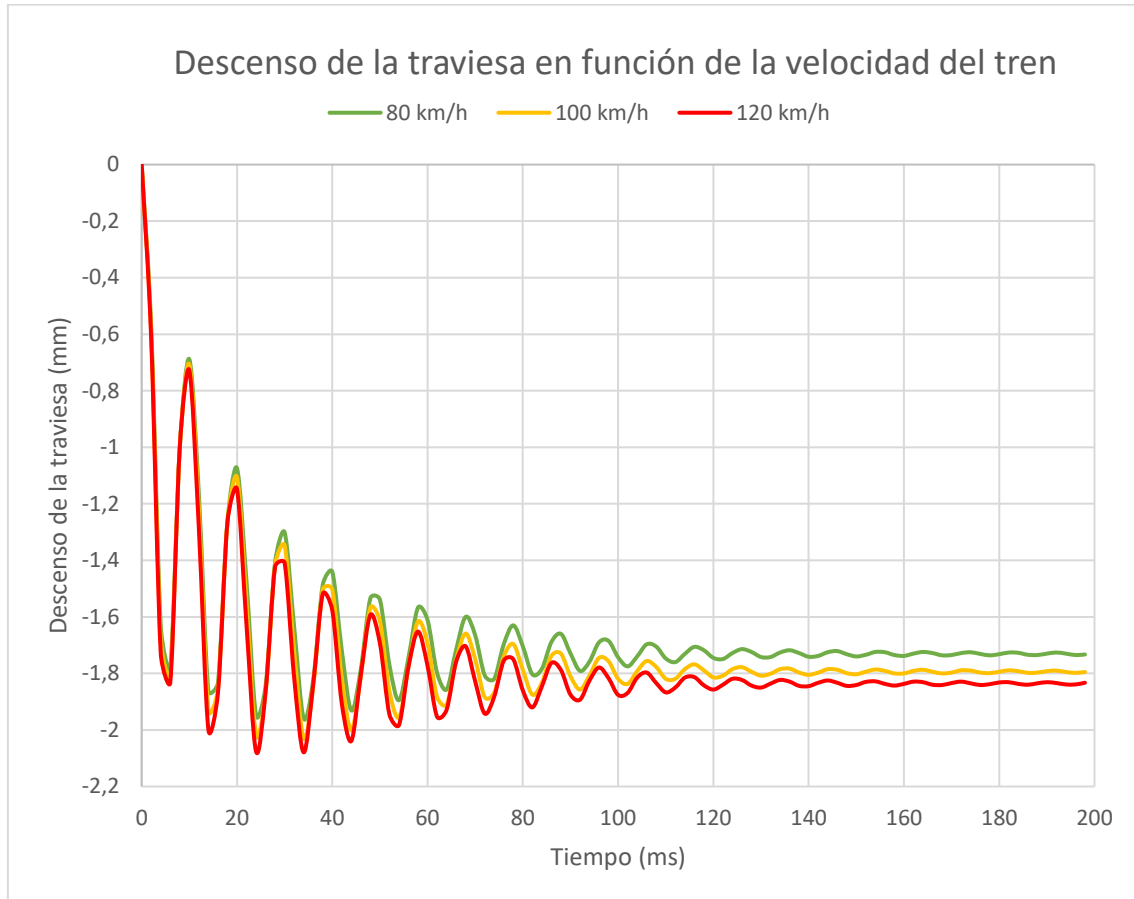


Figura 61. Descenso de la traviesa para la carga por eje de un tren de mercancías mayorada por el criterio de Eisenmann para el caso de distintas velocidades. (Elaboración propia).

#### 6.4.3 Desplazamiento del balasto

Cualitativamente el movimiento de las piedras de balasto ante la aplicación de una carga cuasiestática es similar al producido por las cargas estáticas, pues esencialmente la única diferencia entre ambas es la magnitud de la carga. Por tanto, se observan los mismos efectos que ya se producían en la sollicitación anterior pero magnificados respecto a la carga estática, como se puede apreciar en la comparativa de la *Figura 62*. Se puede apreciar como el espesor de la zona bajo traviesa que ha descendido más de 1 mm ha aumentado respecto a la sollicitación estática y el hinchamiento del balasto en la zona de los extremos de la traviesa también es mayor.

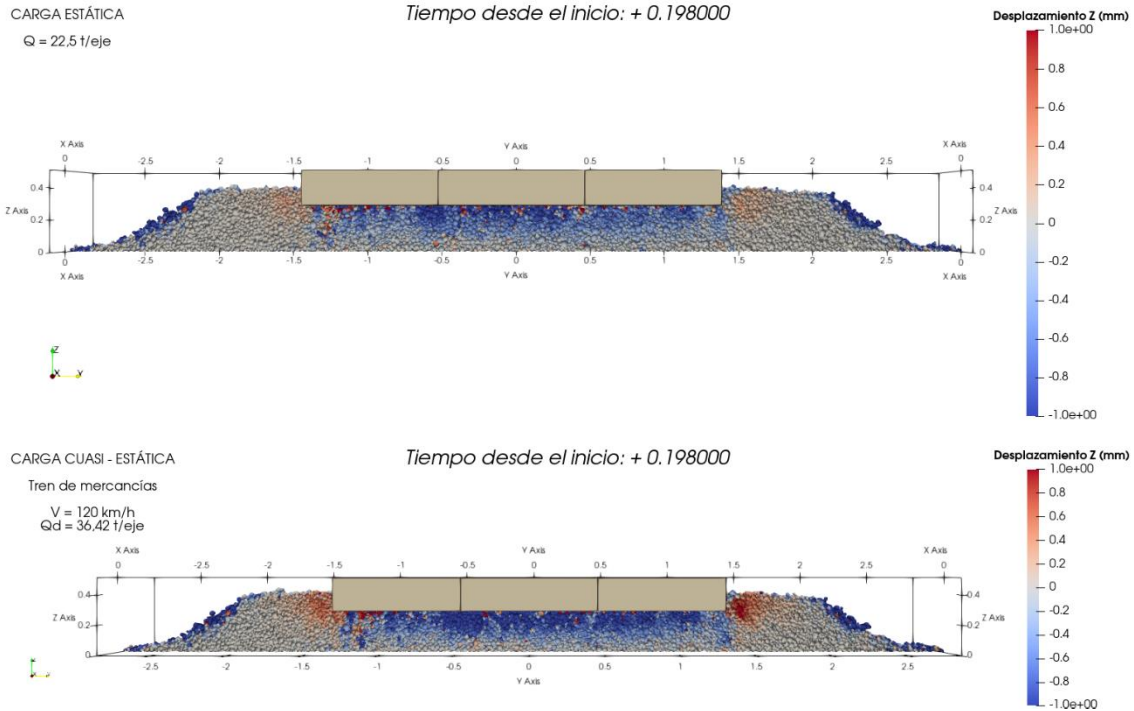


Figura 62. Comparativa entre los asentos verticales de la capa de balasto sufridos por un tren de mercancías ante una carga estática (arriba) y ante una carga cuasiestática (abajo).  
(Elaboración propia).

Entre las distintas velocidades de paso la diferencia entre los desplazamientos de las partículas apenas resulta perceptible, englobándose todas en un mismo orden de magnitud como se muestra en la *Figura 63*. Este comportamiento se repite para todos los desplazamientos posibles de las partículas, por lo que no se han incluido capturas del modelo con el fin de no sobrecargar esta memoria.

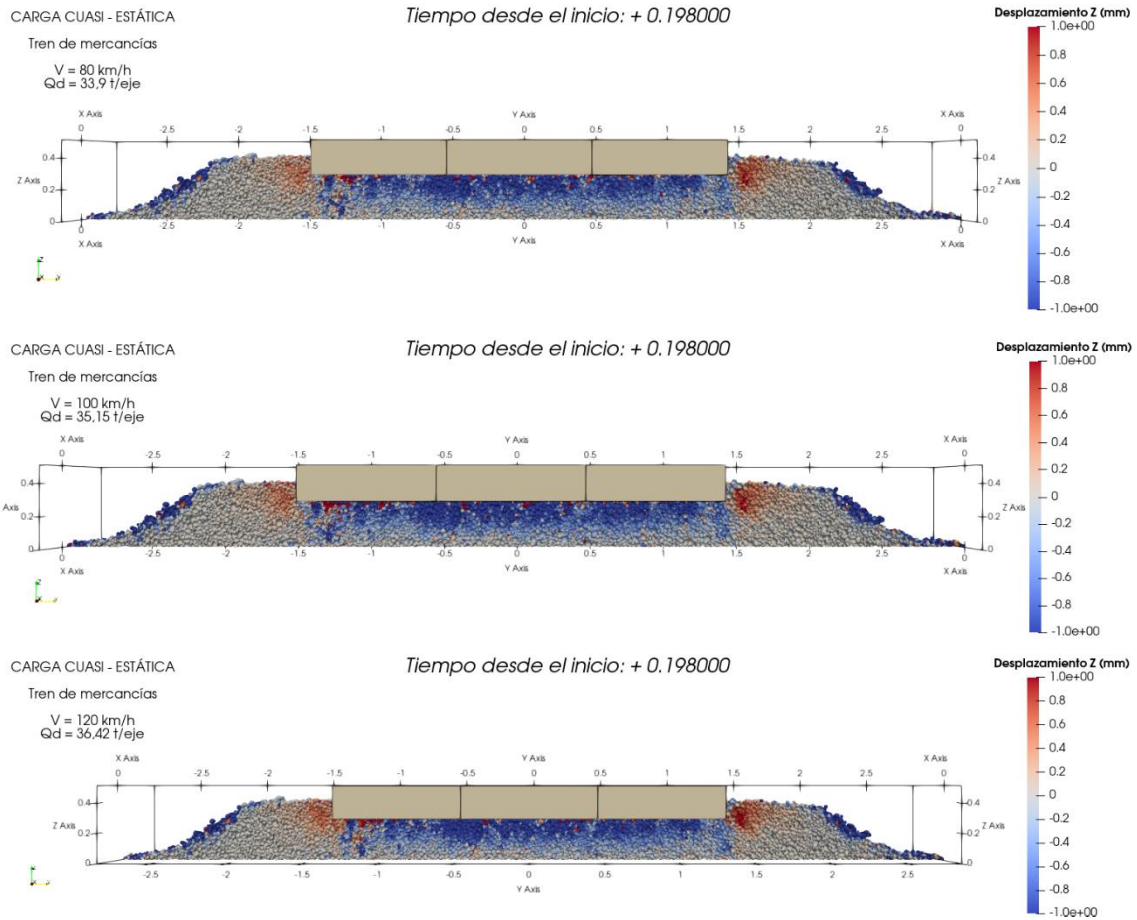


Figura 63. Desplazamiento vertical de las partículas de balasto una vez se ha estabilizado el descenso de la traviesa para distintas velocidades de paso de un tren de mercancías. (Elaboración propia).

#### 6.4.4 Velocidades

En la *Figura 64* se muestran la comparación entre las velocidades inducidas a las partículas al inicio de la aplicación de la carga sobre la traviesa. Como cabría esperar la carga mayorada provoca que una mayor cantidad de partículas alcancen velocidades del entorno de los 1,5 m/s. El efecto directo de este incremento en las velocidades es el aumento de los desplazamientos de las partículas de la capa de balasto.



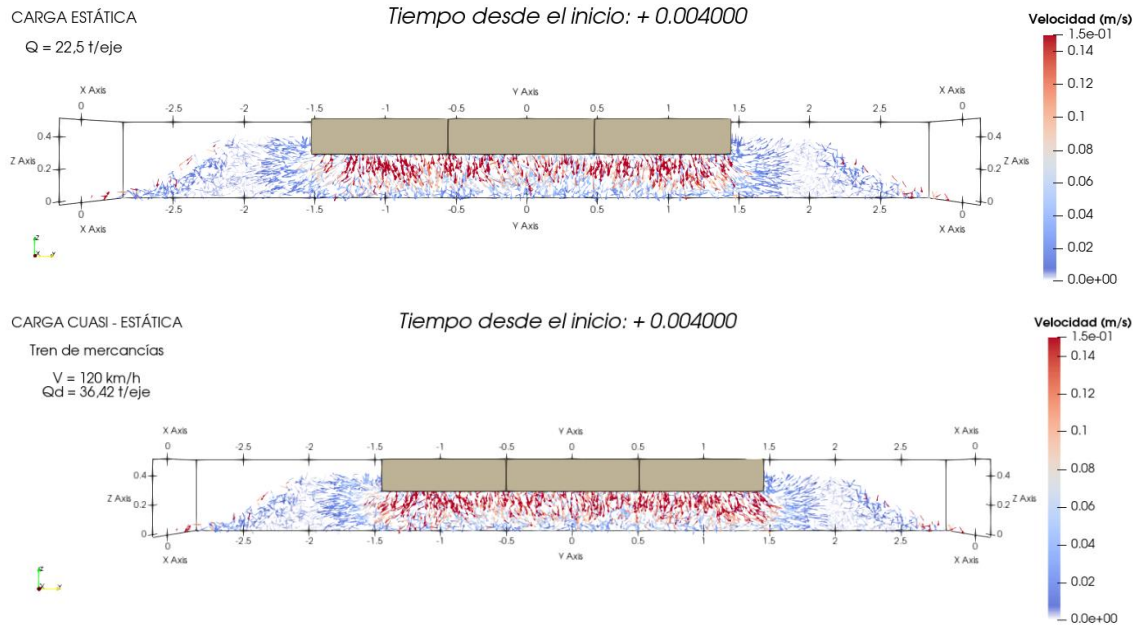


Figura 64. Comparativa entre las velocidades de las partículas de la capa de balasto inducidas por un tren de mercancías ante una carga estática (arriba) y ante una carga cuasiestática (abajo). (Elaboración propia).

#### 6.4.5 Esfuerzos

Nuevamente, se puede apreciar como la aplicación de la carga cuasiestática aumenta el número de partículas sometidas a esfuerzos mayores a los 2 MPa como se puede apreciar en la Figura 65. No es despreciable por tanto el efecto provocado por la dinámica vertical de los vehículos sobre el desgaste de la banqueta de balasto por lo que para cualquier actuación de dimensionado, análisis del ciclo de vida o planificación del mantenimiento se recomienda realizar una mayoración de las cargas estáticas consideradas.

