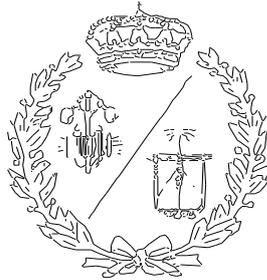


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Proyecto Fin de Grado***

**Influencia de la separación de las traviesas  
ferroviarias en el comportamiento mecánico  
de la vía**

**(Influence of railway sleepers separation on the  
mechanical behavior of the track)**

**Para acceder al Título de**

**GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**Autor: Juan Manuel Fernández Pareja**

**Julio – 2022**



## **DESCRIPCION ABREVIADA**

Las traviesas ferroviarias son elementos que se colocan de manera perpendicular a la vía y cuya principal finalidad es la de mantener la separación entre los carriles constante. El ferrocarril ha sufrido una gran evolución en los últimos años, dando lugar al redimensionamiento de los elementos de la superestructura ferroviaria, entre ellos el de las traviesas. A pesar de haberse modificado un amplio número de parámetros dentro de la vía, la separación entre las traviesas se ha mantenido siempre constante, aproximadamente 600mm entre traviesas sucesivas.

Este TFG tiene como finalidad analizar el efecto que tiene aumentar la separación entre las traviesas ferroviarias en la respuesta mecánica de la vía. Concretamente, en este proyecto se analizan los resultados obtenidos en pruebas de laboratorio donde se realizaron ensayos tanto estáticos y dinámicos de montajes que simulan la vía ferroviaria con separación entre traviesas sucesivas de 600, 700, 800 y 900 mm.

## **SHOR DESCRIPTION**

Railway sleepers are elements that are placed perpendicularly to the track and whose main purpose is to keep the rail separation constant. Railways have undergone a great evolution in recent years, leading to the modification of the railway superstructure elements, including the sleepers. Despite having modified a large number of parameters within the track, the spacing between the sleepers has always remained constantly, approximately 600mm between successive sleepers.

The purpose of this TFG is to analyze the effect of increasing the separation between railway sleepers on the track mechanical response. Specifically, this Project analyzes the results obtained in laboratory tests where both, static and dynamic tests were carried out on assemblies that simulate the railway with spacing between successive sleepers of 600, 700, 800 and 900mm.

## **AGRADECIMIENTOS**

A los directores de este trabajo, José Adolfo Sainz-Aja Guerra, José Antonio Casado del Prado y Roberto Sañudo Ortega, que me han brindado todas las herramientas necesarias para completar mi trabajo fin de grado satisfactoriamente.

A los profesionales del Laboratorio de la división de Ciencia e Ingeniería de los Materiales de la Universidad de Cantabria que contribuyeron en los ensayos que hacen posible este trabajo.

A mis padres que me enseñaron que el esfuerzo y la dedicación dan sus frutos y que soy yo quien debe luchar por lo que quiere, que siempre han estado ahí para mí.

A mi hermana que se fatigo los ojos leyendo, que blande el Padre de los rotuladores rojos, que nunca se aburre de hacer correcciones.

A mi novia que se agotó escuchando hablar del proyecto, que me dio ayuda, cariño y risas, junto con unas cuantas ideas que valía la pena robar.

A mi sobrina que me enseña a ver el mundo con otra perspectiva, que hace posible lo imposible, que me alegra los días.

A mi perra que me hizo compañía durante todo este tiempo, que esta rellena de amor.

A aquellos que cruzaron su camino con el mío, que contribuyeron de alguna forma en todo este proceso.

A todos ellos, gracias.

Este trabajo ha sido posible gracias a la Ayuda RTI2018-096809-J-I00 financiado/a por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por “FEDER Una manera de hacer Europa”.

Dentro del proyecto RTI2018-096809-J-I00 SEPARACION OPTIMA ENTRE TRAVIESAS EN VIAS CONVENCIONALES Y DE ALTA VELOCIDAD, Proyecto ODSTRACK cuyo Investigador principal es Roberto Sañudo Ortega.



## CONTENIDO

<b>1 INTRODUCCION .....</b>	<b>14</b>
<b>2 ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>16</b>
2.1 ANALISIS ECONOMICO .....	17
2.2 ANALISIS TECNICO.....	19
2.3 ANALISIS ESTRUCTURAL .....	21
2.4 INFLUENCIA DE LA SEPARACION ENTRE TRAVIESAS .....	28
2.5 INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA.....	33
2.6 DISCUSION.....	35
<b>3 MATERIALES.....</b>	<b>36</b>
3.1 CARRIL .....	36
3.2 TRAVIESA.....	37
3.3 MANTAS BAJO TRAVIESA .....	38
3.4 ELEMENTOS DE SUJECION .....	39
3.5 EQUIPOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	42
3.5.1 LVDT.....	42
3.5.2 GALGA EXTENSIOMETRICA.....	43
3.6 EQUIPOS DE REGISTRO .....	43
3.7 MAQUINA SERVOHIDRAULICA .....	43
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>45</b>
4.1 CONDICIONES DE ENSAYO .....	45
4.1.1 ENSAYOS ESTATICOS.....	45
4.1.2 ENSAYO DINAMICO .....	46
4.2 MONTAJE .....	47
4.3 TOMA DE DATOS .....	49
4.3 CALCULO DE LA RIGIDEZ.....	55
4.5 POSPROCESADO DE RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	55
4.5.1. POSPROCESADO DE LOS LVDT.....	56
4.5.2 POSTPROCESADO DE LAS BANDAS EXTENSIOMETRICAS .....	58
4.6 ANALISIS DE LOS DATOS.....	58
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>59</b>
5.1 RIGIDECES.....	59
5.2 ENSAYOS ESTATICOS .....	66
5.3 ENSAYOS DINAMICOS .....	67
5.3.1 INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA.....	68
5.3.2 INFLUENCIA DE LA SEPARACION ENTRE TRAVIESAS.....	77
5.4 BANDAS EXTENSIOMETRICAS.....	80
<b>6. PRESUPUESTO .....</b>	<b>82</b>
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>84</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>85</b>
<b>8. ANEXO .....</b>	<b>86</b>

## RELACION DE FIGURAS

FIGURA 1. FORMA PARA TRAVIESAS EN ESPAÑA. AI-04 (ARRIBA), PR-01 (MEDIO), AM-05 (ABAJO).....	17
FIGURA 2. AHORRO DE COSTES Y SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS .....	19
FIGURA 3. DISTRIBUCIÓN DE CARGAS.....	22
FIGURA 4. PORCENTAJE DE CARGA DE RUEDA TRANSPORTADA POR UNA TRAVIESA INDIVIDUAL (IZQUIERDA). ESFUERZO DE FLEXIÓN DE LA TRAVIESA EN EL ASIENTO DEL RAÍL CON EL MÉTODO BATTELLE/SCHRAMM DE ESPACIAMIENTO ENTRE TRAVIESAS (DERECHA).....	23
FIGURA 5. TEORÍA DE DEHARME Y BYERS. ....	24
FIGURA 6. TEORÍA SIMPLIFICADA.....	24
FIGURA 7. TEORÍA DE CLARKE. ....	25
FIGURA 8. TEORÍA SIMPLIFICADA EN DIFERENTES SEPARACIONES DE TRAVIESAS. ....	25
FIGURA 9. VARIACIÓN DE LA CARGA DEL ASIENTO DEL CARRIL (IZQUIERDA). VARIACIÓN DE LA PRESIÓN DE CONTACTO (DERECHA). ....	26
FIGURA 10. ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA LONGITUDINAL DE LA VÍA. ....	27
FIGURA 11. DISTRIBUCIÓN DE LA FUERZA LONGITUDINAL DEBIDO A LA EXPANSIÓN TÉRMICA.....	27
FIGURA 12. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA LATERAL.....	28
FIGURA 13. ESPESOR ÓPTIMO DE BALASTO EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE TRAVIESAS Y EL ÁNGULO DE DISTRIBUCIÓN DE LAS TENSIONES. HAY SOLAPAMIENTO.....	29
FIGURA 14. ESPESOR ÓPTIMO DE BALASTO EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE TRAVIESAS Y EL ÁNGULO DE DISTRIBUCIÓN DE LAS TENSIONES. NO HAY SOLAPAMIENTO.....	30
FIGURA 15. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA.....	33
FIGURA 16. FRECUENCIA DE RESPUESTA PARA DIFERENTES VELOCIDADES Y DIFERENTES DISTANCIAS ENTRE TRAVIESAS.....	34
FIGURA 17. CARRIL UIC-60.....	36
FIGURA 18. TRAVIESA. ....	37
FIGURA 19. PLACA DE ASIENTO DE TPU.....	38
FIGURA 20. PLACA DE ASIENTO DE MADERA.....	39
FIGURA 21. SUJECIÓN.....	39
FIGURA 22. CLIP ELÁSTICO SKL-1. ....	40
FIGURA 23. PLACA EPDM.....	40
FIGURA 24. PLACA DE GUÍA ANGULAR. ....	41
FIGURA 25. TORNILLO.....	41
FIGURA 26. LVDT.....	42
FIGURA 27. GALGA EXTENSIOMÉTRICA.....	43
FIGURA 28. MAQUINA SERVOHIDRÁULICA. ....	44
FIGURA 29. ROTULA.....	44
FIGURA 30. ENSAYO ESTÁTICO.....	46
FIGURA 31. ENSAYO DINÁMICO.....	47
FIGURA 32. ESQUEMA DE MONTAJE. ....	47
FIGURA 33. MONTAJE. ....	48
FIGURA 34. LVDT FLECHA DEL CARRIL.....	49
FIGURA 35. COLOCACIÓN LVDT FLECHA DEL CARRIL. ....	50
FIGURA 36. LVDT DESPLAZAMIENTO DE LA TRAVIESA. ....	50
FIGURA 37. COLOCACIÓN LVDT DESPLAZAMIENTO TRAVIESA.....	51
FIGURA 38. LVDT DESPLAZAMIENTO EN EL EXTREMO. ....	51
FIGURA 39. ESQUEMA LVDT DESPLAZAMIENTO EN EL EXTREMO.....	52
FIGURA 40. LVDT ACTUADOR.....	52
FIGURA 41. LVDT DESPLAZAMIENTO EN EL PATÍN INTERIOR Y EN EL PATÍN EXTERIOR.....	53
FIGURA 42. ESQUEMA LVDT DESPLAZAMIENTO EN EL PATÍN INTERIOR Y EN EL PATÍN EXTERIOR.....	53
FIGURA 43. BANDAS EXTENSIOMÉTRICAS CARRIL. ....	54
FIGURA 44. BANDAS EXTENSIOMÉTRICAS TRAVIESA.....	55