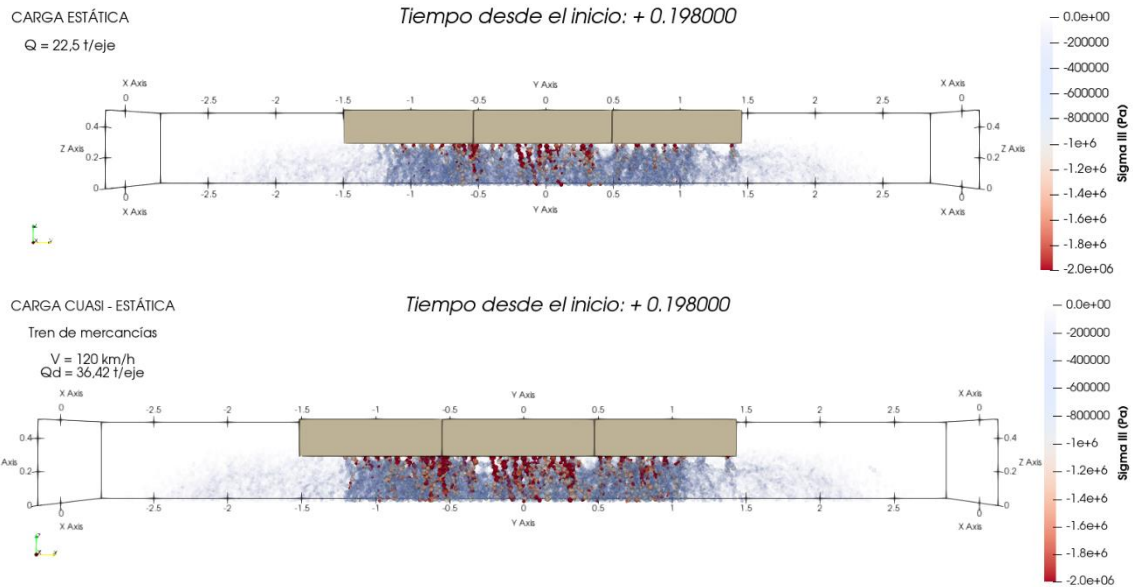


Figura 65. Comparativa entre el principal esfuerzo de compresión en la capa de balasto producido por un tren de mercancías ante una carga estática (arriba) y ante una carga cuasiestática (abajo). (Elaboración propia).

## 6.5 CARGA LATERAL STPT

### 6.5.1 Descripción

Los ensayos de carga lateral de una traviesa permiten estimar la resistencia lateral de la vía, por lo que este tipo de ensayos ha sido empleado en multitud de trabajos para obtener una estimación de la resistencia transversal de la vía, si bien los resultados obtenidos pueden ser muy variables. En (Esmaeili et al., 2017) se obtuvieron valores de la resistencia entre  $6\text{ kN}$  y  $11\text{ kN}$ , mientras que en (Kabo, 2006) se obtienen resistencias entre los  $20,6\text{ kN}$  y  $23,9\text{ kN}$ . Para el tramo de vía objeto de estudio se han simulado tres ensayos STPT empleando el modelo numérico de traviesa única. Se han realizado tres escalones de carga en los que se ha aplicado una carga lateral constante durante  $0,35\text{ s}$  para comprobar cuál es el valor límite para la estabilidad transversal de la vía. A pesar de que el objetivo principal del presente trabajo es el estudio de la dinámica vertical del tramo Valencia – Silla, la ejecución de este tipo de pruebas permite evaluar la respuesta del modelo ante situaciones a las que a priori no ha sido diseñado.

### 6.5.2 Resistencia transversal de la vía

En la *Figura 66* se muestra el desplazamiento lateral que sufre la traviesa ante la aplicación de una carga horizontal sobre la misma. Para determinar la resistencia lateral se han realizado tres ensayos con cargas laterales de  $25\text{ kN}$ ,  $30\text{ kN}$  y  $35\text{ kN}$ . Se ha obtenido que la capa de balasto resiste las sollicitaciones de  $25\text{ kN}$  y  $30\text{ kN}$ , alcanzado

la traviesa desplazamientos horizontales de 27 mm y 32 mm respectivamente. Para valores por encima de los 30 kN no se puede garantizar la estabilidad lateral de la traviesa, ya que se puede apreciar como la fuerza supera la resistencia lateral ofrecida por la banqueta de balasto, impidiendo la estabilización de la traviesa.

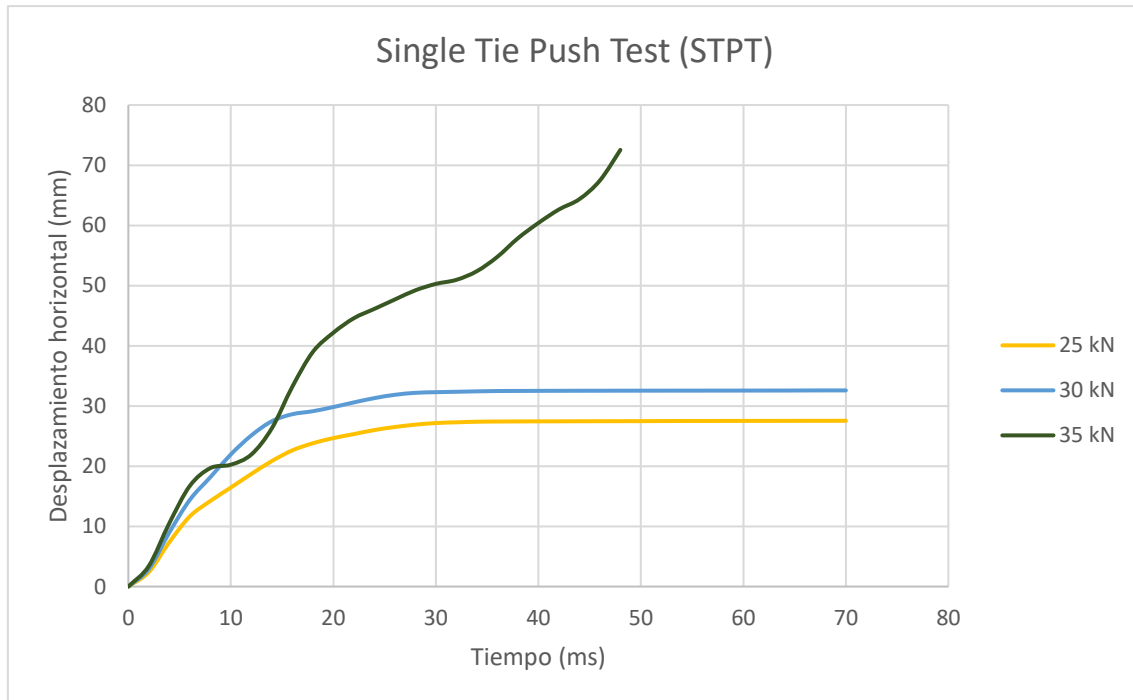
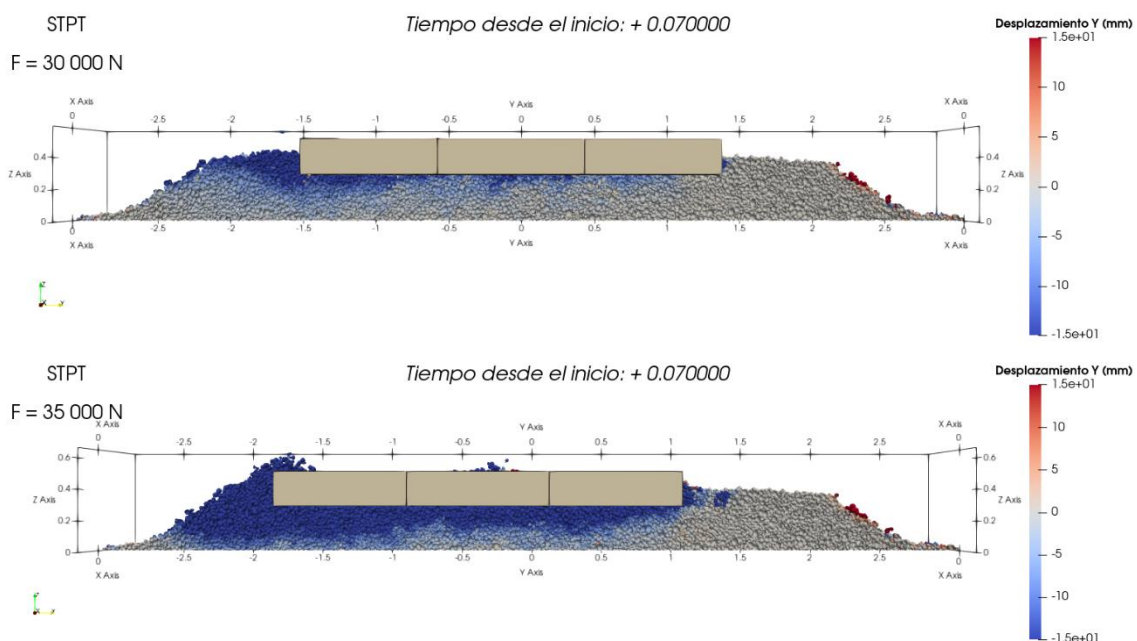


Figura 66. Desplazamiento horizontal de la traviesa tras la aplicación de una carga lateral en la misma, simulando un ensayo STPT. (Elaboración propia).

Los resultados obtenidos se asemejan a los obtenidos en (Khatibi et al., 2017) donde se realizaron ensayos STPT en una vía real que posteriormente se compararon con los resultados obtenidos en simulaciones de Elementos Discretos. En este estudio los autores obtuvieron resistencias laterales de hasta 20 kN para una vía con un espesor del balasto bajo traviesa de 350 mm y hombreras de 400 mm de longitud. En este caso la resistencia lateral obtenida es superior a estos resultados y muy superior a la mayoría de los resultados obtenidos en ensayos de campo. Este valor tan elevado para la resistencia transversal se puede achacar a una longitud de las hombreras superior a la media, 600 mm en el modelo, y a un espesor de la capa de balasto menor al considerado en el estudio mencionado ya que las dimensiones de la banqueta de balasto, y entre ellas la longitud de la hombrera ejercen una gran influencia sobre la resistencia lateral de la vía como se reseña en (Villalba, 2017).

### 6.5.3 Desplazamiento del balasto

La aplicación de una carga transversal sobre la traviesa se traduce en un desplazamiento de las partículas de balasto. La diferencia en los desplazamientos para un caso en el que la vía resiste y un caso en el que la fuerza aplicada ha superado completamente la resistencia transversal de la banqueta de balasto, como se muestra en la *Figura 67* resulta considerable. Para el caso de la carga de 35 kN el desplazamiento de la traviesa es tal que es visible a simple vista y se puede afirmar con seguridad que la traviesa hubiera abandonado el balasto de no haber detenido la simulación.



*Figura 67. Comparativa de los desplazamientos transversales de las piedras de balasto en el eje vertical para una carga lateral de 30 kN (arriba) y 35 kN (abajo). (Elaboración propia).*

En la *Figura 68* se puede observar como la mayoría de las partículas desplazadas horizontalmente son las situadas en la zona de la hombrera que realiza un empuje pasivo sobre la traviesa, la gran movilización de estas partículas, con desplazamientos del orden de los 15 mm es una prueba de que en las hombreras de la capa de balasto se moviliza el empuje pasivo de la capa granular cuando las traviesas se encuentran sometidas a cargas laterales.

Por otra parte, también se observa cierta movilización en el caso de los 30 kN de las partículas próximas a la base de la traviesa debido al rozamiento de la misma, si bien estos desplazamientos no son completamente homogéneos a lo largo de la base lo que

resalta la influencia del bateo y la cantidad de contactos de las piedras con la traviesa sobre la resistencia transversal de la vía. En el caso de la carga de 35 kN, para la cual la resistencia lateral ha sido completamente sobre pasada se puede observar cómo los desplazamientos siguen los mismos patrones que en el caso anterior, pero el número de partículas movilizadas es mucho mayor produciéndose una deformación general de la banqueta.

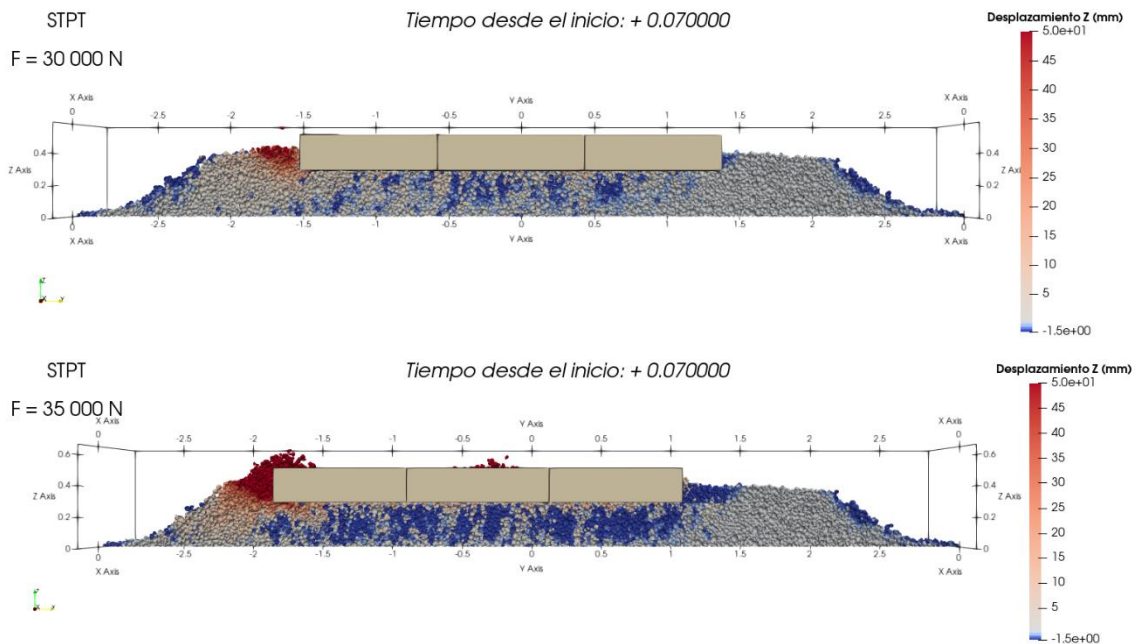


Figura 68. Comparativa de los desplazamientos transversales de las piedras de balasto en el eje vertical para una carga lateral de 30 kN (arriba) y 35 kN (abajo). (Elaboración propia).

La carga lateral sobre la traviesa también provoca que las partículas de balasto se desplacen verticalmente, como se muestra en la Figura 68. En un caso en el que la vía resiste la carga transversal, las partículas de la zona de la hombrera han mostrado ascensos de un máximo de 50 mm, mientras que en la zona bajo traviesa aparecen pequeños descensos, menores a 1,5 mm agrupados en pequeñas columnas inclinadas levemente. Para el caso de la resistencia transversal de la banqueta sobrepasada estos desplazamientos se acentúan y se llevan hasta un extremo que no se presenta en condiciones normales de vía.

Por último, en la Figura 69, se muestra la comparativa en planta entre los desplazamientos sufridos por las partículas de balasto en las dos direcciones estudiadas

para la carga lateral de 30 kN. Respecto a los desplazamientos en el eje Z, se confirma lo que ya se había mencionado y se puede afirmar que la zona de la hombrera que presenta un hinchamiento considerable se limita al espesor de la traviesa. En lo que respecta a los desplazamientos en el eje transversal de la vía se puede observar como la zona de la hombrera movilizada por el empuje de la traviesa es considerable, alcanzando los límites del modelo. Por otra parte se puede apreciar como el balasto de los laterales de la traviesa también ha sufrido pequeños desplazamientos de entre 5 mm y 10 mm como consecuencia del rozamiento de la traviesa con estas zonas de la banqueteta.

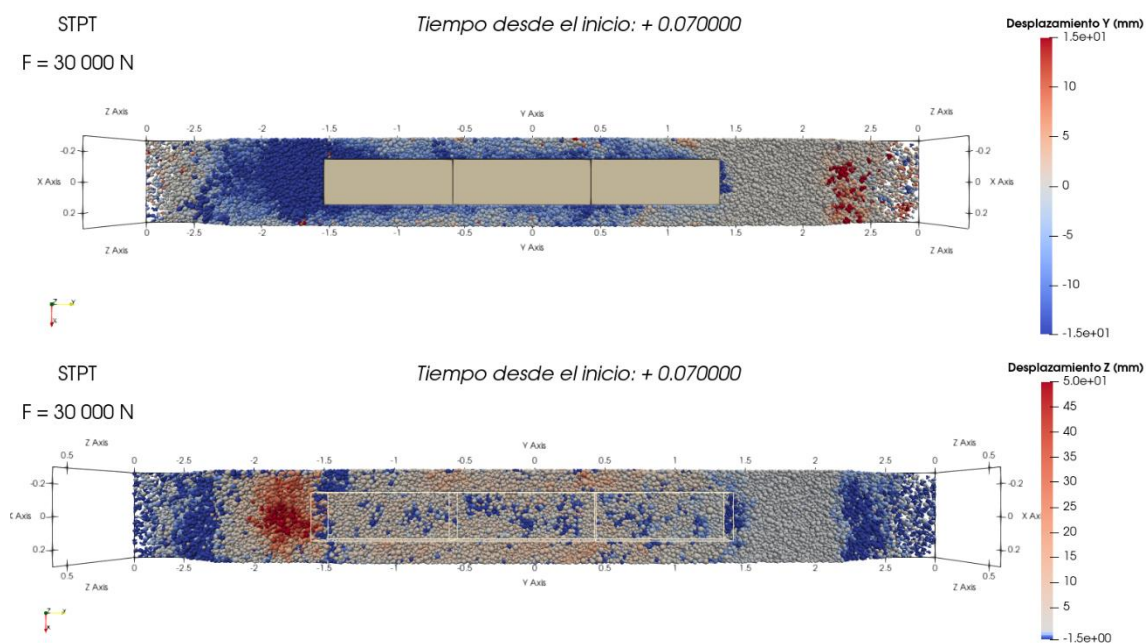


Figura 69. Vista en planta de la magnitud del desplazamiento de las piedras de balasto en el eje Y (arriba) y en el eje Z (abajo). (Elaboración propia).

#### 6.5.4 Velocidades

La medida de la velocidad de las partículas en la banqueteta permite determinar que zonas del balasto están resultado afectadas por la aplicación de cargas, además de permitir identificar patrones de desplazamiento. Como se aprecia en la *Figura 70* al inicio del ensayo se movilizan una gran cantidad de partículas de la hombrera hacia la que se empuja la traviesa, mientras que en la hombrera contraria las partículas se encuentran prácticamente en reposo. También se puede apreciar cómo se movilizan algunas partículas de la zona bajo traviesa y en los laterales de la misma, aunque en menor medida y de forma más irregular que en la zona de la hombrera. Se puede concluir, por tanto, que las partículas se movilizan mayoritariamente en las zonas de la banqueteta de

balasto en las que recae la mayor parte de la resistencia lateral de la vía: hombreras y superficies de la traviesa en contacto con el balasto.

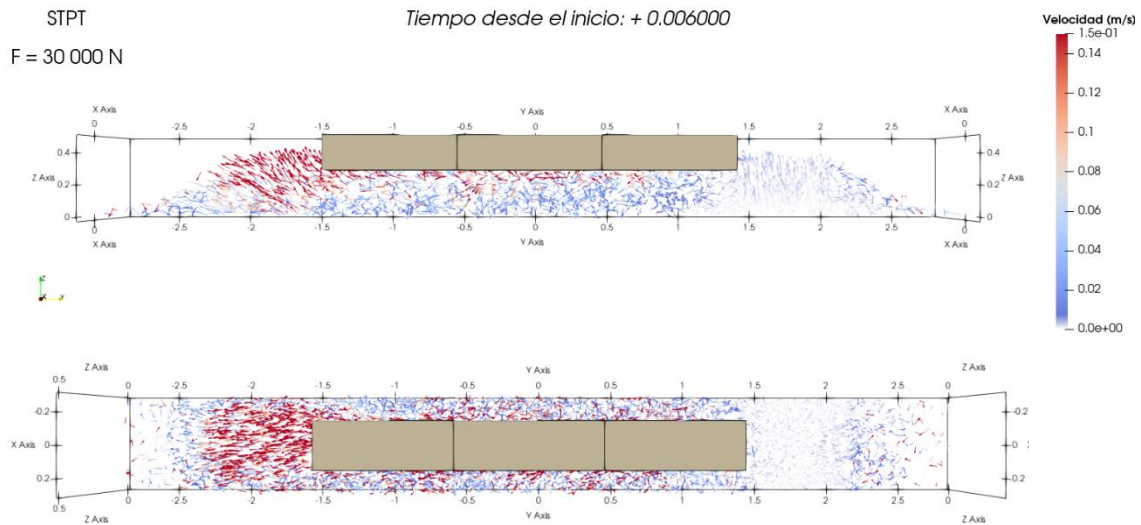


Figura 70. Vista en alzado (arriba) y planta (abajo) de las velocidades de las partículas de balasto al poco tiempo de aplicación de la carga lateral sobre la traviesa. (Elaboración propia).

En los instantes cercanos a la estabilización del desplazamiento de la traviesa la situación es la que se muestra en la *Figura 71*. En este punto la única zona de la banqueta de balasto que se sigue movilizandode forma significativa, con velocidades de las partículas superiores a  $0,1 \text{ m/s}$ , es una zona reducida de la hombrera muy cercana a la traviesa. Es decir, esta zona de la hombrera es la principal responsable de la deformación una vez superadas las fases iniciales, lo que se corresponde con los datos obtenidos de desplazamientos, donde se ha mostrado como esta misma zona presentaba las mayores deformaciones una vez alcanzado el estado final.

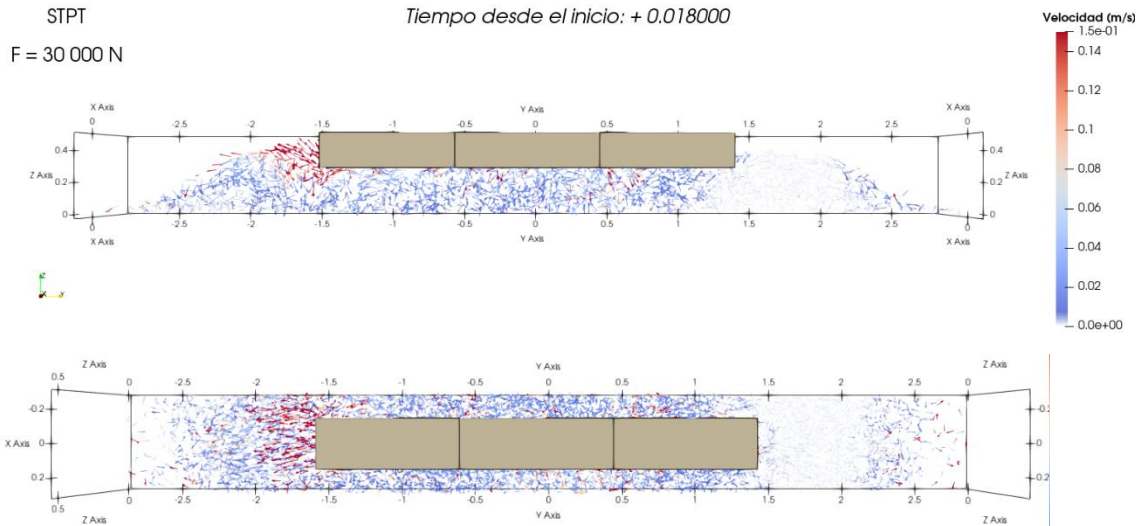


Figura 71. Vista en alzado (arriba) y planta (abajo) de las velocidades de las partículas de balasto en un instante cercano a la estabilización del modelo tras la aplicación de carga lateral sobre la traviesa. (Elaboración propia).

Se ha mostrado como la zona más vulnerable a la deformación lateral es la zona de la hombrera contra la que se empuja la traviesa. Este hecho resalta la importancia que puede tener realizar una buena compactación en las hombreras para dotar al tramo de mayor resistencia ante los esfuerzos transversales.

### 6.5.5 Esfuerzos

A continuación, se realiza un análisis sobre la variación en los esfuerzos de compresión soportados por las partículas a lo largo de la banqueta de balasto. Uno de los aspectos más significativos, que se puede observar en la *Figura 72*, es la diferencia en la forma en la que se distribuyen los esfuerzos entre el inicio y el final del ensayo.

Al inicio del ensayo el esfuerzo sobre las piedras se distribuye de manera relativamente uniforme entre la zona de la hombrera y la zona inferior de la traviesa, con la presencia de las habituales heterogeneidades y cadenas de transmisión de esfuerzos que ya se han detallado en las anteriores solicitaciones. Dichas cadenas de esfuerzos se encuentran inclinadas para este caso particular, debido a la naturaleza de la fuerza horizontal ante la que se oponen. A pesar de esta relativa homogeneidad, en la arista extrema de la traviesa en la hombrera resistente se produce una concentración de tensiones sobre las piedras que alcanza valores superiores a los 2 MPa. Por tanto, esta es la principal zona susceptible de causar la rotura en las piedras de balasto. Cabe destacar cómo los esfuerzos no son soportados por todas las partículas que recubren la traviesa, sino solamente por aquellas que se encuentran más confinadas en la zona



bajo la traviesa. Este fenómeno puede deberse a la falta de compactación de las partículas que recubren la traviesa, que nuevamente se pone de relevancia como un factor a cuidar en el mantenimiento del tramo.

Conforme avanza el tiempo, los esfuerzos sobre las partículas de la hombrera van disminuyendo hasta asemejarse a los que existen en esta zona en las sollicitaciones verticales de la traviesa. Esto es importante, ya que nos indica que mientras que, al inicio del desplazamiento, el empuje pasivo de la hombrera tiene un efecto considerable sobre la resistencia, una vez que se ha alcanzado el reposo de la traviesa el empuje pasivo no se moviliza y la totalidad de la resistencia a la carga proviene de la fricción con las caras de la misma.

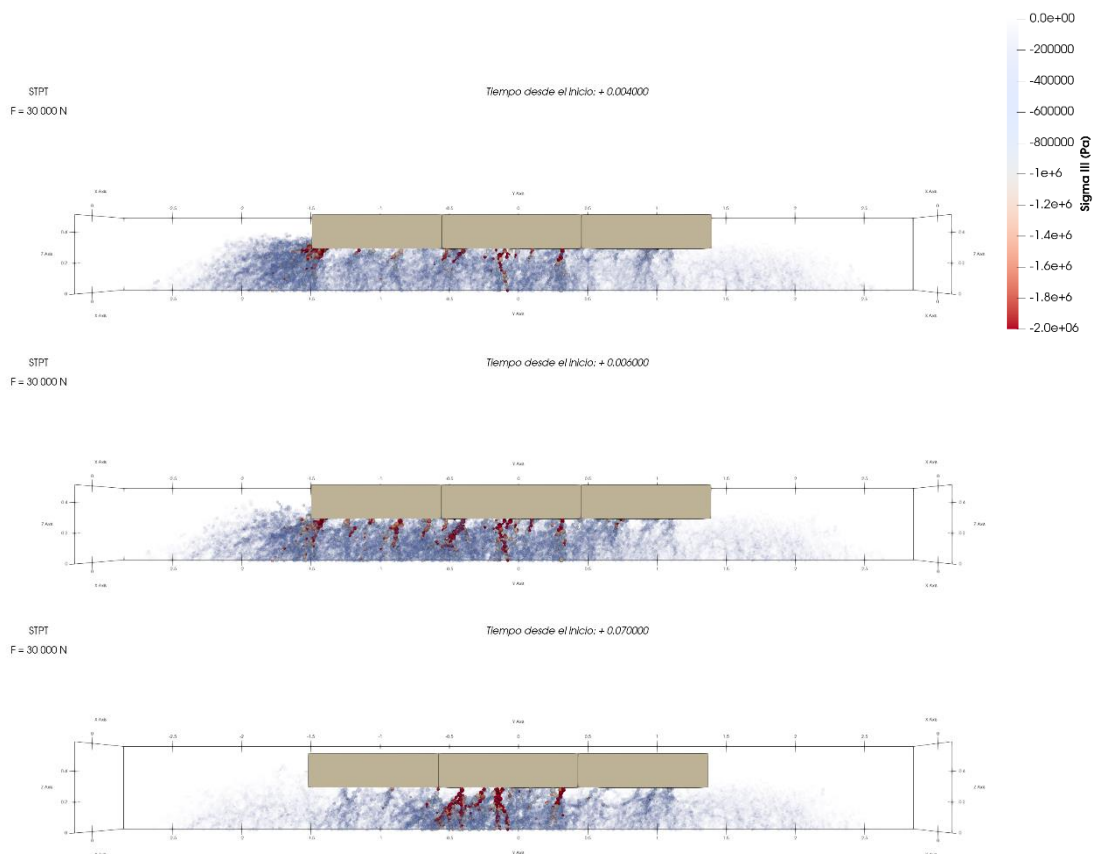
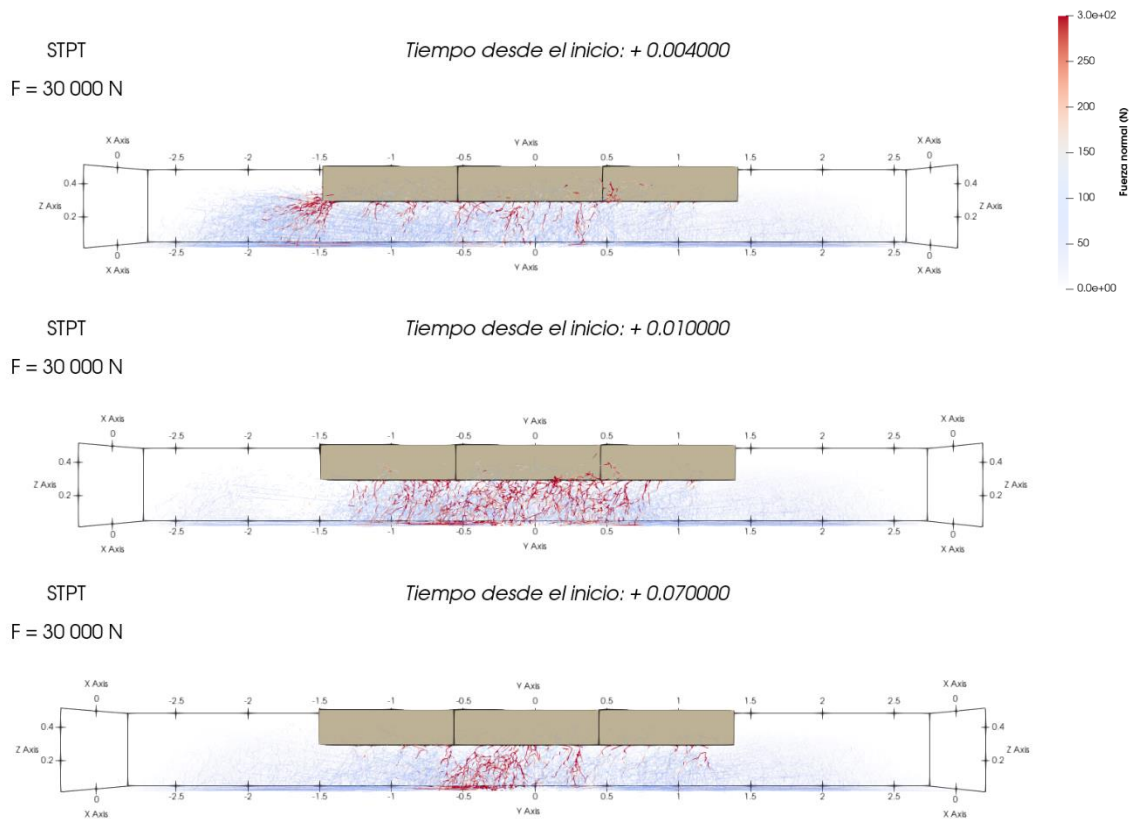


Figura 72. Mayor esfuerzo de compresión soportado por las piedras de balasto en los instantes iniciales (arriba y centro) y al final del ensayo (abajo). (Elaboración propia).