FIGURA 45. GRAFICA DEFORMACIÓN – TIEMPO. ....	57
FIGURA 46. COMPARACIÓN CURVA ORIGINAL – CURVA AJUSTADA LVDT.....	57
FIGURA 47. INFLUENCIA DE LA SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS EN LOS ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE MANTA EN LA VARIABLE ACTUADOR. ....	66
FIGURA 48. INFLUENCIA DE LA SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS EN LOS ENSAYOS ESTÁTICOS SOBRE MANTA EN LA VARIABLE BLOQUE.....	67
FIGURA 49. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 600MM EN EL ACTUADOR. GRAFICA RIGIDEZ-SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS. ....	69
FIGURA 50. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 600MM EN EL ACTUADOR. GRAFICA FUERZA-DESPLAZAMIENTO. ....	69
FIGURA 51. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 700MM EN EL ACTUADOR. GRAFICA RIGIDEZ-SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS. ....	70
FIGURA 52. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 700MM EN EL ACTUADOR. GRAFICA FUERZA-DESPLAZAMIENTO. ....	70
FIGURA 53. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 800MM EN EL ACTUADOR. GRAFICA RIGIDEZ-SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS. ....	71
FIGURA 54. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 800MM EN EL ACTUADOR. GRAFICA FUERZA-DESPLAZAMIENTO. ....	71
FIGURA 55. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 900MM EN EL ACTUADOR. GRAFICA RIGIDEZ-SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS. ....	72
FIGURA 56. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 900MM EN EL ACTUADOR. GRAFICA FUERZA-DESPLAZAMIENTO. ....	72
FIGURA 57. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 600MM EN EL BLOQUE. GRAFICA RIGIDEZ-SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS. ....	73
FIGURA 58. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 600MM EN EL BLOQUE. GRAFICA FUERZA-DESPLAZAMIENTO.....	74
FIGURA 59. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 700MM EN EL BLOQUE. GRAFICA RIGIDEZ-SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS. ....	74
FIGURA 60. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 700MM EN EL BLOQUE. GRAFICA FUERZA-DESPLAZAMIENTO.....	75
FIGURA 61. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 800MM EN EL BLOQUE. GRAFICA RIGIDEZ-SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS. ....	75
FIGURA 62. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 800MM EN EL BLOQUE. GRAFICA FUERZA-DESPLAZAMIENTO.....	76
FIGURA 63. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 900MM EN EL BLOQUE. GRAFICA RIGIDEZ-SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS. ....	76
FIGURA 64. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 900MM EN EL BLOQUE. GRAFICA FUERZA-DESPLAZAMIENTO.....	77
FIGURA 65. INFLUENCIA DE LA SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS CON UNA FRECUENCIA DE 2 Hz EN EL ACTUADOR. ....	78
FIGURA 66. INFLUENCIA DE LA SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS CON UNA FRECUENCIA DE 5 Hz EN EL ACTUADOR. ....	79
FIGURA 67. INFLUENCIA DE LA SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS CON UNA FRECUENCIA DE 10 Hz EN EL ACTUADOR. ....	79
FIGURA 68. INFLUENCIA DE LA SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS CON UNA FRECUENCIA DE 2 Hz EN EL DESPLAZAMIENTO VERTICAL DEL CARRIL. ....	81
FIGURA 69. INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA CON UNA SEPARACIÓN ENTRE TRAVIESAS DE 600MM EN EL DESPLAZAMIENTO VERTICAL DEL CARRIL. ....	81

## RELACION DE TABLAS

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LAS TRAVIESAS MÁS USADAS EN ESPAÑA. ....	16
TABLA 2. REDUCCIÓN DE COSTES. ....	18
TABLA 3. VIDA ÚTIL DE LAS TRAVIESAS. ....	21
TABLA 4. SEPARACIÓN UTILIZADA EN DIFERENTES PAÍSES .....	32
TABLA 5. RIGIDECES ACTUADOR. ....	60
TABLA 6. RESULTADOS BANDAS EXTENSIOMÉTRICAS. ....	80
TABLA 7. GASTO EN MATERIALES. ....	82
TABLA 8. GASTO EN ENSAYOS. ....	82
TABLA 9. GASTO EN INGENIERÍA. ....	82
TABLA 10. GASTO TOTAL. ....	83

## RELACION DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1. ESTIMACIÓN DEL COSTO .....	18
ECUACIÓN 2. CÁLCULO DE LA RIGIDEZ. ....	19
ECUACIÓN 3. CÁLCULO DE LA FRECUENCIA. ....	34
ECUACIÓN 4. CÁLCULO DE LA RIGIDEZ DINÁMICA. ....	55
ECUACIÓN 5. ECUACIÓN ARMÓNICA. ....	56
ECUACIÓN 6. ECUACIÓN SINUSOIDAL. ....	56
ECUACIÓN 7. RELACIONES. ....	56

## RELACION DE GRAFICAS

GRÁFICA 1. PC-1 10HZ MANTA 900MM. ....	86
GRÁFICA 2. PC-2 10HZ MANTA 900MM. ....	86
GRÁFICA 3. PC-1 10HZ MANTA 800MM. ....	86
GRÁFICA 4. PC-2 10HZ MANTA 800MM. ....	87
GRÁFICA 5. PC-1 10HZ MANTA 700MM. ....	87
GRÁFICA 6. PC-2 10HZ MANTA 700MM. ....	87
GRÁFICA 7. PC-1 10HZ MANTA 600MM. ....	88
GRÁFICA 8. PC-2 10HZ MANTA 600MM. ....	88
GRÁFICA 9. PC-1 10HZ MADERA 900MM. ....	88
GRÁFICA 10. PC-2 10HZ MADERA 900MM. ....	89
GRÁFICA 11. PC-1 10HZ MADERA 800MM. ....	89
GRÁFICA 12. PC-2 10HZ MADERA 800MM. ....	89
GRÁFICA 13. PC-1 10HZ MADERA 700MM. ....	90
GRÁFICA 14. PC-2 10HZ MADERA 700MM. ....	90
GRÁFICA 15. PC-1 10HZ MADERA 600MM. ....	90
GRÁFICA 16. PC-2 10HZ MADERA 600MM. ....	91
GRÁFICA 17. PC-1 10HZ MANTA 900MM ENSAYO 2. ....	91
GRÁFICA 18. PC-2 10HZ MANTA 900MM ENSAYO 2. ....	91
GRÁFICA 19. PC-1 10HZ MANTA 800MM ENSAYO 2. ....	92
GRÁFICA 20. PC-2 10HZ MANTA 800MM ENSAYO. ....	92
GRÁFICA 21. PC-1 10HZ MANTA 700MM ENSAYO 2. ....	92
GRÁFICA 22. PC-2 10HZ MANTA 700MM ENSAYO 2. ....	93
GRÁFICA 23. PC-1 10HZ MANTA 600MM ENSAYO 2. ....	93
GRÁFICA 24. PC-2 10HZ MANTA 600MM ENSAYO 2. ....	93
GRÁFICA 25. PC-1 10HZ MADERA 900MM ENSAYO 2. ....	94
GRÁFICA 26. PC-2 10HZ MADERA 900MM ENSAYO 2. ....	94

GRÁFICA 27. PC-1 10HZ MADERA 800MM ENSAYO 2. ....	94
GRÁFICA 28. PC-2 10HZ MADERA 800MM ENSAYO 2. ....	95
GRÁFICA 29. PC-1 10HZ MADERA 700MM ENSAYO 2. ....	95
GRÁFICA 30. PC-2 10HZ MADERA 700MM ENSAYO 2. ....	95
GRÁFICA 31. PC-1 10HZ MADERA 600MM ENSAYO 2. ....	96
GRÁFICA 32. PC-2 10HZ MADERA 600MM ENSAYO 2. ....	96
GRÁFICA 33. PC-1 5HZ MANTA 900MM.....	96
GRÁFICA 34. PC-2 5HZ MANTA 900MM.....	97
GRÁFICA 35. PC-1 5HZ MANTA 800MM.....	97
GRÁFICA 36. PC-2 5HZ MANTA 800MM.....	97
GRÁFICA 37. PC-1 5HZ MANTA 700MM.....	98
GRÁFICA 38. PC-2 5HZ MANTA 700MM.....	98
GRÁFICA 39. PC-1 5HZ MANTA 600MM.....	98
GRÁFICA 40. PC-2 5HZ MANTA 600MM.....	99
GRÁFICA 41. PC-1 5HZ MADERA 900MM. ....	99
GRÁFICA 42. PC-2 5HZ MADERA 900MM. ....	99
GRÁFICA 43. PC-1 5HZ MADERA 800MM. ....	100
GRÁFICA 44. PC-2 5HZ MADERA 800MM. ....	100
GRÁFICA 45. PC-1 5HZ MADERA 700MM. ....	100
GRÁFICA 46. PC-2 5HZ MADERA 700MM. ....	101
GRÁFICA 47. PC-1 5HZ MADERA 600MM. ....	101
GRÁFICA 48. PC-2 5HZ MADERA 600MM. ....	101
GRÁFICA 49. PC-1 5HZ MANTA 900MM ENSAYO 2.....	102
GRÁFICA 50. PC-2 5HZ MANTA 900MM ENSAYO 2.....	102
GRÁFICA 51. PC-1 5HZ MANTA 800MM ENSAYO 2.....	102
GRÁFICA 52. PC-2 5HZ MANTA 800MM ENSAYO 2.....	103
GRÁFICA 53. PC-1 5HZ MANTA 700MM ENSAYO 2.....	103
GRÁFICA 54. PC-2 5HZ MANTA 700MM ENSAYO 2.....	103
GRÁFICA 55. PC-1 5HZ MANTA 600MM ENSAYO 2.....	104
GRÁFICA 56. PC-2 5HZ MANTA 600MM ENSAYO 2.....	104
GRÁFICA 57. PC-1 5HZ MADERA 900MM ENSAYO 2. ....	104
GRÁFICA 58. PC-2 5HZ MADERA 900MM ENSAYO 2. ....	105
GRÁFICA 59. PC-1 5HZ MADERA 800MM ENSAYO 2. ....	105
GRÁFICA 60. PC-2 5HZ MADERA 800MM ENSAYO 2. ....	105
GRÁFICA 61. PC-1 5HZ MADERA 700MM ENSAYO 2. ....	106
GRÁFICA 62. PC-2 5HZ MADERA 700MM ENSAYO 2. ....	106
GRÁFICA 63. PC-1 5HZ MADERA 600MM ENSAYO 2. ....	106
GRÁFICA 64. PC-2 5HZ MADERA 600MM ENSAYO 2. ....	107
GRÁFICA 65. PC-1 2HZ MANTA 900MM.....	107
GRÁFICA 66. PC-2 2HZ MANTA 900MM.....	107
GRÁFICA 67. PC-1 2HZ MANTA 800MM.....	108
GRÁFICA 68. PC-2 2HZ MANTA 800MM.....	108
GRÁFICA 69. PC-1 2HZ MANTA 700MM.....	108
GRÁFICA 70. PC-2 2HZ MANTA 700MM.....	109
GRÁFICA 71. PC-1 2HZ MANTA 600MM.....	109
GRÁFICA 72. PC-2 2HZ MANTA 600MM.....	109
GRÁFICA 73. PC-1 2HZ MADERA 900MM. ....	110
GRÁFICA 74. PC-2 2HZ MADERA 900MM. ....	110
GRÁFICA 75. PC-1 2HZ MADERA 800MM. ....	110
GRÁFICA 76. PC-2 2HZ MADERA 800MM. ....	111
GRÁFICA 77. PC-1 2HZ MADERA 700MM. ....	111
GRÁFICA 78. PC-2 2HZ MADERA 700MM. ....	111
GRÁFICA 79. PC-1 2HZ MADERA 600MM. ....	112

GRÁFICA 80. PC-2 2HZ MADERA 600MM. ....	112
GRÁFICA 81. PC-1 2HZ MANTA 900MM ENSAYO 2.....	112
GRÁFICA 82. PC-2 2HZ MANTA 900MM ENSAYO 2.....	113
GRÁFICA 83. PC-1 2HZ MANTA 800MM ENSAYO 2.....	113
GRÁFICA 84. PC-2 2HZ MANTA 800MM ENSAYO 2.....	113
GRÁFICA 85. PC-1 2HZ MANTA 700MM ENSAYO 2.....	114
GRÁFICA 86. PC-2 2HZ MANTA 700MM ENSAYO 2.....	114
GRÁFICA 87. PC-1 2HZ MANTA 600MM ENSAYO 2.....	114
GRÁFICA 88. PC-2 2HZ MANTA 600MM ENSAYO 2.....	115
GRÁFICA 89. PC-1 2HZ MADERA 900MM ENSAYO 2. ....	115
GRÁFICA 90. PC-2 2HZ MADERA 900MM ENSAYO 2. ....	115
GRÁFICA 91. PC-1 2HZ MADERA 800MM ENSAYO 2. ....	116
GRÁFICA 92. PC-2 2HZ MADERA 800MM ENSAYO 2. ....	116
GRÁFICA 93. PC-1 2HZ MADERA 700MM ENSAYO 2. ....	116
GRÁFICA 94. PC-2 2HZ MADERA 700MM ENSAYO 2. ....	117
GRÁFICA 95. PC-1 2HZ MADERA 600MM ENSAYO 2. ....	117
GRÁFICA 96. PC-2 2HZ MADERA 600MM ENSAYO 2. ....	117
GRÁFICA 97. BANDA 10HZ MANTA 900MM. ....	118
GRÁFICA 98. BANDA 5HZ MANTA 900MM. ....	118
GRÁFICA. 99 BANDA 2HZ MANTA 900MM. ....	119
GRÁFICA 100. BANDA 10HZ MADERA 900MM. ....	119
GRÁFICA 101. BANDA 5HZ MADERA 900MM. ....	120
GRÁFICA 102. BANDA 2HZ MADERA 900MM. ....	120
GRÁFICA 103. BANDA 10HZ MANTA 800MM. ....	121
GRÁFICA 104. BANDA 5HZ MANTA 800MM. ....	121
GRÁFICA 105. BANDA 2HZ MANTA 800MM. ....	122
GRÁFICA 106. BANDA 10HZ MADERA 800MM. ....	122
GRÁFICA 107. BANDA 5HZ MADERA 800MM. ....	123
GRÁFICA 108. BANDA 5HZ MADERA 800MM. ....	123
GRÁFICA 109. BANDA 10HZ MANTA 700MM. ....	124
GRÁFICA 110. BANDA 5HZ MANTA 700MM. ....	124
GRÁFICA 111. BANDA 2HZ MANTA 700MM. ....	125
GRÁFICA 112. BANDA 10HZ MADERA 700MM. ....	125
GRÁFICA 113. BANDA 5HZ MADERA 700MM. ....	126
GRÁFICA 114. BANDA 2HZ MADERA 700MM. ....	126
GRÁFICA 115. BANDA 10HZ MANTA 600MM. ....	127
GRÁFICA 116. BANDA 5HZ MANTA 600MM. ....	127
GRÁFICA 117. BANDA 2HZ MANTA 600MM. ....	128
GRÁFICA 118. BANDA 10HZ MADERA 600MM. ....	128
GRÁFICA 119. BANDA 5HZ MADERA 600MM. ....	129
GRÁFICA 120. BANDA 2HZ MADERA 600MM. ....	129



## 1 INTRODUCCION

Las líneas de ferrocarril están compuestas por carriles de acero apoyados sobre traviesas, que generalmente se colocan con una separación fija entre ellas. Los elementos más numerosos de la superestructura son las traviesas y la sujeción que las une al carril. Por esta razón, se podría lograr un gran ahorro en los costes de construcción de la infraestructura reduciendo la cantidad de estos elementos, ya que el coste de estos componentes es proporcional a su número a lo largo del recorrido de la vía.

Los trenes están soportados y guiados a lo largo de la vía por railes de acero. Para conseguir niveles de seguridad mayores, una mejor comodidad para el pasajero y reducir los costos de mantenimiento, los carriles están colocados sobre traviesas. La finalidad del uso de traviesas es distribuir las cargas del tren sobre la vía, reducir las vibraciones, disminuir las tensiones en los elementos de la estructura y mejorar el asentamiento de la vía reduciendo así su deformación.

Históricamente, la configuración de los elementos de la vía se ha realizado mediante un proceso de ensayo y error, jugando la experiencia un papel fundamental a la hora de dimensionar los diferentes componentes de las líneas ferroviarias. Hasta la Conferencia de Berna de 1907 cada país adopto diferentes separaciones entre traviesas, principalmente basando su decisión en el ancho de vía utilizado localmente. Tras esta conferencia, se adoptó el ancho de vía internacional por la mayoría de los países, representando el 61.5% de las vías del mundo. El valor de la vía internacional es de 4'8,5", equivalente a 1435 mm en alineación recta. En curva el parámetro llega a valores más altos para evitar problemas.

Centrándonos en las traviesas, su forma y dimensiones han cambiado a lo largo del tiempo según el país. Las pruebas y observaciones a lo largo del tiempo han ayudado a encontrar el tamaño y forma adecuado, sin embargo, para la separación entre ellas la industria utiliza valores basados en experiencias pasadas, siendo el valor más aceptado el de 600mm entre traviesas sucesivas. En términos generales, más traviesas se asocia a un movimiento más suave del tren y a menores deformaciones en la vía.