### 6.5.6 Cadenas de fuerza normal

La manera en la que se transmite la fuerza normal entre partículas es similar a la distribución de esfuerzos descrita en el apartado anterior, como es lógico. Nuevamente durante el inicio del ensayo la mayor parte de la fuerza se transmite a través de las

partículas del extremo inferior de la traviesa, con valores del orden de los 300 N como puede apreciarse en la *Figura 73*. Es decir, en el inicio gran parte de la resistencia viene dada por la “punta” de la traviesa, pero una vez que las partículas de esta zona se movilizan y pierden compacidad la carga se desplaza hacia otras zonas más compactas, como el balasto bajo la traviesa.



*Figura 73. Distintas etapas en el proceso de estabilización de la traviesa bajo una carga lateral de 30 kN, se puede apreciar como la fuerza normal entre partículas varía a lo largo del proceso. (Elaboración propia).*

## 6.6 SOLICITACIÓN DINÁMICA

### 6.6.1 Descripción

El objetivo de esta solicitud es aproximarse a los efectos reales provocados por el paso de los trenes sobre el tramo Valencia – Silla. Por ello se considera una carga variable sobre la traviesa, que es función de la distancia de la traviesa al eje del tren, tal y como se detalla en el subapartado 5.4.5 *Carga dinámica*. A efectos de este estudio se han considerado dos casos: el paso de un eje simple y el paso de una composición completa de la *Serie 447*, ambos a una velocidad de 120 km/h que es la máxima que pueden alcanzar estas unidades comercialmente. El paso de un eje simple sobre una

traviesa nos permite estudiar con mayor sencillez cómo se comporta en detalle el balasto ante una carga móvil, mientras que el paso de la composición completa permite determinar el efecto que produce un tren real desde un punto de vista más amplio.

En ambos casos se ha considerado la carga de cada eje mayorada mediante el criterio de Eisenmann, para considerar los efectos de la dinámica vertical de la vía analizando de esta manera el caso más desfavorable posible para la infraestructura. Como se ha descrito en anteriores capítulos, los trenes de mercancías son aquellos que circulan con mayor frecuencia sobre el tramo Valencia – Silla, es por ello que el análisis de estos casos de carga arroja datos significativos sobre la situación real del tramo.

### 6.6.2 Descenso de la traviesa

El patrón de descenso de la traviesa ante una sollicitación dinámica presenta considerables diferencias con el obtenido con la aplicación de cargas estáticas y cuasiestáticas. Debido a que la carga sobre la traviesa va aumentando progresivamente conforme se aproxima el eje del tren la traviesa no presenta un descenso oscilante, como sucedía con los impactos provocados por las otras cargas. La *Figura 74* representa el comportamiento de la traviesa ante el paso del eje motor de un tren de la *Serie 447* a 120 km/h, que teniendo en cuenta el coeficiente de mayoración propuesto por *Eisenmann* es de 21,50 t/eje. Sobre esta situación se pueden destacar varios aspectos con respecto al resto de sollicitaciones:

- Por una parte, el asiento máximo es mucho menor, solamente 0,763 mm, que en la sollicitación bajo la carga estática para un tren de cercanías. Esto se debe a la aplicación progresiva de la carga y a que la traviesa solamente soporta la máxima carga durante un pequeño instante de tiempo.
- En tan solo 0,12 s se produce todo el proceso de carga y descarga de la traviesa en el paso de un solo eje a 120 km/h.
- El descenso de la traviesa no es uniforme ni lineal en el tiempo, a pesar de que la carga aplicada sí que varía de forma lineal. Esto es debido a la respuesta elástica de la banqueta de balasto y a la variabilidad en el contacto con las diferentes partículas a lo largo del tiempo.



Figura 74. Paso sobre una traviesa de un solo eje con la carga correspondiente a un cercanoías 447 a 120 km/h mayorada por Eisenmann. (Elaboración propia).

Cuando se tiene en cuenta el paso de una unidad completa de la *Serie 447* (Figura 75) entra en juego la deformación de la capa de balasto y los solapes entre las cargas de los ejes montados sobre un mismo bogie. En la mencionada figura se observa la diferencia entre el descenso provocado por el paso de los ejes motores de las cabezas tractoras y los ejes remolcados, menos pesados, del coche intermedio. Los descensos alcanzados por la traviesa son similares a los obtenidos en el caso de un solo eje, pudiendo observarse como entre los ejes de un mismo bogie la traviesa no tiene tiempo de recuperar la deformación inicial, produciéndose una serie de “*dientes de sierra*” al paso de la unidad de cercanoías. Son destacables una serie de efectos producidos sobre la traviesa:

- Tras el paso de los tres primeros bogies de la composición se producen asientos plásticos remanentes de 0,05 mm tras el primer bogie y de 0,12 mm respecto a la posición inicial tras el paso de los dos siguientes. Esta consolidación de la vía se asemeja al estado inicial de una vía tras su construcción, en el que el paso de cargas de manera prematura proporciona asientos significativos.
- Tras estos asientos iniciales la traviesa recupera su posición de partida al paso del resto de ejes de la composición, mostrando un comportamiento elástico y unos asientos similares a los producidos por los primeros ejes de la composición.
- El paso de ejes de las mismas características no es garantía de que la traviesa replique el mismo comportamiento que en casos anteriores, lo que se constituye

como otro factor en la importancia del comportamiento heterogéneo de la banqueta de balasto.

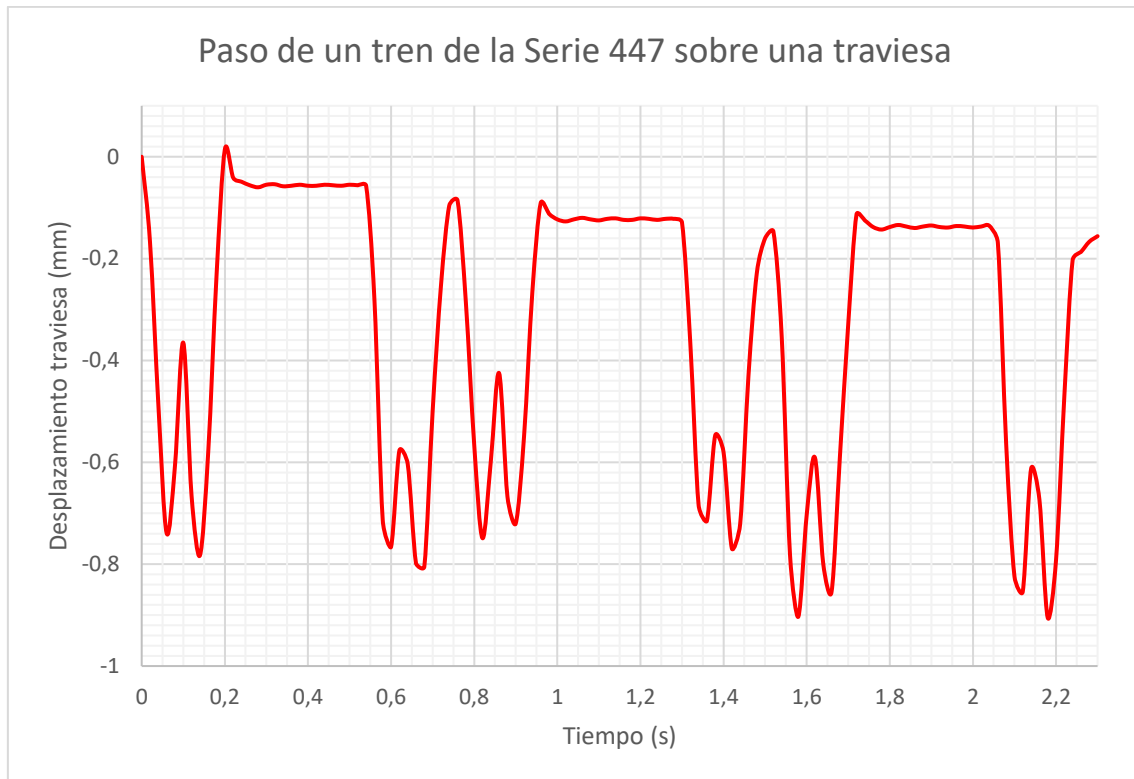


Figura 75. Descenso de una traviesa debido al paso de una composición de la Serie 447.  
(Elaboración propia).

### 6.6.3 Desplazamiento del balasto

#### Eje simple

Los desplazamientos durante el proceso de incremento de carga sobre la traviesa, es decir, durante la aproximación del eje a la traviesa, muestran patrones similares a los que arrojan las solicitaciones estáticas. En la *Figura 76* se aprecia como en la zona bajo traviesa los desplazamientos son mayormente verticales, de entre 0,01 mm y 1 mm, siendo mayores en las zonas más próximas a la base de la traviesa. En las hombreras se aprecia el habitual desprendimiento de las partículas más externas del talud, mientras que en la zona interna las partículas se desplazan hacia los laterales, empujadas por el descenso de las piedras bajo la traviesa. Durante esta fase no se ha producido hinchamiento en las zonas extremas de la traviesa.

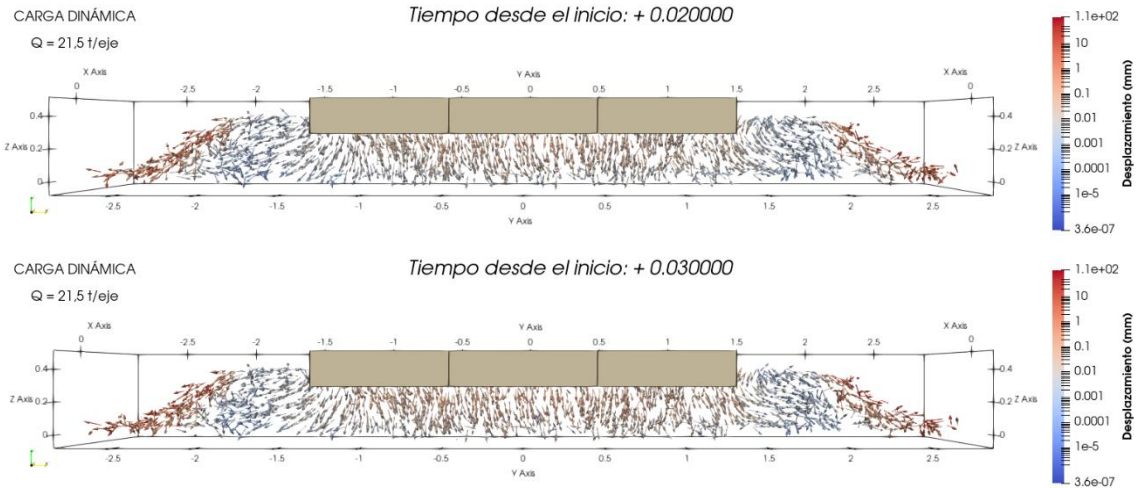


Figura 76. Magnitud y dirección de los desplazamientos en la banqueta de balasto durante el incremento de carga sobre la traviesa. (Elaboración propia).

En la *Figura 77* se muestra el instante en el que el eje se encuentra sobre la traviesa, por lo que el conjunto de traviesa y balasto está soportando la mayor carga posible durante este tipo de sollicitación. En este punto, la mayor parte de la zona bajo traviesa ha sufrido desplazamientos mayores a 0,1 mm, contribuyendo a desplazar lateralmente las partículas de las hombreras en gran medida y justificando el descenso de la traviesa. Nótese como las zonas que menor movilización presentan son las zonas más bajas de las hombreras, situadas a 2 m del eje de la vía.

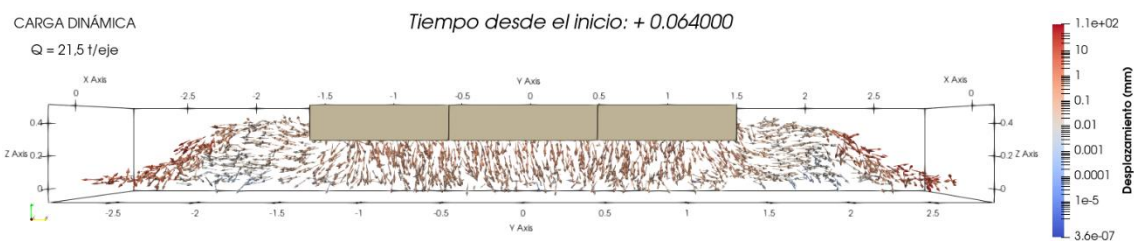


Figura 77. Magnitud y dirección de los desplazamientos en la banqueta de balasto durante el instante de mayor carga sobre la traviesa. (Elaboración propia).

La evolución de los desplazamientos una vez el eje ha superado la traviesa y comienza el descenso de la carga sobre la misma se muestra en la *Figura 78*. En ella se puede observar como las partículas comienzan a recuperar una posición similar a la inicial, pues comienza a descender la magnitud del desplazamiento frente a la posición inicial.

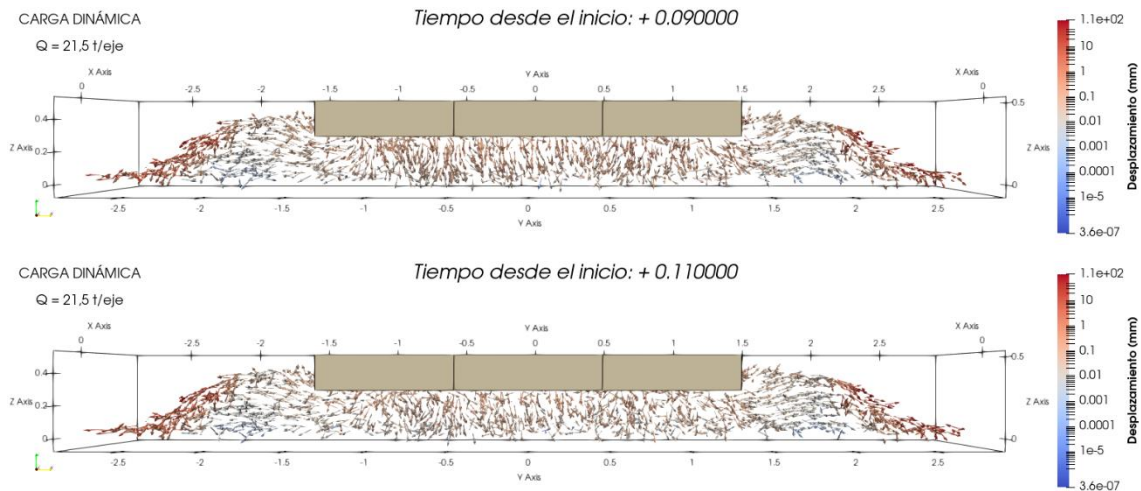


Figura 78. Magnitud y dirección de los desplazamientos en la banqueta de balasto durante el descenso de carga sobre la traviesa. (Elaboración propia).

Este proceso se completa en el instante en el que ya no actúa carga sobre la traviesa, instante mostrado en la *Figura 79*. En este instante final se aprecia como el desprendimiento de las piedras de la superficie de los taludes es el principal efecto del paso del eje del tren. Por otra parte, se puede apreciar cómo se ha inducido una deformación permanente sobre la banqueta, pues no todas las partículas han vuelto a su posición inicial. Las hombreras son las zonas que presentan la única dirección clara de deformación, por lo que se concluye que gran parte de la deformación plástica de la vía se debe al desplazamiento lateral del balasto, que posteriormente no es capaz de alcanzar una situación similar a la inicial, si bien es cierto que estas deformaciones son muy reducidas, del orden de las milésimas de milímetro.

En la zona bajo la traviesa se alcanza la mayor magnitud de los desplazamientos en el estado final, con valores entre  $0,1 \text{ mm}$  y  $1 \text{ mm}$ , obviando las partículas desprendidas de los taludes. A pesar de esto, no se aprecia ninguna dirección preferente de deformación, por lo que resulta apropiado considerar que se ha producido un reordenamiento de las partículas que no ha tenido un gran efecto sobre la deformación de la banqueta de balasto.

Esta situación, en la que una vía sufre asentamientos permanentes perceptibles tras el paso de cargas es común en las vías nuevas y poco consolidadas, o en vías en las que se han realizado operaciones recientes de bateo, en las que a pesar de efectuar la estabilización dinámica de vía aún se requiere de la circulación de trenes sobre el tramo

para alcanzar una consolidación definitiva. Por tanto, el modelo propuesto resulta adecuado para evaluar los efectos de este tipo de situaciones sobre el tramo.

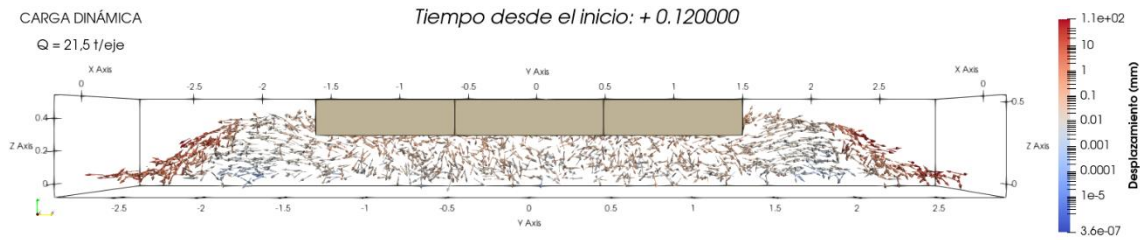


Figura 79. Magnitud y dirección de los desplazamientos en la banqueta de balasto una vez la traviesa se encuentra completamente descargada. (Elaboración propia).

En la Figura 80, se presentan los desplazamientos verticales de las partículas en el momento de mayor aplicación de la carga. Se aprecia como los desplazamientos más relevantes se concentran en la zona bajo la traviesa, como sucedía en el resto de las sollicitaciones. Sin embargo, la magnitud de estos desplazamientos es mucho menor que en el caso de las cargas estáticas, a pesar de soportar mayor carga por eje que la considerada para una unidad de cercanías estática. Además, se puede apreciar como los desplazamientos ascendentes son prácticamente inexistentes o poco significativos, mientras que en las sollicitaciones estáticas cobraban gran importancia en los laterales de la traviesa.

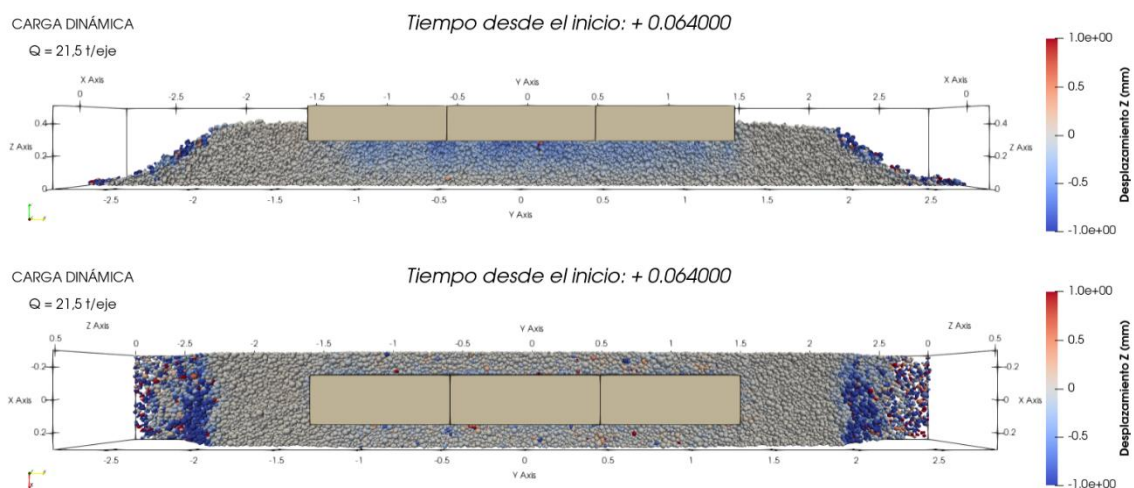


Figura 80. Desplazamientos verticales de las piedras de balasto en el instante de mayor aplicación de la carga dinámica de un solo eje. (Elaboración propia).

Con la componente horizontal de los desplazamientos, mostrada en la Figura 81, sucede lo mismo. Para la carga dinámica la magnitud de los mismos es mucho menor que en



las cargas estáticas, no superando en este caso los 0,2 mm salvo algunas partículas muy puntuales. El desplazamiento horizontal se concentra bajo los extremos de la traviesa, como ya se ha visto en otras sollicitaciones.

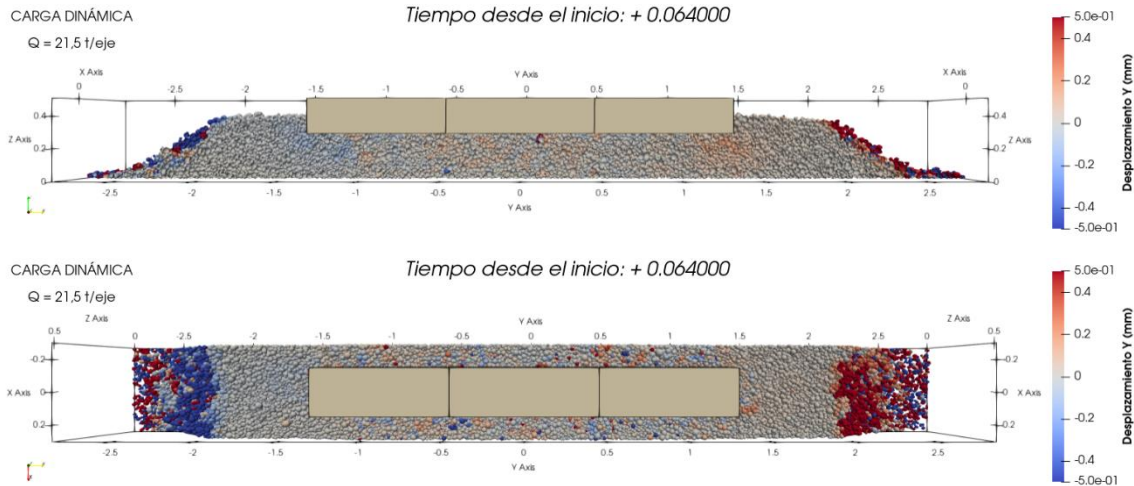


Figura 81. Desplazamientos horizontales de las piedras de balasto en el instante de mayor aplicación de la carga dinámica de un solo eje. (Elaboración propia).

### Unidad 447 completa

El comportamiento observado en la capa de balasto durante el paso de los ejes de cada bogie resulta prácticamente idéntico al mostrado para el caso de un eje simple, con la única diferencia de las repeticiones y las frecuencias entre las cargas y descargas. Lo más reseñable en lo referido a desplazamientos para el caso de la unidad completa es el estado deformacional presentado tras el paso de los distintos ejes de la composición, que permite estudiar los asientos permanentes en la vía. En la *Figura 82* se muestran los desplazamientos verticales en varios instantes. En ella se puede apreciar, cómo se ha producido una ligera deformación vertical permanente en la zona bajo traviesa, pero resulta prácticamente despreciable, por lo que se puede asumir que verticalmente la vía se ha comportado de forma elástica ante el paso de la composición.

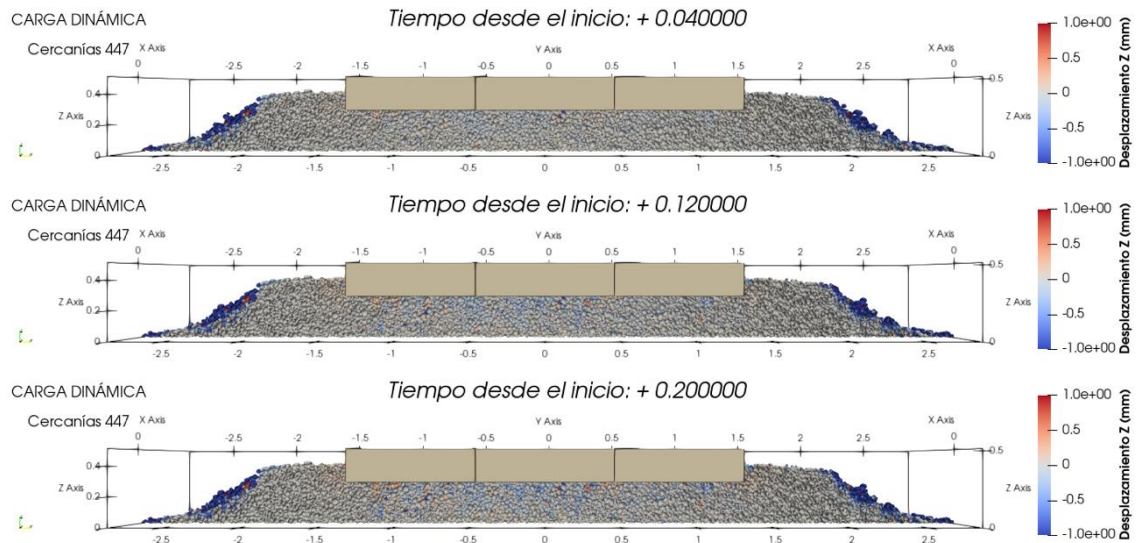


Figura 82. Componente vertical de los desplazamientos de las partículas tras el paso del primer bogie (arriba), tras el paso del tercer bogie (centro) y tras el paso del quinto bogie (abajo).  
(Elaboración propia).

En la componente horizontal (Figura 83), se aprecian mayores diferencias en los desplazamientos, observadno como a partir del paso del tercer bogie se ha producido una ligera deformación lateral en algunas de las partículas situadas bajo la traviesa. El asiento plástico producido en la vía se puede relacionar con el desplazamiento de estas partículas.

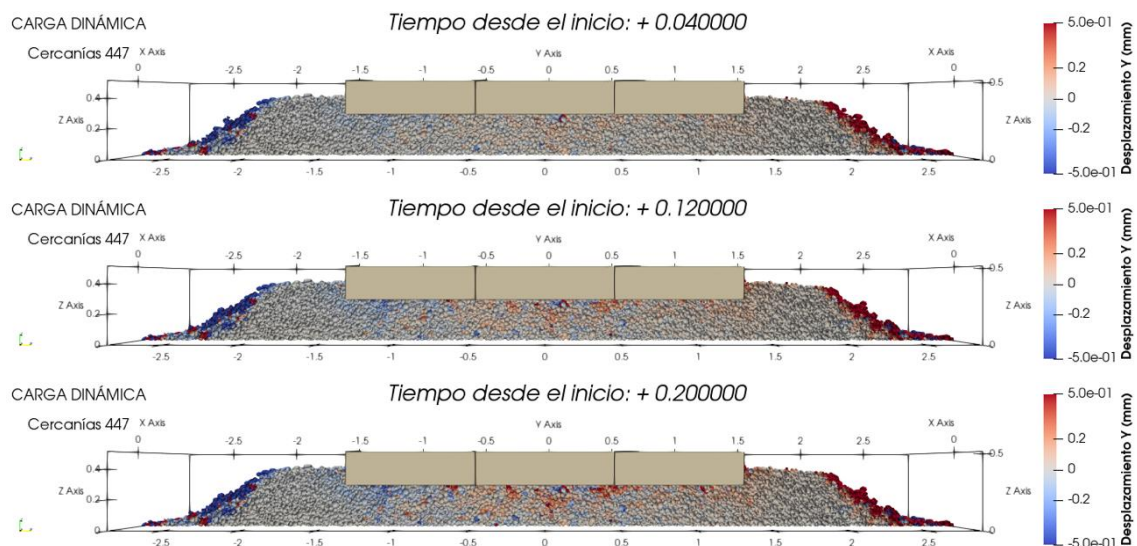
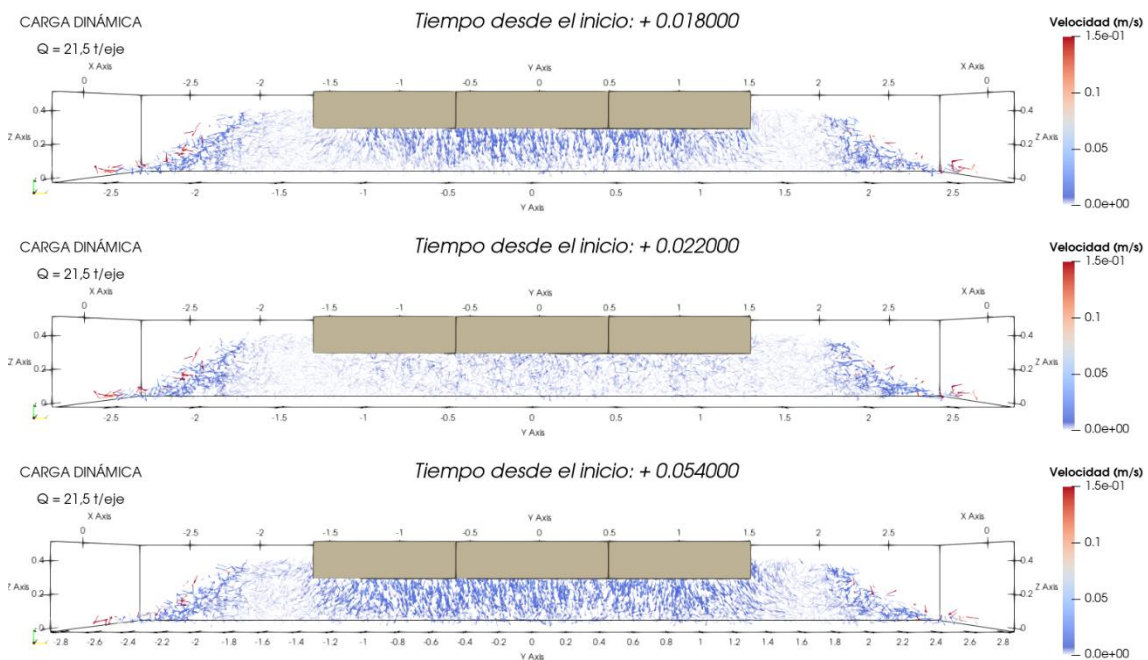


Figura 83. Componente horizontal de los desplazamientos de las partículas tras el paso del primer bogie (arriba), tras el paso del tercer bogie (centro) y tras el paso del quinto bogie (abajo).  
(Elaboración propia).