Las traviesas se colocan perpendicularmente al eje de la vía tanto en tramos rectos como en los tramos de curvas. Su número por kilómetro oscila entre 1000 y 2000 traviesas, dependiendo de varios factores como la velocidad de los trenes, el tipo de tráfico, los radios de las curvas o las cargas soportadas. Las operaciones de mantenimiento también pueden afectar en la separación entre las traviesas.

La evolución en las últimas décadas del transporte ferroviario ha impulsado el desarrollo de nuevos diseños de vía, utilizando materiales más resilientes y mejorando el rendimiento. Por el contrario, muy pocos estudios han profundizado en como la posición de los soportes ferroviarios influyen en el comportamiento de la vía y en la vida útil de los elementos que la componen.

Este trabajo analiza la importancia de la separación entre traviesas, realizando un análisis de los resultados obtenidos en ensayos estáticos y dinámicos de montajes que simulan la vía ferroviaria con separación entre traviesas sucesivas de 600, 700, 800 y 900mm.

## 2 ESTADO DEL ARTE

En las vías férreas, las traviesas son elementos colocados de forma perpendicular al carril, que sirven para mantener unidos y a una distancia fija los dos carriles. Además, tienen la misión de transmitir el peso y los esfuerzos al balasto.

Inicialmente se utilizaron parejas de bloques de piedra colocados sobre el suelo, esta solución solo lograba atenuar las cargas verticales, pero al comenzar a utilizar locomotoras cada vez más pesadas, se vio que era prácticamente imposible mantener el ancho de vía constante. Para solventar este problema se comenzó a utilizar traviesas.

Los principales objetivos del uso de traviesas son distribuir las cargas del rail al balasto a través de la superficie de apoyo, mantener estable el ancho de vía e inclinar el rail 1/20 hacia el eje de la vía para así compensar la tendencia al vuelco de este.

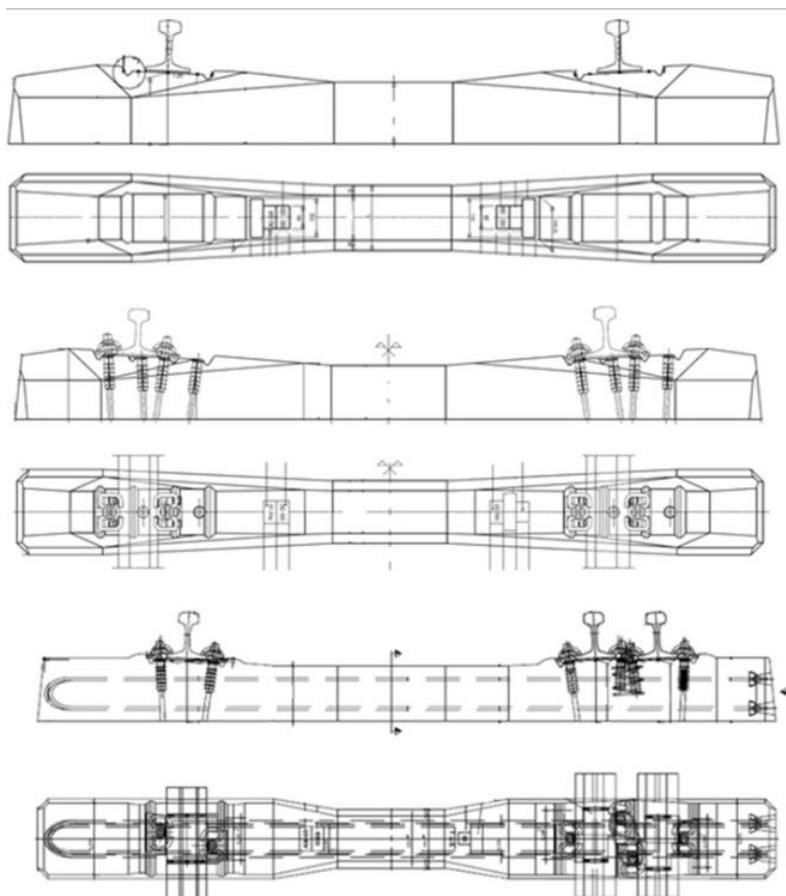
Actualmente existen muchos materiales para la construcción de traviesas, siendo el más común el hormigón pretensado. Durante la centuria comprendida entre 1850 y 1950 la solución tradicional fue la madera, durante esta época el ferrocarril sufrió una enorme expansión, pero la escasez de este material en determinados países propicio la aparición hacia 1880 de la traviesa de acero en Alemania, suponiendo esto un gran impulso para la industria siderúrgica del país. En épocas más recientemente las traviesas de hormigón ganan protagonismo, convirtiéndose en el sistema más utilizado actualmente.

**Tabla 1.** Características de las traviesas más usadas en España.

Tipo de traviesa	Longitud (m)	Peso (kg)	Ancho máximo en la base (mm)	Altura bajo el eje del carril (mm)	Altura en sección central (mm)	Altura del borde de la traviesa (mm)	Soporte de inclinación de carril
ADIF AI-04	2.6	320	300	242	210	230	1/20
PR-01	2.6	300	300	220	200	200	1/20
AM-05	2.75	400	300	232	210	240	1/20

*Fuente: The importance of sleepers spacing in railways, Roberto Sañudo Ortega, Joao Pombo, Stefano Ricci y Marina Miranda, 2001.*

**Figura 1.** Forma para Traviesas en España. AI-04 (arriba), PR-01 (medio), AM-05 (abajo).



*Fuente: The importance of sleepers spacing in railways, Roberto Sañudo Ortega, Joao Pombo, Stefano Ricci y Marina Miranda, 2001.*

En la Tabla 1 y la Figura 1 se observan las características de las traviesas de alta velocidad más utilizadas en España, siendo todas traviesas monbloque de hormigón pretensado. Su peso es superior a los 300 Kg y su longitud es superior a 2.6 m. En traviesas especiales de cruces y desvíos estos valores pueden variar.

En España contamos con 3 anchos de vía diferentes, ancho métrico (1000mm), ancho ibérico (1668mm) y ancho internacional (1453). Las traviesas PR-01 y AM-05 se adaptan correctamente a los calibres ibérico e internacional. En el primer caso modificando el sistema de sujeción y en el segundo caso añadiendo un nuevo carril a la línea. La traviesa ADIF AI-04 es la utilizada en las líneas de alta velocidad.

## 2.1 ANALISIS ECONOMICO

Analizar el impacto de aumentar la separación entre traviesas es importante para poder cuantificar el impacto en los costes de construcción y mantenimiento de la vía.

**Tabla 2.** Reducción de costes.

Separación (mm)	Traviesas por Km	% Reducción de costes
0.6	1667	0
0.7	1429	15
0.8	1250	25
0.9	1112	33.3

*Fuente: The importance of sleepers spacing in railways, Roberto Sañudo Ortega, Joao Pombo, Stefano Ricci y Marina Miranda, 2001.*

En la Tabla 2 se puede observar como el aumento de la separación produciría un ahorro importante en los costes. Es importante señalar que la tabla es un planteamiento teórico y existen muchos otros factores a considerar. Una vía contiene muchos elementos y debido a esto, la separación entre traviesas no puede mantenerse constante a lo largo del recorrido. Por motivos de seguridad los desvíos y cruces, las transiciones de vía, las uniones soldadas de los carriles requieren un espaciado entre traviesas diferentes, por ello es mejor hablar de numero de traviesas por km. Aunque en la tabla los cálculos se han realizado suponiendo un trayecto recto sin ningún tipo de elemento, es importante señalar que el proceso de construcción y mantenimiento de la vía puede llegar a ser mucho más económico.

La estimación del costo se realizó aplicando la siguiente formula:

$$CTL = \frac{L}{D} \cdot \hat{A} \cdot CT$$

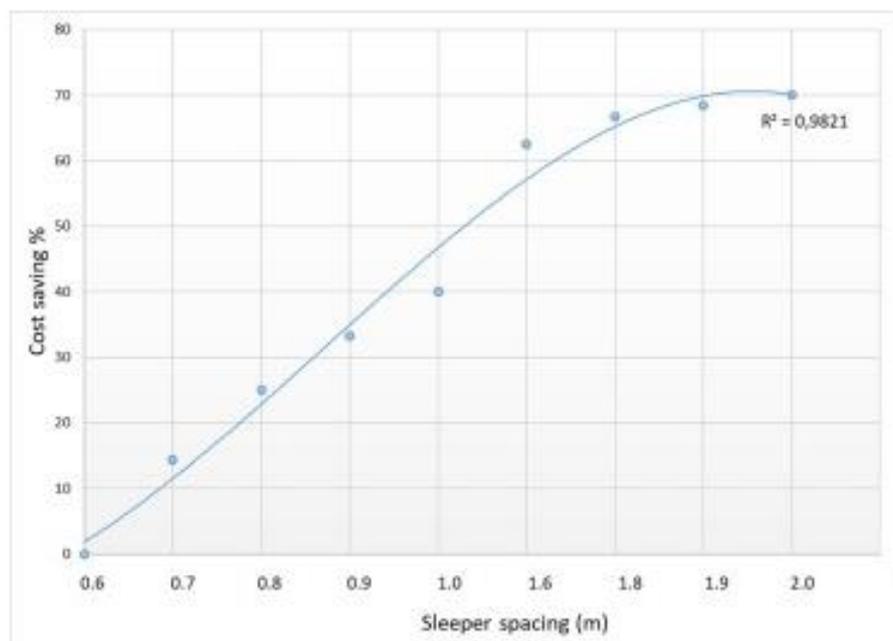
**Ecuación 1.** Estimación del costo

*Fuente: The importance of sleepers spacing in railways, Roberto Sañudo Ortega, Joao Pombo, Stefano Ricci y Marina Miranda, 2001.*

Siendo CTL el coste total de las traviesas por longitud de vía, L la longitud de la vía, D las distancia entre traviesas y CT el coste de cada traviesa.

Utilizando esta fórmula se obtiene que aproximadamente con una separación de 1.9 metros, el ahorro pasaría a ser constante, como se observa en la Figura 2. El inconveniente es que estas distancias no son viables de construir desde el punto de vista de la seguridad.

**Figura 2.** Ahorro de costes y separación entre traviesas



*Fuente: The importance of sleepers spacing in railways, Roberto Sañudo Ortega, Joao Pombo, Stefano Ricci y Marina Miranda, 2001.*

A la vista de los datos se observa que los costes de construcción y de mantenimiento de la vía podrían disminuir considerablemente, suponiendo un ahorro para los administradores de las infraestructuras.

## 2.2 ANALISIS TECNICO

Es importante realizar un análisis técnico para garantizar la integridad estructural de la vía y poder asegurar que sigue manteniendo las condiciones óptimas de seguridad requeridas. La integridad estructural será un factor más limitante que las cuestiones económicas.

En primer lugar, es importante definir que es la rigidez de la vía, ya que será el factor de estudio más importante. Se entiende como rigidez a la relación entre una fuerza aplicada y la deformación que se produce, este parámetro nos da la oposición que ejerce el cuerpo a ser deformado por una fuerza exterior.

Se puede calcular este parámetro de la siguiente forma:

$$Rigidez = \frac{F_{max} - F_{min}}{D_{max} - D_{min}}$$

**Ecuación 2.** Cálculo de la rigidez.

Siendo  $F_{max}$  la fuerza máxima,  $F_{min}$  la fuerza mínima,  $D_{max}$  la deformación máxima y  $D_{min}$  la deformación mínima.

Si se analiza el efecto que produce la separación de las traviesas, se observa que una mayor separación ofrece como resultado una menor rigidez. El efecto es similar al aumento del tamaño del durmiente, como explicaron A. Namura, Y. Kohata, S. Miura en su publicación '*Effect of sleeper size on ballasted track settlement*'.

Una baja rigidez lleva asociado problemas de asentamiento, pudiendo aparecer el problema conocido como traviesas bailarinas, *Behaviour of train-track interaction in stiffness transitions*, M. Banimahd, P.K. Woodward, J. Kennedy, G.M. Medero, 2012. Sin embargo, tener una mayor rigidez lleva asociado problemas de desgaste acelerado, fatiga y agrietamiento, *Transition of railroad bridge approaches*, D. Li, D. Davis, 2005. Generalmente es más interesante tener una rigidez de la vía alta que una baja, aunque ambos extremos resultan perjudiciales

Un espaciado incorrecto entre traviesas puede provocar la aparición de desplazamientos diferenciales verticales, lo cual resulta peligroso, ya que puede provocar que se pierda el contacto entre el carril y la rueda. También aparecen esfuerzos verticales muy elevados en los apoyos, pudiendo esto provocar una fisura o rotura en la traviesa.

Además, aparecen aceleraciones verticales elevadas que pueden tener efectos nocivos sobre la vía, sobre la comodidad de los pasajeros del tren y en la conducción y estabilidad del vehículo.

A su vez se pueden producir problemas de degradación de los elementos de la vía, problemas de desgaste del material rodante y de la estructura pudiendo alterar la deformación vertical de la vía, problemas asociados a la pérdida de la geometría de la vía y problemas de vibraciones y resonancia en los diferentes elementos de la vía.

Los problemas mencionados pueden producir unas condiciones operativas difíciles, tráfico restringido y velocidad reducida, además de una disminución de la comodidad de los pasajeros y un aumento de los costos de mantenimiento de las vías.

Calcular la vida útil de las traviesas en función de la distancia resulta muy complicado, por ello algunos autores propusieron como solución aplicar una reducción proporcional a la vida útil en función de la distancia.

En la Tabla 3 podemos ver esta aproximación, siendo una hipótesis bastante conservadora.

**Tabla 3.** Vida útil de las traviesas.

<b>Elemento de seguimiento</b>	<b>Trafico (Millones de toneladas)</b>	<b>Años estimados para el cambio</b>	<b>Valores redondeados</b>	<b>Distancia entre traviesas 0.7m</b>	<b>Distancia entre traviesas 0.8m</b>	<b>Distancia entre traviesas 0.9m</b>
Carril	300-1000	10-15 años	15 años	12 años	10 años	7 años
Traviesas	350-700	30-40 años	40 años	30 años	26 años	20 años
Cierres	100-500	10-30 años	30 años	25 años	20 años	15 años
Lastre	200-500	20-30 años	30 años	25 años	20 años	15 años
Plataforma	>500	>40 años	> 40 años	> 30 años	> 26 años	> 20 años

*Fuente: The importance of sleepers spacing in railways, Roberto Sañudo Ortega, Joao Pombo, Stefano Ricci y Marina Miranda, 2001.*

En esta hipótesis se observa que, en una vía convencional, utilizando 0,6 m de separación entre traviesas, las traviesas deberán sustituirse en un plazo de 30 a 40 años. Sin embargo, colocando las traviesas con una distancia mayor, por ejemplo 0.9 m, deberán ser cambiadas en 20 años. Esta aproximación permite ver la magnitud del ahorro que se podría conseguir en los costos de mantenimiento.

A lo anterior expuesto, también debemos añadir que la utilización de un menor número de traviesas supondría una reducción de la huella de carbono, ya que se reduce la emisión de gases de efecto invernadero antes, durante y después de su vida útil.

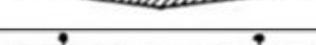
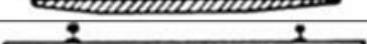
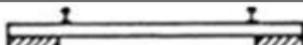
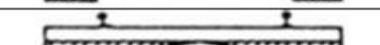
## **2.3 ANALISIS ESTRUCTURAL**

Los parámetros más importantes en el diseño de estructuras ferroviarias son los momentos flectores admisibles en las traviesas y en el carril, así como la tensión admisible en el balasto y la subbase.

La separación entre traviesas afecta directamente a los momentos flectores. Una mayor distancia entre traviesas provoca un aumento del momento flector en el carril. El lugar más peligroso se encuentra en la unión soldada entre carriles sucesivos.

De acuerdo con este razonamiento, la presión de contacto debajo de la traviesa es un aspecto importante de diseño, pero tiene la dificultad de ser imposible de determinar con exactitud.

**Figura 3.** Distribución de cargas

Nº	Distribution Under sleeper	Description
1		Laboratory Test
2		Tamped either side of rail
3		Principal bearing on rails
4		Maximum intensity at ends
5		Maximum intensity in middle
6		Centre bound
7		Flexure of sleeper produces variations form
8		Well tamped sides
9		Stabilized rail seat and sides
10		Uniform pressure

*Fuente: Investigation on the accuracy of the current practices in analysis of railway track concrete sleepers, J.M. Sadeghi, 2005.*

Al ser imposible determinar con exactitud su valor, se han desarrollado varias teorías de distribución de esfuerzos bajo las traviesas, como se puede observar en la Figura 3. Obviamente, a mayor fuerza soporta la traviesa, más tensión se transmite al balasto. En todos ellos consideran mayoritariamente una separación de 0.6 metros.

El área efectiva debajo de la traviesa influye directamente en la distribución de la presión, varía de una traviesa a otra, así como con las condiciones de la vía. Esto es algo que se debe tener en cuenta para el cálculo de las tensiones de contacto entre el balasto y las traviesas. También se debe considerar los valores máximos permitidos para cada parámetro, ya que cada país tiene una normativa y fija unos distintos.

Para una separación convencional de 0.6 metros, la traviesa cargada recibe una reacción de 0.4 veces la carga que actúa sobre él, las adyacentes reciben 0.23 veces la carga, las siguientes 0.07 veces, las demás traviesas reciben un valor insignificante.

**Figura 4.** Porcentaje de carga de rueda transportada por una traviesa individual (izquierda). Esfuerzo de flexión de la traviesa en el asiento del rail con el método Battelle/Schramm de espaciamiento entre traviesas (derecha).