### 6.6.4 Velocidades

#### Eje simple

Durante la carga progresiva de la traviesa las partículas que presentan las mayores velocidades son las situadas justamente bajo la misma, de nuevo presentando magnitudes inferiores a las que se obtenían en las sollicitaciones estáticas. Debido a la respuesta elástica de la capa de balasto las velocidades no son constantes a lo largo del tiempo, llegando incluso a anularse en algunos instantes como se muestra en la *Figura 84*. Este es el comportamiento que cabría esperar de una capa como el balasto, en el que uno de los requerimientos principales es la elasticidad de la misma. A su vez esta irregularidad en las velocidades es la responsable de que el descenso de la traviesa sea irregular en el tiempo, como se había mencionado previamente. En lo relativo al proceso de descarga de la traviesa el comportamiento es similar, solo que en este caso las velocidades sobre las partículas bajo la traviesa son mayoritariamente ascendentes, mostrando como las piedras de balasto tienden a recuperar su posición inicial.

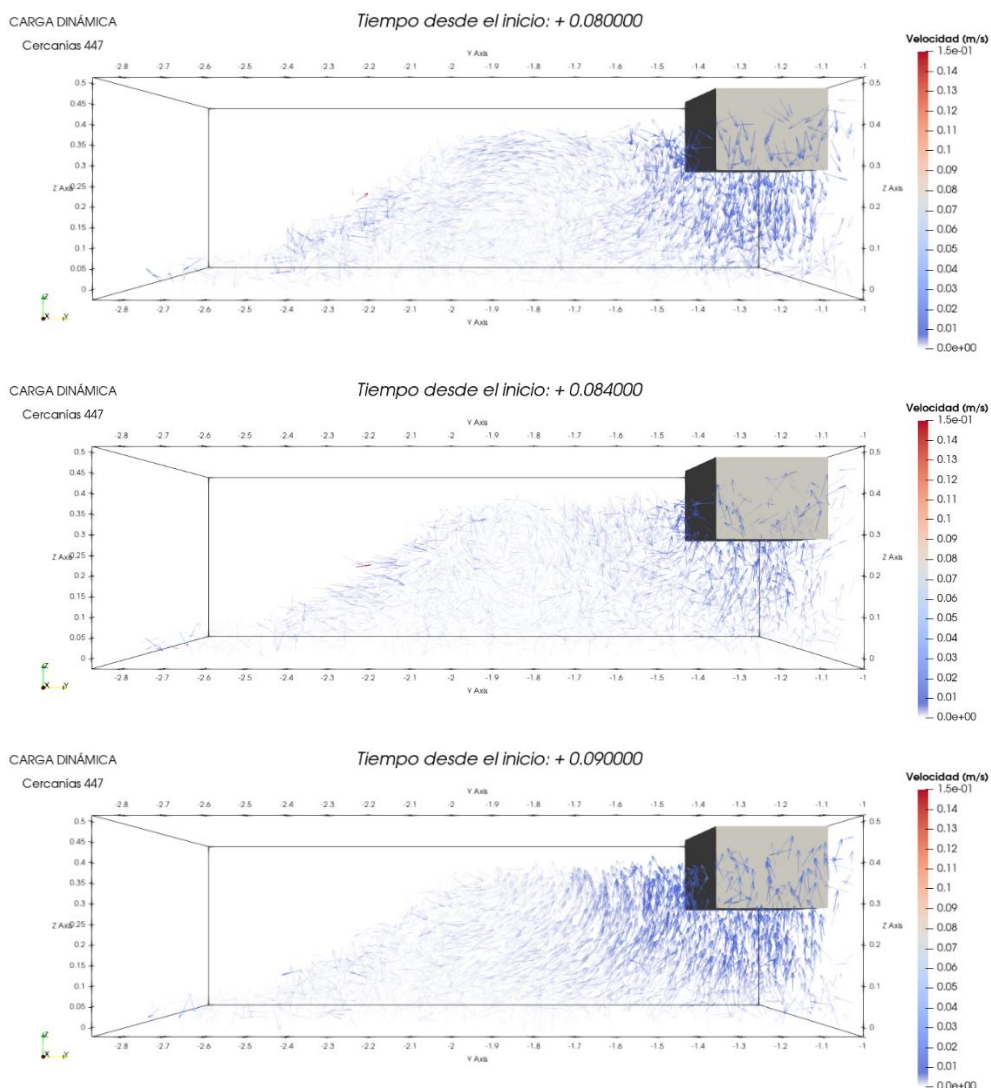


*Figura 84. Variación en las velocidades de las partículas de balasto durante el acercamiento del eje de un tren de cercanías. (Elaboración propia).*

#### Unidad 447 completa

El comportamiento de la capa de balasto al paso de la unidad completa muestra nuevamente un comportamiento muy similar al caso de un eje único, no presentando

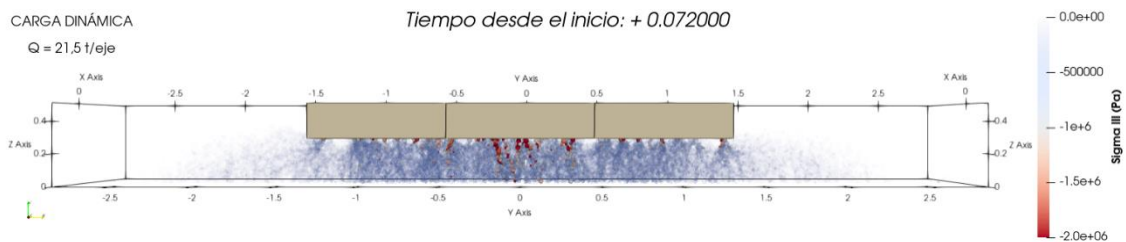
notables diferencias. Para no sobrecargar el presente documento se reseña únicamente el comportamiento de la hombrera ante el paso del tercer bogie de la composición en la *Figura 85*. Como se puede apreciar en este detalle de la hombrera el paso del primer eje del bogie induce un descenso en las partículas bajo la traviesa, en el momento que se alcanza el punto entre los dos ejes las partículas adquieren velocidades ascendentes debido a la respuesta elástica de la capa de balasto y estas velocidades se siguen incrementando a pesar de que el segundo eje del bogie pase por encima de la traviesa. Este es un resultado interesante, pues parece indicar que el primer eje de un bogie es el que más impacto tiene sobre la banqueta de balasto.



*Figura 85. Detalle de las velocidades de las partículas en la hombrera derecha en el sentido de la marcha bajo la acción del primer eje del bogie (arriba), en el punto intermedio (centro) y bajo la acción del segundo eje del bogie (abajo). (Elaboración propia).*

### 6.6.5 Esfuerzos

Los esfuerzos a los que se encuentran sometidos las partículas de balasto presentan, para las dos sollicitaciones dinámicas estudiadas, una gran correlación con el aumento progresivo de la carga sobre la traviesa, no presentando variaciones irregulares como en el caso de las velocidades y alcanzando su máxima magnitud en el instante en el que el eje se encuentra sobre la traviesa. En la *Figura 86* se muestra el instante de máximo esfuerzo de la capa de balasto en el caso de un eje simple. Las heterogeneidades en la distribución ya reseñadas en las otras sollicitaciones también aparecen en este caso como cabría esperar, alcanzando picos máximos de esfuerzo de compresión de 12 MPa. Esto no debe suponer un problema si el árido empleado para balasto cumple con las especificaciones de Adif, donde se exige una resistencia mínima a compresión de 120 MPa. Es por ello que es difícil que el balasto se fracture, pero el desgaste y pequeñas roturas en las aristas si son susceptibles de ocurrir en estas zonas en las que se concentran mayormente los esfuerzos.



*Figura 86. Esfuerzos de compresión en la banqueta de balasto bajo una sollicitación dinámica de un solo eje correspondiente a un tren de cercanías. (Elaboración propia).*

Como complemento, en la *Figura 87*, se realiza una comparación entre los esfuerzos bajo traviesa al paso del primer y segundo eje de la *Serie 447*, pertenecientes ambos al mismo bogie y el último eje de la composición. En todos los casos tanto la magnitud de los esfuerzos como la distribución de los mismos en la banqueta resulta prácticamente idéntica. Esto pone de relieve que las deformaciones que se han sufrido en la misma no han tenido ningún efecto sobre la distribución de las cargas, principalmente a causa de que no han sido deformaciones elevadas. Resulta interesante comprobar que existe un cierto margen de deformación para el que la banqueta se puede deformar sin incrementar los esfuerzos sobre la misma, este será el rango de trabajo buscado para todo tramo ferroviario.

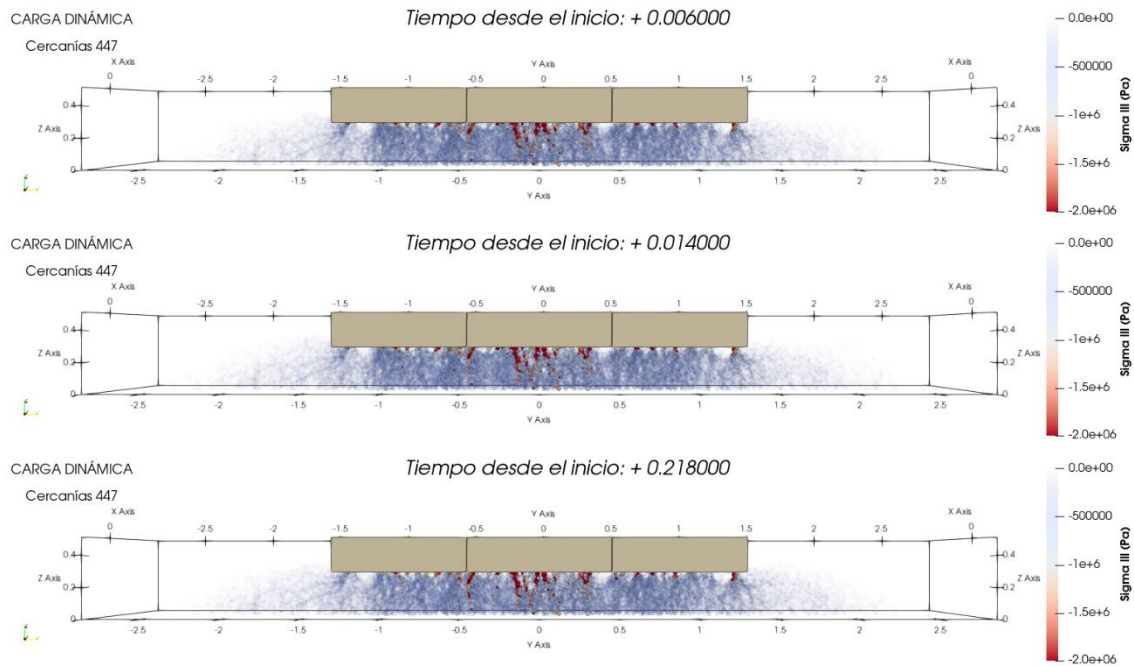


Figura 87. Comparativa entre los esfuerzos soportados por las partículas entre los dos ejes del primer bogie (arriba y centro) y el último eje de la composición (abajo). (Elaboración propia).

## 6.7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

A lo largo del análisis de los resultados obtenidos se ha mencionado la fuerte influencia que puede tener la generación del modelo en los resultados obtenidos al aplicar las distintas sollicitaciones planteadas. Esto se debe a que buena parte de los factores que intervienen en el proceso de generación del modelo están sujetos a la aleatoriedad de la generación de las partículas y a las interacciones que tengan lugar entre ellas.

Si bien es conocido que los resultados, por norma general, se enmarcarán en un mismo orden de magnitud, se hace necesario realizar una comprobación más rigurosa de la variabilidad existente durante la ejecución del modelo. Para ello se han generado dos nuevos modelos de traviesa única denominados *Réplica nº1* y *Réplica nº2* respectivamente. Estos modelos se han sometido a una carga estática equivalente a la de un eje de un tren de mercancías para poder comparar los descensos de la traviesa respecto al modelo original.