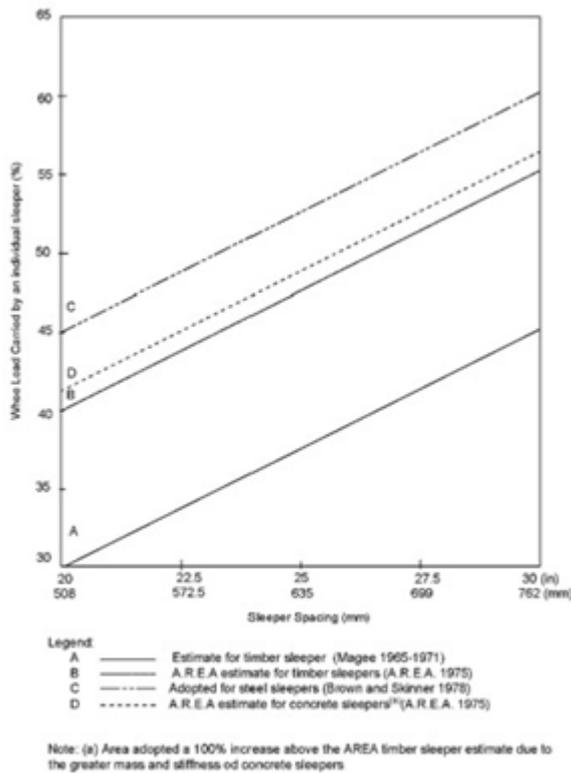


Figura 4.4  
Approximate percentage of wheel load carried by an individual sleeper

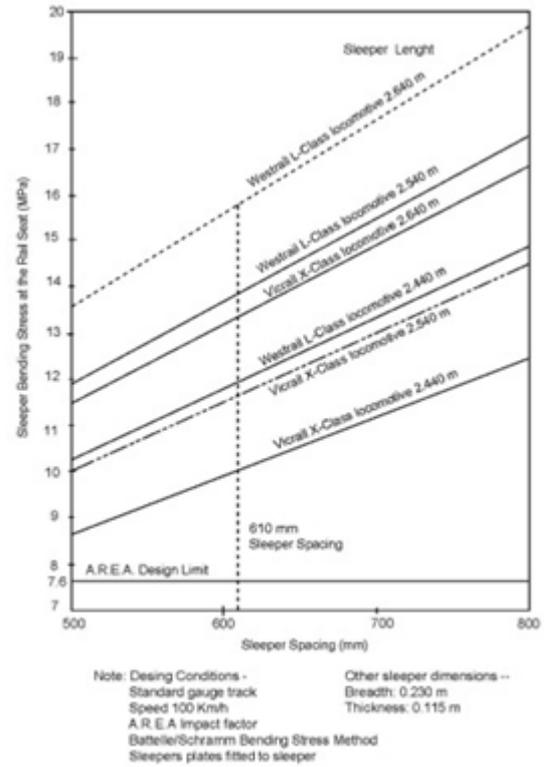


Figura 6.10  
Variation of the sleeper bending stress at the rail seat with sleeper spacing using the Battelle/Schramm method. (For variable sleeper lengths)

Fuente: *Railway track design: a review of current practice*, N.F. Doyle, 1980.

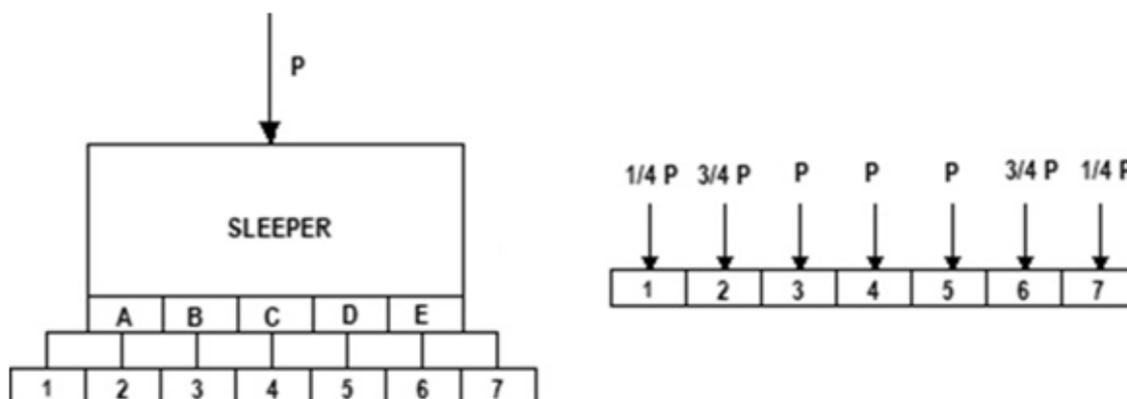
En la Figura 4 se muestra el porcentaje de carga de rueda soportado por una traviesa individual dependiendo de su espacio y tipo. El valor máximo está en la distancia máxima (0.8m) y aumenta con la carga de la rueda.

Se debe resaltar que los diferentes espacios entre traviesas afectan al comportamiento del carril, sistema de sujeción, las traviesas, el balasto y las capas subyacentes. Es decir, es un factor que afecta al rendimiento de toda la vía y por eso es fundamental su influencia para el correcto diseño de una vía férrea.

Evidentemente, cuanto más grande sea la fuerza por traviesa individual, más tensión será transmitida al balasto. Las teorías tradicionales ofrecen varias teorías sobre cómo es la distribución de esfuerzos bajo la traviesa, como se muestra a continuación.

En 1090 Deharme y Byers demostraron que todas las cargas verticales sobre la traviesa tienen una distribución prismática de sección trapezoidal, Figura 5.

**Figura 5.** Teoría de Deharme y Byers.

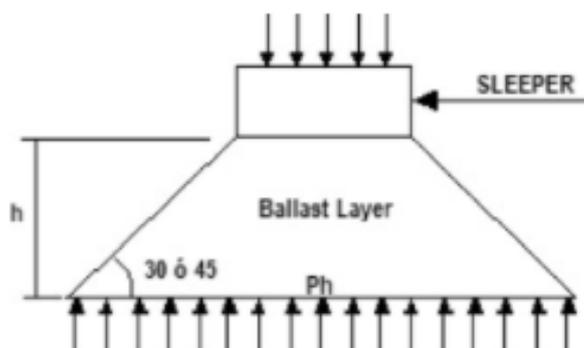


*Fuente: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos C y P. Ferrocarriles: apuntes de clase, J.M.G.D. de Villegas, 1993*

En la Figura 5 se observa que el cubo A distribuye su carga a los cubos 1, 2 y 3, mientras que el cubo B lo realiza a los cubos 2, 3 y 4, y así sucesivamente.

Talbot, en 1920, obtuvo la distribución de tensiones en el balasto a partir de varias pruebas de vía. Otros modelos simplificados en Europa, Figura 6, dan una pendiente y un ángulo para considerar la distribución en el contacto del balasto inferior con la capa de cobertura.

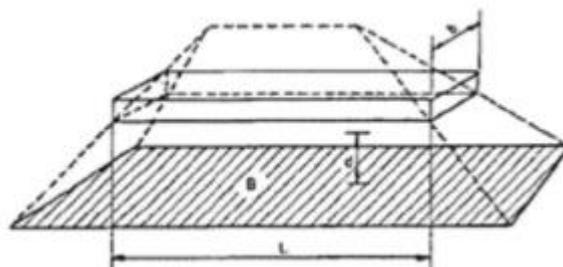
**Figura 6.** Teoría simplificada.



*Fuente: Tratado de ferrocarriles, Oliveros Rives F, López Pita A, Meía Puente J., 1977.*

El ángulo puede variar dependiendo del autor. Milosevic (1968) utiliza 60 grados, Clarke (1955) sugirió una distribución piramidal, Figura 7.

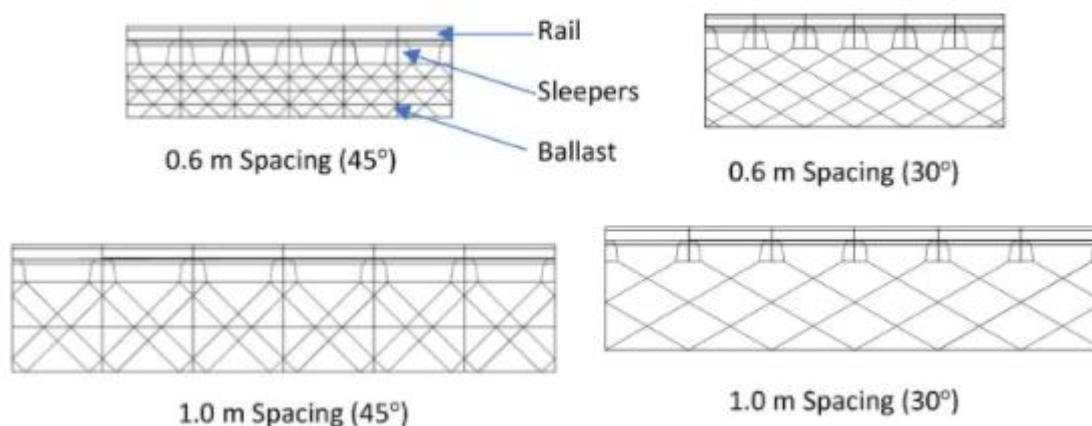
**Figura 7.** Teoría de Clarke.



*Fuente: Tratado de ferrocarriles, Oliveros Rives F, López Pita A, Meía Puente J. , 1977.*

Sadeghi (2005) ofrece una revisión de la distribución de tensiones superficiales bajo el balasto. Siguiendo la teoría simplificada anterior, el área de influencia entre traviesas quedaría libre de presión y podría generar una desestabilización del balasto, Figura 8.

**Figura 8.** Teoría simplificada en diferentes separaciones de traviesas.

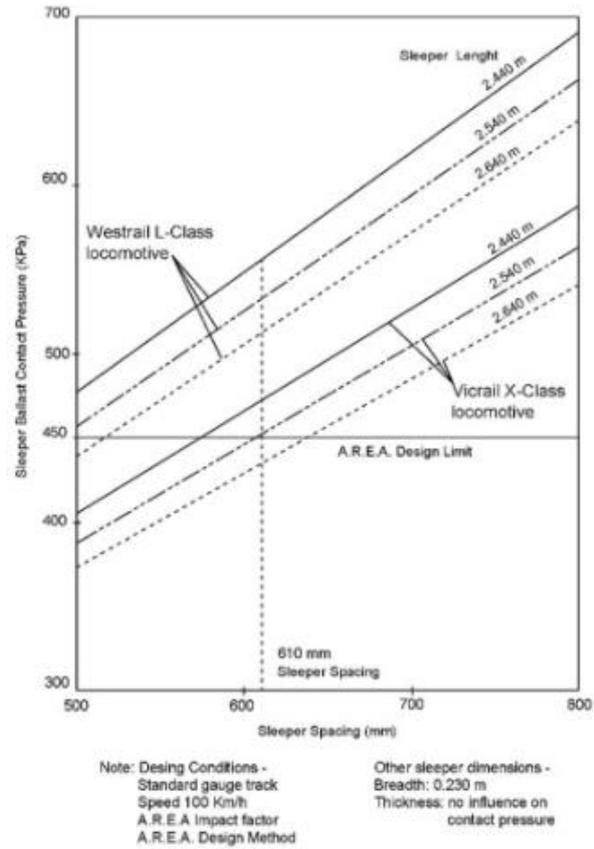
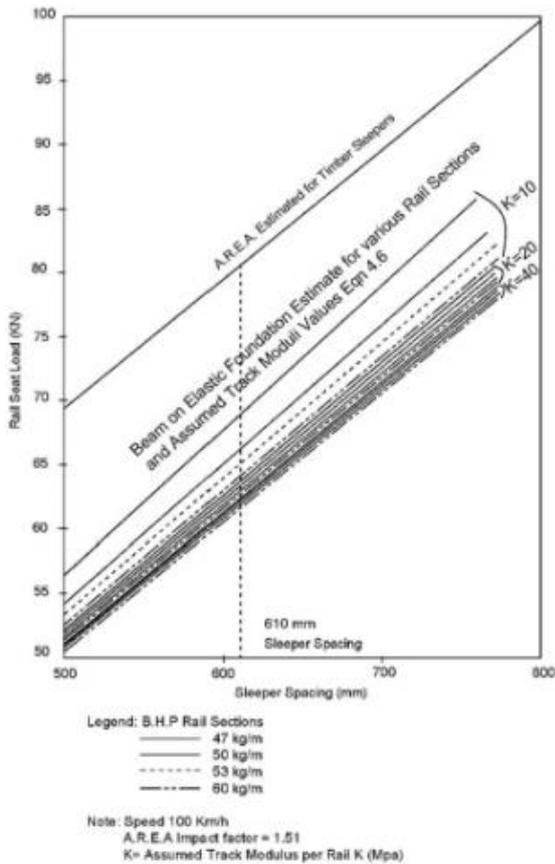


*Fuente: The importance of sleepers spacing in railways, Roberto Sañudo Ortega, Joao Pombo, Stefano Ricci y Marina Miranda, 2001.*

Modificar la separación entre las traviesas tiene una influencia directa en la distribución de la presión bajo las traviesas. Al aumentar la distancia, el área de influencia entre las distribuciones de tensión disminuye, lo que podría ser un problema para la estabilización del balasto.

En la Figura 9 se observa la variación de la carga del asiento del carril y la presión de contacto traviesa-balasto con la separación entre traviesas. Cuanto mayor es el espacio, mayor presión de contacto existe entre la traviesa y el carril.

**Figura 9.** Variación de la carga del asiento del carril (izquierda). Variación de la presión de contacto (derecha).

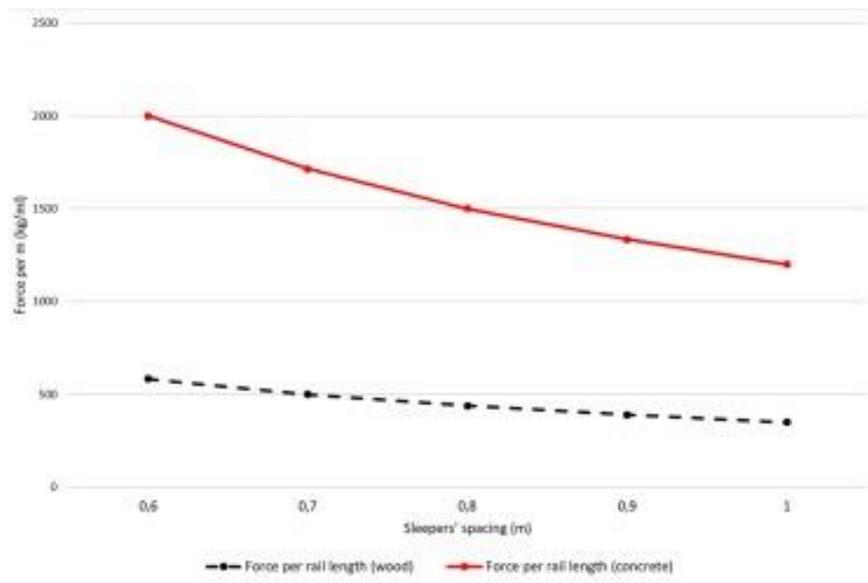


Fuente: *Railway track design: a review of current practice*, N.F. Doyle, 1980.

A su vez, resulta interesante ver cómo afecta la separación entre traviesas a la resistencia longitudinal de la vía y si tiene algún efecto sobre los carriles debido a la dilatación térmica. Considerando 6kN/m como fuerza de resistencia longitudinal para una traviesa de madera y 20kN/m para una de hormigón, la resistencia longitudinal disminuye cuando la distancia entre traviesas varía de 0.6 a 1 m.

La Figura 10 enseña como varía la resistencia longitudinal de las traviesas cuando aumenta la separación entre traviesas. En el caso de las traviesas de madera no se ve una disminución significativa mientras que en el caso del hormigón si se aprecia una suave disminución de la fuerza por longitud de vía.

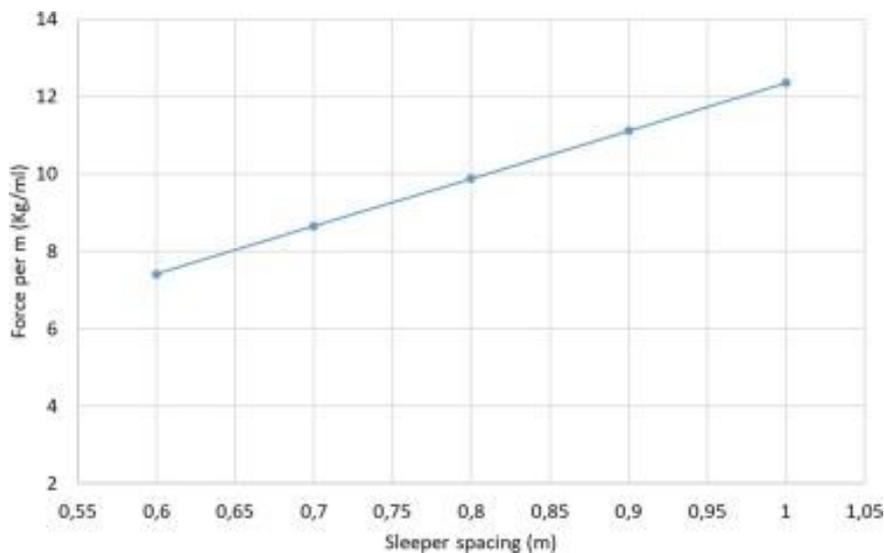
**Figura 10.** Estimación de la resistencia longitudinal de la vía.



*Fuente: The importance of sleepers spacing in railways, Roberto Sañudo Ortega, Joao Pombo, Stefano Ricci y Marina Miranda, 2001.*

La fuerza longitudinal a lo largo de un tramo de vía cambiara dependiendo de la distancia entre los ejes de las traviesas. La relación entre este valor y el número de traviesas proporciona la fuerza por traviesa. En las Figura 11 se observa que la distribución de fuerzas térmicas entre las traviesas cuando su distancia aumenta de 0.6 a 1 metros. Al aumentar la distancia, la misma tensión térmica se distribuye entre menos traviesas, por tanto, la tensión por traviesa aumenta.

**Figura 11.** Distribución de la fuerza longitudinal debido a la expansión térmica.

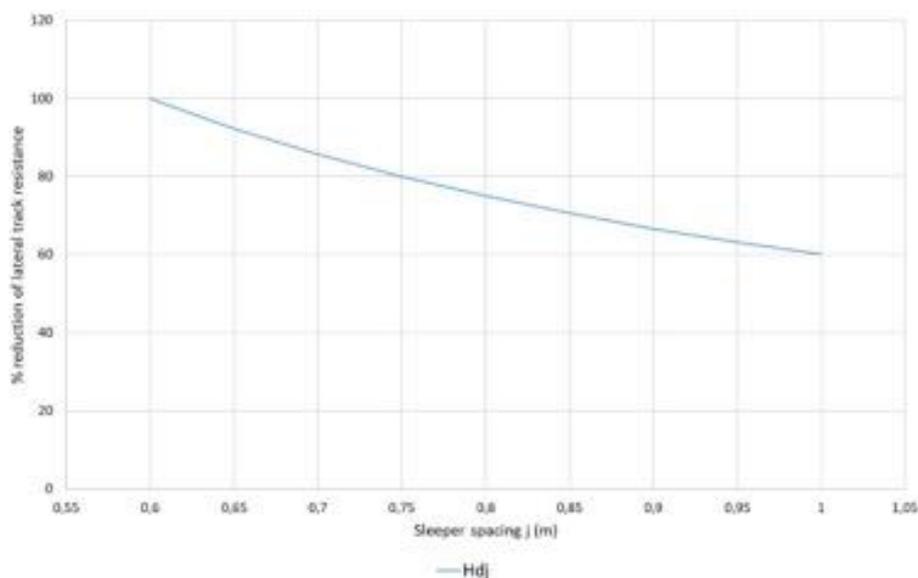


*Fuente: The importance of sleepers spacing in railways, Roberto Sañudo Ortega, Joao Pombo, Stefano Ricci y Marina Miranda, 2001.*

El efecto de la separación sobre la resistencia lateral no está claro. Las pruebas a escala en laboratorio demuestran que la resistencia lateral no solo depende de la separación, sino que también influye el tamaño y peso de la traviesa.