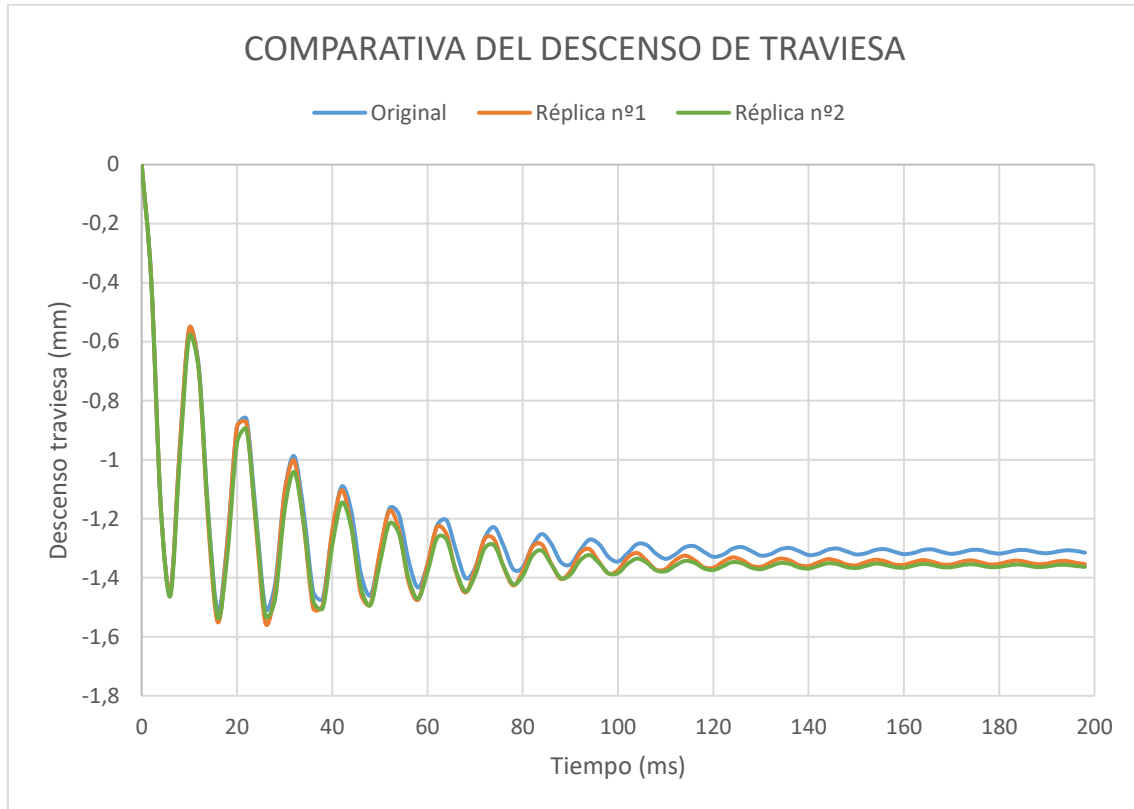


Figura 88. Comparativa entre el descenso de traviesa de dos réplicas y el modelo original para una carga equivalente a un tren de mercancías. (Elaboración propia).

En la *Figura 88* se muestran los descensos de la traviesa correspondientes a cada una de las réplicas del modelo. El modelo que menos descenso presenta es el original con *1,315 mm*, seguido de la *Réplica nº1* con *1,354 mm* y la *Réplica nº2* con *1,363 mm*. Esto pone de relevancia, que al menos para el número de casos ensayados las discrepancias entre distintos modelos son del orden del 4%, por lo que no resultan excesivamente elevadas y se puede asumir que los resultados obtenidos serán adecuados en la mayoría de los casos.

No obstante, siempre debe primar el criterio del técnico encargado de la interpretación de los resultados en base a sus conocimientos técnicos, pues el modelo numérico planteado es tan solo una herramienta que debe ser empleada como una más de entre todas las disponibles para alcanzar una buena labor profesional.

## 7 CONCLUSIONES

### 7.1 RECAPITULACIÓN DE RESULTADOS

El aumento del tráfico y de las cargas por eje sobre las infraestructuras ferroviarias supone un desafío para la capa de balasto, utilizada en la mayoría de las vías férreas del mundo. El empleo del Método de Elementos Discretos ha permitido analizar cualitativa y cuantitativamente el comportamiento de una capa granular que presenta una gran dificultad de modelización dada la imposibilidad en la medición de muchas magnitudes en vía, por lo que las referencias reales son escasas. La ventaja de la aplicación de un modelo numérico es que nos permite alcanzar un nivel en la obtención de datos sobre el comportamiento del balasto que es difícil de alcanzar mediante ensayos en campo o en laboratorio, permitiendo el análisis de variables no medibles por dificultad técnica y falta de dispositivos adecuados.

Se ha realizado un estudio del comportamiento de la capa de balasto del tramo ferroviario convencional Valencia – Silla. Para ello se han generado tres modelos de Elementos Discretos con diferente número de traviesas, en particular considerando una, tres y cinco traviesas, y se han estudiado las diferencias entre ellos. Los resultados han mostrado como las diferencias entre el modelo de una única traviesa y los modelos de múltiples traviesas no son significativas. Por lo que se recomienda emplear el modelo de traviesa única, más rápido computacionalmente, excepto que se pretenda realizar un análisis muy detallado de los desplazamientos del balasto en los alrededores de la traviesa o de la influencia entre los bulbos de tensiones de dos traviesas consecutivas.

Los modelos generados se han sometido a la aplicación de distintas solicitaciones que pretenden comprender la afección que tienen las circulaciones más significativas sobre el tramo, trenes de mercancías y trenes de viajeros de cercanías, sobre la capa de balasto. Para ello se han planteado solicitaciones de complejidad creciente, que han permitido realizar una comparación entre los resultados de estas. Todos los modelos se han sometido a la aplicación de una carga estática, que constituye la base para la comparación. Para el resto de los casos se ha empleado el modelo de una única traviesa, debido a la validez de los resultados obtenidos y a la mayor simplicidad. Los casos que se han aplicado específicamente al modelo de traviesa única son los siguientes:



- Carga estática mayorada para considerar los efectos de la dinámica vertical, lo que ha permitido estudiar el paso de un tren de mercancías a 80 km/h, 100 km/h y 120 km/h.
- Simulación de defectos en el material rodante y en la infraestructura, que han permitido comprobar el comportamiento diferencial del balasto ante la aplicación de cargas diferenciales sobre la traviesa con desviaciones del 5%, 10% y 20% respecto a la carga estática por eje de un tren de mercancías.
- Ensayo de carga lateral SPTP, que ha permitido establecer la resistencia lateral de la vía en 30 kN en concordancia con algunos resultados de la literatura disponible.
- Aplicación de una carga dinámica correspondiente a un tren de cercanías, que ha permitido estudiar el paso de una unidad completa de la Serie 447, mostrando un grado de exigencia menor sobre al balasto al producido por el impacto de cargas estáticas.

Una de las principales conclusiones obtenidas durante la aplicación práctica es que la heterogeneidad de la capa de balasto es el mayor condicionante en el comportamiento de la misma, provocando comportamientos diferenciales en función de multitud de factores, muchos de los cuales escapan del control del técnico. Destaca como el número de partículas en contacto con la traviesa es un factor condicionante en los asientos de la vía y en la transmisión y el reparto de esfuerzos de la banqueta. Es por todo ello por lo que se recomienda mantener la vía en buen estado, prestando la atención necesaria al mantenimiento y cuidando la regularidad de la superficie de la capa de balasto.

La heterogeneidad de la capa de balasto causa que los esfuerzos sobre las partículas se concentren en zonas específicas bajo la traviesa, que varían en función de las características de la banqueta. Estas concentraciones de esfuerzos provocan que las partículas de estas zonas sean más susceptibles al desgaste y a la rotura, aunque se ha comprobado como los esfuerzos que se producen en la banqueta raramente podrán superar la resistencia a la compresión exigida en la normativa para los áridos empleados como balasto. Durante el paso de la Serie 447 se ha comprobado como apenas se supera el 1% de la resistencia a compresión máxima que pueden soportar las piedras de balasto. Las sollicitaciones dinámicas, las más próximas a la realidad, presentan tensiones medias de 75 kPa en la base de la capa de balasto, lo que se corresponde con lo esperado y con los valores obtenidos en ensayos de laboratorio en (Sysyn et al., 2021)

Ante todo, los modelos numéricos no son más que una herramienta que deben servir como ayuda para el técnico capacitado a la toma de decisiones y a la priorización de recursos, debiendo siempre cuestionar la validez de los resultados ofrecidos por los mismos.

## 7.2 LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El presente Trabajo Final de Grado ha introducido la modelización de un tramo ferroviario real empleando el Método de Elementos Discretos. Pese a los esfuerzos realizados existen ciertas limitaciones en el modelo que ofrecen margen de mejora y abren la puerta a la realización de futuros trabajos sobre el tema:

- Emplear geometrías para las piedras de balasto y para la traviesa mas fieles a la realidad.
- Desarrollar un modelo que permita tener en consideración la rotura y el desgaste de las piedras de balasto, con su influencia en la deformación permanente de la vía.
- Estudiar la sensibilidad del modelo a las variaciones en la granulometría de las partículas
- Extensión del modelo a otros elementos de la infraestructura ferroviaria como los aparatos de vía.
- Realizar un modelo conjunto FEM – DEM que aproveche los puntos fuertes de cada uno de los métodos numéricos.

## 7.3 CONSECUCIÓN DE LOS OBJETIVOS PROPUESTOS

Durante el presente trabajo se han sentado las bases teóricas y se ha desarrollado un modelo de comportamiento de la capa de balasto que permite su aplicación a un tramo ferroviario real, en este caso al tramo entre Valencia y Silla. Al inicio del presente documento se plantearon una serie de objetivos que se consideran cumplidos:

- Se ha logrado desarrollar un modelo de comportamiento del balasto bajo traviesa, que permite ser extendido para considerar múltiples traviesas.
- Se ha demostrado que el modelo es válido para representar el comportamiento real del balasto mediante la comparación con rigideces obtenidas a partir de ensayos de campo.
- Se ha aplicado con éxito el modelo al tramo ferroviario entre Valencia y Silla, obteniendo datos que no se pueden obtener mediante los ensayos habituales y

logrando adquirir conocimientos que pueden ser aplicados al mantenimiento de la vía.

- Se ha evaluado la sensibilidad del modelo y se han determinado las limitaciones que deben tenerse en cuenta durante su aplicación.

Se espera que los resultados de este trabajo sirvan como fundamento para el desarrollo de modelos de comportamiento más complejos que permitan avanzar en la modelización de la capa de balasto y en la ejecución y mantenimiento de unas infraestructuras ferroviarias más seguras y resilientes, para afrontar los nuevos desafíos del sector ferroviario.

*Adrián Márquez Castellano*



**Valencia, 8 de julio de 2023**

## 8 BIBLIOGRAFÍA

Abdelkrim, M., Bonnet, G., & De Buhan, P. (2003). A computational procedure for predicting the long term residual settlement of a platform induced by repeated traffic loading. *Computers and Geotechnics*, 30(6), 463-476. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(03\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(03)00010-7)

About Hosn, R., Sibille, L., Benahmed, N., & Chareyre, B. (2017). Discrete numerical modeling of loose soil with spherical particles and interparticle rolling friction. *Granular Matter*, 19(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0687-0>

Adif, Declaración sobre la red 2024

Adif. ET 03.360.004.0 "Balasto".

Adif. ET 03.360.161.8 "Carril".

Adif. ET 03.360.571.8 "Traviesas monobloque de hormigón pretensado".

Adif. NAP 1-2-1.0 "Metodología para el diseño del trazado ferroviario".

Adif. NAV 3-1-2.1 "Traviesas monobloque de hormigón".

Adif. NAV 3-4-1.0 "Dimensionado de la banqueta".

Ahmed, S., Harkness, J., Le Pen, L., Powrie, W., & Zervos, A. (2016). Numerical modelling of railway ballast at the particle scale. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 40(5), 713-737. <https://doi.org/10.1002/nag.2424>

Alabbasi, Y., & Hussein, M. (2021). Geomechanical Modelling of Railroad Ballast: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(3), 815-839. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09390-4>

- Balamonica, K., Bergamini, A., & Van Damme, B. (2023). Estimation of the dynamic stiffness of railway ballast over a wide frequency range using the discrete element method. *Journal of Sound and Vibration*, *547*, 117533. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117533>
- Boon, C. W., Houlsby, G. T., & Utili, S. (2012). A new algorithm for contact detection between convex polygonal and polyhedral particles in the discrete element method. *Computers and Geotechnics*, *44*, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.03.012>
- Boon, C. W., Houlsby, G. T., & Utili, S. (2013). A new contact detection algorithm for three-dimensional non-spherical particles. *Powder Technology*, *248*, 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.040>
- Coetzee, C. J. (2016). Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape. *Powder Technology*, *297*, 50-70. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.04.003>
- Cundall, P. A. (1988). Formulation of a three-dimensional distinct element model—Part I. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, *25*(3), 107-116. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(88\)92293-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(88)92293-0)
- Cundall, P. A., & Hart, R. D. (1992). Numerical modelling of discontinua. *Engineering Computations*, *9*(2), 101-113. <https://doi.org/10.1108/eb023851>
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, *29*(1), 47-65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
- Danesh, A., Mirghasemi, A. A., & Palassi, M. (2020). Evaluation of particle shape on direct shear mechanical behavior of ballast assembly using discrete element

- method (DEM). *Transportation Geotechnics*, 23, 100357.  
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100357>
- Di Renzo, A., & Di Maio, F. P. (2004). Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. *Chemical Engineering Science*, 59(3), 525-541. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2003.09.037>
- Di Renzo, A., & Di Maio, F. P. (2005). An improved integral non-linear model for the contact of particles in distinct element simulations. *Chemical Engineering Science*, 60(5), 1303-1312. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.10.004>
- Eisenmann, J. (1969). Beanspruchung der Schiene als Träger. *ETR*, 8, 306f.
- Eliáš, J. (2014). Simulation of railway ballast using crushable polyhedral particles. *Powder Technology*, 264, 458-465. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.052>
- Eliáš, J. (2013). *DEM simulation of railway ballast using polyhedral elemental shapes*. III International Conference on Particle-based Methods – Fundamentals and Applications, Stuttgart, Germany.
- Esmaeili, M., Nouri, R., & Yousefian, K. (2017). Experimental comparison of the lateral resistance of tracks with steel slag ballast and limestone ballast materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231(2), 175-184. <https://doi.org/10.1177/0954409715623577>
- Ferrellec, J.-F., & McDowell, G. R. (2010). A method to model realistic particle shape and inertia in DEM. *Granular Matter*, 12(5), 459-467. <https://doi.org/10.1007/s10035-010-0205-8>
- Gallego, I., Muñoz, J., Rivas, A., & Sánchez-Cambronero, S. (2011). Vertical Track Stiffness as a New Parameter Involved in Designing High-Speed Railway Infrastructure. *Journal of Transportation Engineering*, 137(12), 971-979. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000288](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000288)

- García, X., Latham, J.-P., Xiang, J., & Harrison, J. P. (2009). A clustered overlapping sphere algorithm to represent real particles in discrete element modelling. *Géotechnique*, 59(9), 779-784.
- Harkness, J., Zervos, A., Le Pen, L., Aingaran, S., & Powrie, W. (2016). Discrete element simulation of railway ballast: Modelling cell pressure effects in triaxial tests. *Granular Matter*, 18(3), 65. <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0660-y>
- Hertz, H. (1882). Über die Berührung fester elastischer Körper. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 92, 156-171.
- Houlsby, G. T. (2009). Potential particles: A method for modelling non-circular particles in DEM. *Computers and Geotechnics*, 36(6), 953-959. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.03.001>
- Indraratna, B., Thakur, P. K., & Vinod, J. S. (2010). Experimental and Numerical Study of Railway Ballast Behavior under Cyclic Loading. *International Journal of Geomechanics*, 10(4), 136-144. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000055](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000055)
- Irazábal González, J. (2017). *Numerical analysis of railway ballast behaviour using the Discrete Element Method* [Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/114012>
- Irazábal, J., Salazar, F., & Oñate, E. (2017). Numerical modelling of granular materials with spherical discrete particles and the bounded rolling friction model. Application to railway ballast. *Computers and Geotechnics*, 85, 220-229. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.12.034>
- Jiang, M. J., Yu, H.-S., & Harris, D. (2005). A novel discrete model for granular material incorporating rolling resistance. *Computers and Geotechnics*, 32(5), 340-357. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2005.05.001>

- Kabo, E. (2006). A numerical study of the lateral ballast resistance in railway tracks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 220(4), 425-433. <https://doi.org/10.1243/0954409JRRT61>
- Khatibi, F., Esmaeili, M., & Mohammadzadeh, S. (2017). DEM analysis of railway track lateral resistance. *Soils and Foundations*, 57(4), 587-602. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.04.001>
- Kozicki, J., & Tejchman, J. (2011). *Numerical simulations of sand behaviour using dem with two different descriptions of grain roughness*. II International Conference on Particle-based Methods – Fundamentals and Applications.
- Laryea, S., Safari Bagsorkhi, M., Ferrellec, J.-F., McDowell, G. R., & Chen, C. (2014). Comparison of performance of concrete and steel sleepers using experimental and discrete element methods. *Transportation Geotechnics*, 1(4), 225-240. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.05.001>
- Ley 38/2015, de 29 de septiembre, del sector ferroviario. Boletín Oficial del Estado, 234, de 30 de octubre de 2015. <https://www.boe.es/eli/es/l/2015/09/29/38/con>
- Lim, W. L., & McDowell, G. R. (2005). Discrete element modelling of railway ballast. *Granular Matter*, 7(1), 19-29. <https://doi.org/10.1007/s10035-004-0189-3>
- Lobo-Guerrero, S., & Vallejo, L. E. (2006). Discrete Element Method Analysis of Railtrack Ballast Degradation during Cyclic Loading. *Granular Matter*, 8(3-4), 195-204. <https://doi.org/10.1007/s10035-006-0006-2>
- Lu, M., & McDowell, G. R. (2006). The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method. *Granular Matter*, 9(1-2), 69-80. <https://doi.org/10.1007/s10035-006-0021-3>
- Mindlin, R. D., & Deresiewicz, H. (1953). Elastic Spheres in Contact Under Varying Oblique Forces. *Journal of Applied Mechanics*, 20(3), 327-344. <https://doi.org/10.1115/1.4010702>



- Mishra, B. K. (2003). A review of computer simulation of tumbling mills by the discrete element method: Part I—contact mechanics. *International Journal of Mineral Processing*, 71(1-4), 73-93. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(03\)00032-2](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00032-2)
- Nezami, E. G., Hashash, Y. M. A., Zhao, D., & Ghaboussi, J. (2004). A fast contact detection algorithm for 3-D discrete element method. *Computers and Geotechnics*, 31(7), 575-587. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2004.08.002>
- Nezami, E. G., Hashash, Y. M. A., Zhao, D., & Ghaboussi, J. (2006). Shortest link method for contact detection in discrete element method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(8), 783-801. <https://doi.org/10.1002/nag.500>
- Ngamkhanong, C., Kaewunruen, S., & Baniotopoulos, C. (2017). A review on modelling and monitoring of railway ballast. *Structural Monitoring and Maintenance*, 4(3), 195-220. <https://doi.org/10.12989/SMM.2017.4.3.195>
- Ramunas, V., Gailiene, I., & Laurinavicius, A. (2014). Crushed rock ballast bed in the railway lines of Lithuania: Analysis of the situation and arising problems. *The 9th International Conference «Environmental Engineering 2014»*. The 9th International Conference «Environmental Engineering 2014», Vilnius, Lithuania. <https://doi.org/10.3846/enviro.2014.164>
- Šmilauer, V., Angelidakis, V., Catalano, E., Caulk, R., Chareyre, B., Chèvremont, W., Dorofeenko, S., Duriez, J., Dyck, N., Elias, J., Er, B., Eulitz, A., Gladky, A., Guo, N., Jakob, C., Francois Kneib, Kozicki, J., Marzougui, D., Maurin, R., ... Yuan, C. (2021). *Yade Documentation 3rd ed. The Yade Project*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5705394>
- Suhr, B., & Six, K. (2017). Parametrisation of a DEM model for railway ballast under different load cases. *Granular Matter*, 19(4), 64. <https://doi.org/10.1007/s10035-017-0740-7>

- Suhr, B., & Six, K. (2020). Simple particle shapes for DEM simulations of railway ballast: Influence of shape descriptors on packing behaviour. *Granular Matter*, 22(2), 43. <https://doi.org/10.1007/s10035-020-1009-0>
- Suhr, B., Skipper, W. A., Lewis, R., & Six, K. (2020). Shape analysis of railway ballast stones: Curvature-based calculation of particle angularity. *Scientific Reports*, 10(1), 6045. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62827-w>
- Suiker, A. S. J., & De Borst, R. (2003). A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 57(4), 441-470. <https://doi.org/10.1002/nme.683>
- Sysyn, M., Nabochenko, O., Kovalchuk, V., Przybyłowicz, M., & Fischer, S. (2021). Investigation of interlocking effect of crushed stone ballast during dynamic loading. *Reports in Mechanical Engineering*, 2(1), 65-76. <https://doi.org/10.31181/rme200102065s>
- Tolomeo, M., & McDowell, G. R. (2022). Modelling real particle shape in DEM: A comparison of two methods with application to railway ballast. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 159, 105221. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105221>
- Tonon, F. (2004). Explicit exact formulas for the 3-D tetrahedron inertia tensor in terms of its vertex coordinates. *Journal of Mathematics and Statistics*, 1(1), 8-11.
- Tsuji, Y., Tanaka, T., & Ishida, T. (1992). Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. *Powder Technology*, 71(3), 239-250. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(92\)88030-L](https://doi.org/10.1016/0032-5910(92)88030-L)
- Villalba, I. (2017). *Estudio, análisis y determinación de la carga de pandeo en vías de doble ancho mediante métodos analíticos y numéricos*. Universitat Politècnica de València.

- Zhai, W., Wang, K., & Cai, C. (2009). Fundamentals of vehicle–track coupled dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 47(11), 1349-1376. <https://doi.org/10.1080/00423110802621561>
- Zhang, X., Zhao, C., & Zhai, W. (2017). DEM Analysis of Ballast Breakage Under Train Loads and Its Effect on Mechanical Behaviour of Railway Track. En X. Li, Y. Feng, & G. Mustoe (Eds.), *Proceedings of the 7th International Conference on Discrete Element Methods* (Vol. 188, pp. 1323-1333). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-1926-5\\_136](https://doi.org/10.1007/978-981-10-1926-5_136)
- Zhu, H. P., Zhou, Z. Y., Yang, R. Y., & Yu, A. B. (2007). Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments. *Chemical Engineering Science*, 62(13), 3378-3396. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.12.089>

# ANEJOS

ANEJO N°1: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son creados en 2015 por las Naciones Unidas con el objetivo de poner fin a la pobreza, proteger el planeta y a las generaciones futuras y garantizar, para el 2030, que toda la población se beneficie de condiciones de paz y prosperidad. En total se definieron 17 ODS, que la mayoría de los países del mundo han incorporado en sus políticas dentro de la llamada Agenda 2030. Cada uno de estos objetivos define una serie de metas cuyo cumplimiento conjunto garantiza alcanzar el objetivo definido. A continuación, se muestra la relación del presente documento con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Agenda 2030.

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

A continuación, se procede con la descripción de la alineación del Trabajo Final de Grado con los ODS con un grado de relación más alto:

**ODS 8. TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO:**

El ferrocarril juega un papel fundamental en la vertebración del territorio, tanto dentro como fuera de las ciudades. Un transporte ferroviario competitivo y seguro, de viajeros y mercancías potencia el crecimiento económico de los países a la vez que ofrece un medio de transporte de gran calidad a los trabajadores. Un modelo de comportamiento del balasto, que permite conocer el comportamiento real del mismo, supone una gran apuesta por la innovación y la mejora de la red de infraestructuras ferroviarias.

**ODS 9. INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURAS:**

Una de las principales ventajas del modelo de comportamiento del balasto es la obtención de información relevante sobre el mismo, que hasta el momento no se podía obtener de forma experimental o cuya obtención resultaba complicada y poco fiable. Conocer en detalle el comportamiento de la capa de balasto permite dimensionar las características de la banqueta de balasto en función de las sollicitaciones a las que se verá sometida reduciendo los riesgos asociados a la falta de información logrando así infraestructuras ferroviarias más fiables, resilientes y de calidad que permitan vertebrar el territorio y alcanzar la sostenibilidad en los modos de transporte.

**ODS 11. CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES:**

En unas ciudades cada vez más pobladas, donde los sistemas de transporte público masivo como el ferrocarril metropolitano, cobran cada vez mayor importancia por su capacidad y sostenibilidad, se hace necesario conocer el comportamiento de un material fundamental en las vías férreas como es el balasto, permitiendo avanzar hacia una mejora en las condiciones de la infraestructura debido a la mejor planificación de los trabajos de mantenimiento en base a la información proporcionada por el modelo de comportamiento.

**ODS 12. PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES:**

El conocimiento del comportamiento del balasto permite una gestión y un empleo eficiente de los materiales, reduciendo el desperdicio de recursos al emplearlos de forma eficaz y fomentando un mantenimiento predictivo que permita realizar las inversiones de

manera apropiada. La mejora de la condición de la capa de balasto también afecta a la vida útil del resto de componentes de la infraestructura, así como al material rodante que circula por ella, que se ve sometido a menor desgaste. Además, conocer el comportamiento de esta capa facilita la experimentación con la inclusión de otro tipo de materiales en la misma que potencien una economía circular.

### **ODS 13. ACCIÓN POR EL CLIMA:**

El ferrocarril es considerado uno de los medios de transporte más sostenibles, tanto para transporte de viajeros como para transporte de mercancías. La mayoría de las vías férreas existentes en el mundo utilizan el balasto como material de apoyo de las traviesas. En una transición hacia la movilidad verde libre de emisiones de gases de efecto invernadero la modelización numérica del comportamiento del balasto supone un impulso al diseño y gestión de las vías ferroviarias.



## ANEJO N°2: GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS DE BALASTO

ID CÚMULO DE ESFERAS	ESFERA N°1				ESFERA N°2				ESFERA N°3				Volumen [L <sup>3</sup> ]	Superficie [L <sup>2</sup> ]	Volumen de la envolvente convexa [L <sup>3</sup> ]	S [L]	I [L]	L [L]	e	f	c	ψ
	Centro			Radio [L]	Centro			Radio [L]	Centro			Radio [L]										
	X [L]	Y [L]	Z [L]		X [L]	Y [L]	Z [L]		X [L]	Y [L]	Z [L]											
1	0.00	0.00	0.00	7.50	15.00	0.00	0.00	7.50	7.50	11.28	0.00	6.04	4447.66	1869.87	5997.64	15.00	24.82	30.00	0.83	0.60	1.35	0.70
2	0.00	0.00	0.00	7.50	15.00	0.00	0.00	7.50	7.50	10.85	0.00	5.69	4296.65	1818.37	5763.65	15.00	24.04	30.00	0.80	0.62	1.34	0.70
3	0.00	0.00	0.00	7.50	15.00	0.00	0.00	7.50	7.50	10.14	0.00	5.11	4084.37	1739.68	5423.29	15.00	22.76	30.00	0.76	0.66	1.33	0.71
4	0.00	0.00	0.00	7.50	15.00	0.00	0.00	7.50	7.50	9.47	0.00	4.58	3928.21	1675.25	5155.51	15.00	21.56	30.00	0.72	0.70	1.31	0.72
5	0.00	0.00	0.00	7.50	15.00	0.00	0.00	7.50	7.50	8.56	0.00	3.88	3770.80	1600.96	4864.78	15.00	19.94	30.00	0.66	0.75	1.29	0.73
6	0.00	0.00	0.00	7.50	15.00	0.00	0.00	7.50	7.50	7.53	0.00	3.12	3653.60	1534.17	4623.94	15.00	18.15	30.00	0.61	0.83	1.27	0.75
7	0.00	0.00	0.00	8.53	15.00	0.00	0.00	6.47	9.13	9.17	0.00	4.41	4084.68	1682.78	5254.36	17.06	22.11	30.00	0.74	0.77	1.29	0.73
8	0.00	0.00	0.00	8.31	15.00	0.00	0.00	6.69	8.68	7.95	0.00	3.46	3823.19	1578.76	4828.92	16.62	19.72	30.00	0.66	0.84	1.26	0.75
9	0.00	0.00	0.00	9.89	15.00	0.00	0.00	5.11	11.51	9.61	0.00	5.11	5158.75	1883.11	6376.29	19.77	24.61	30.00	0.82	0.80	1.24	0.77
10	0.00	0.00	0.00	9.31	15.00	0.00	0.00	5.69	10.25	8.30	0.00	3.88	4386.99	1683.30	5401.32	18.62	21.49	30.00	0.72	0.87	1.23	0.77
21	0.00	0.00	0.00	10.00	14.17	0.00	0.00	5.83	10.46	8.27	0.00	5.00	5448.77	1792.32	6296.59	20.00	23.27	30.00	0.78	0.86	1.16	0.84
22	0.00	0.00	0.00	10.00	14.00	0.00	0.00	6.00	10.14	9.65	0.00	6.00	5874.21	1913.04	6878.63	20.00	25.65	30.00	0.85	0.78	1.17	0.82
23	0.00	0.00	0.00	9.09	14.17	0.00	0.00	6.74	9.12	8.43	0.00	5.00	4852.70	1706.33	5747.74	18.18	22.52	30.00	0.75	0.81	1.18	0.81
24	0.00	0.00	0.00	9.09	14.00	0.00	0.00	6.91	9.04	10.69	0.00	6.91	5762.08	1952.26	6956.17	18.18	26.69	30.00	0.89	0.68	1.21	0.80
25	0.00	0.00	0.00	8.18	14.17	0.00	0.00	7.65	7.75	8.52	0.00	5.00	4589.11	1668.21	5506.76	16.36	21.70	30.00	0.72	0.75	1.20	0.80
26	0.00	0.00	0.00	8.18	14.17	0.00	0.00	7.65	8.03	9.16	0.00	5.66	4807.67	1733.26	5810.38	16.36	23.00	30.00	0.77	0.71	1.21	0.79
27	0.00	0.00	0.00	8.18	14.00	0.00	0.00	7.82	7.27	10.28	0.00	6.41	5258.03	1848.34	6384.23	16.36	24.87	30.00	0.83	0.66	1.21	0.79
28	0.00	0.00	0.00	8.04	13.91	0.00	0.00	8.04	6.94	12.06	0.00	8.04	6350.39	2109.00	7757.94	16.08	28.14	30.00	0.94	0.57	1.22	0.79
29	0.00	0.00	0.00	7.89	14.21	0.00	0.00	7.89	7.11	9.61	0.00	5.38	4694.60	1743.98	5761.41	15.79	22.89	30.00	0.76	0.69	1.23	0.78
30	0.00	0.00	0.00	8.33	13.33	0.00	0.00	8.33	6.67	9.01	0.00	5.68	5316.20	1760.36	6149.13	16.67	23.03	30.00	0.77	0.72	1.16	0.84

\*Todas las partículas que se muestran en esta tabla presentan medidas relativas a su eje de coordenadas local, las medidas reales son función de la granulometría incluida en el modelo.