En la Figura 12 se muestra como la resistencia lateral disminuye un 40% cuando la distancia entre traviesas aumenta de 0.6 a 1 metro.

**Figura 12.** Variación de la resistencia lateral.



*Fuente: The importance of sleepers spacing in railways, Roberto Sañudo Ortega, Joao Pombo, Stefano Ricci y Marina Miranda, 2001.*

Para mantener la geometría y estabilidad de la vía es necesario los trabajos de bateo. Estos trabajos están muy limitados por las dimensiones de la traviesa. Estos trabajos también limitan la distancia mínima entre traviesas a 0.6m, sin embargo, aumentar la distancia no produciría problemas.

Existen estudios sobre como aumentar la separación entre traviesas influye en la vibración de la vía. En ellos se encontró que la colocación óptima sería 5 tramos con separación de 0.6 metros y 5 tramos con separación de 0.7 metros.

## **2.4 INFLUENCIA DE LA SEPARACION ENTRE TRAVIESAS**

El valor más utilizado actualmente en los países europeos es de 0.6 metros entre ejes de las traviesas. Sin embargo, en Estados Unidos, las recomendaciones para la separación dependen del espesor del balasto y de las dimensiones de las traviesas, variando el valor desde 0.546 a 0.711 metros.

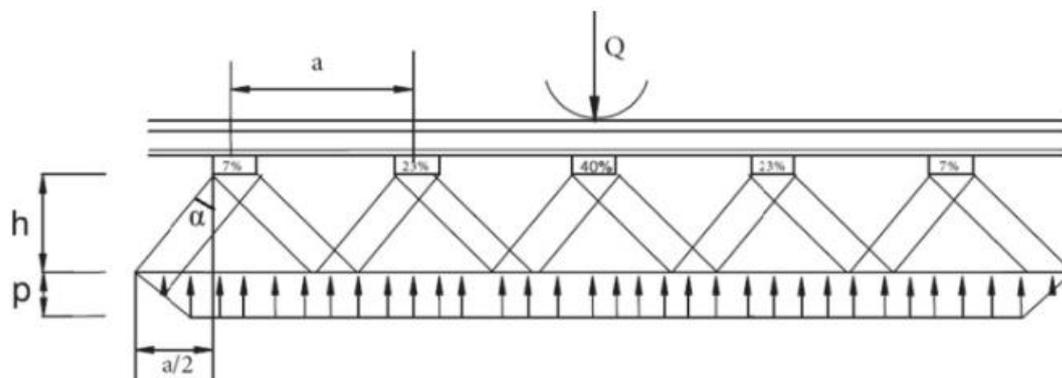
Se han estudios sobre la influencia de la separación entre traviesas y los defectos que se producen sobre el carril, *Effect of sleeper distance on rail corrugation*, E.G. Vadillo, J. Tárrago, G.G. Zubiaurre, C.A. Duque, 1998 y *Effect of sleeper size on ballasted track settlement*, A. Namura, Y. Kohata, S. Miura, 2004.

En ellos se ve que aumentar el tamaño de las traviesas resulta la mejor opción para construir una línea más rígida, pesada y estable, esto sin contar los costes de construcción y mantenimiento. Si se tienen en cuenta todas las variables, una pista más rígida, pesada y estable, sería más cara de construir y el mantenimiento aumentaría notablemente, debido al desgaste acelerado.

También se observa que la separación entre traviesas está influida por otros elementos, como son la resistencia del rail, el tipo de traviesa, el balasto o la carga, volumen y velocidad del tráfico.

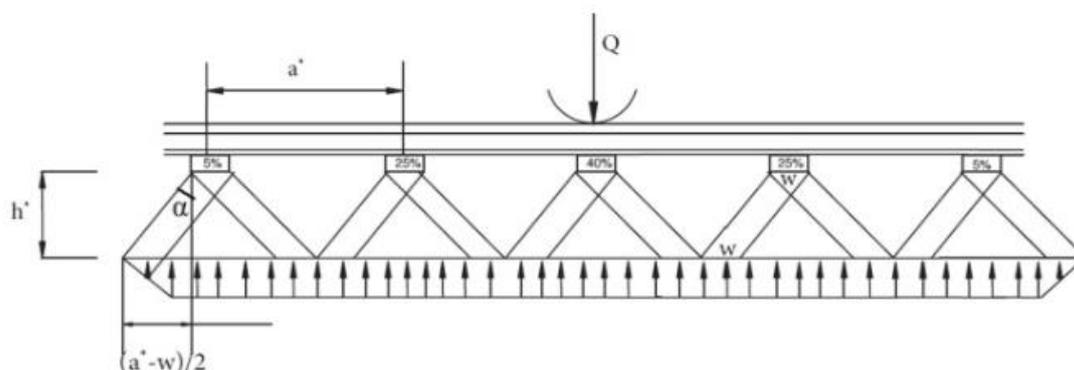
Otros estudios dan la relación entre la separación entre traviesas, el espesor del balasto y el ángulo de distribución de la tensión, Figura 13 y Figura 14.

**Figura 13.** Espesor óptimo de balasto en función de la distancia entre traviesas y el ángulo de distribución de las tensiones. Hay solapamiento.



Fuente: *Manual de vía*, Lichtberger B, 2011.

**Figura 14.** Espesor óptimo de balasto en función de la distancia entre traviesas y el ángulo de distribución de las tensiones. No hay solapamiento.



Fuente: *Railroad tie spacing related to wheel-load distribution and ballast pressure*, N. Hasan, 2015.

Donde  $a$  es la distancia convencional entre traviesas cuando hay una superposición en la presión de contacto entre el balasto y subbalasto de traviesas adyacentes y  $a^*$  es la separación máxima entre traviesas cuando no hay traslape entre la presión de contacto del balasto y el subbalasto. El ángulo  $\alpha$  es el ángulo de distribución de tensiones.

La separación de las traviesas influye en la distribución de tensiones en la superficie del balasto, el tipo de material de las traviesas influye también en la distribución. A su vez también depende de suponer que porcentaje de la fuerza de la rueda  $Q$  se aplica en cada traviesa.

Hasan analizó el espacio entre las sujeciones de fijación directa en relación con la distribución de la carga de las ruedas y la presión sobre el balasto, *Railroad tie spacing related to wheel-load distribution and ballast pressure*, N.Hansan, 2015. Expresó la separación entre traviesas en términos de la longitud característica de la vía y sugirió tres tipos de distancia: deseable, máximo permitido y máximo absoluto. En comparación con los valores utilizados en las directrices de AREMA, considero un porcentaje diferente de distribución de carga por traviesa según la teoría de vigas de Benkel.

Teniendo en la teoría de vigas de Benkel, la distancia entre traviesas debe ser menor que la longitud característica para garantizar una distribución deseable de la carga sobre cada traviesa.

Como se comentó anteriormente, es habitual hablar de número de traviesas por km, esto se debe a la heterogeneidad de los elementos a lo largo de la vía. Se puede especificar como  $M + x$ , donde  $M$  es la longitud del carril en metros y  $x$  es un número variable en varios factores, principalmente el volumen de tráfico y la velocidad máxima del tren.

Está claro que al colocar las traviesas más cerca unas de otras, disminuye la tensión debajo de ellas y aumenta la rigidez. Sin embargo, valores altos de rigidez significan un aumento de las vibraciones y un desgaste acelerado. Por tanto, es necesario encontrar un compromiso entre ambos requisitos.

Algunos autores definen una distancia óptima de 0.6 m para ancho internacional, que puede reducirse a 0.55 cuando se tiene una subbase deficiente. Esveld, *Modern Railway Track, 2nd Edition, C.Esveld, 2001*, recomienda valores de 0.6m a 0.75m en carriles ligeros. Otras teorías sugieren 1540 a 1600 durmientes por km.

Cada país tiene sus propias recomendaciones, por ejemplo, en España no existen recomendaciones claras para la separación entre traviesas, solo en algún caso especial, como la transición entre vías, se recomienda una distancia de 0.57 metros, 3 centímetros menos que la separación convencional de 0.6 metros.

Las directrices UIC proporcionan una separación entre traviesas de 0.6 a 0.77 metros según tipo de carril, carga por eje, velocidad permitida y tonelaje bruto.

Países con larga historia ferroviaria como España, Estados Unidos, Suiza, Japón, Italia, Alemania, Reino Unido y Australia muestran una gran variedad de separación entre traviesas a lo largo de su historia, variando desde menos de 0.3 metros a más de 1 metro, como se observa en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Separación utilizada en diferentes países

<b>País</b>	<b>Separación (mm)</b>	<b>Material</b>
España	500, 600, 630, 650, 660, 666, 700, 750, 770, 800	Madera, hormigón
Estados Unidos	254, 305, 356, 360, 364, 381, 385, 407, 428, 431, 432, 457, 458, 460, 480, 482, 485, 487, 493, 495, 496, 497, 500, 505, 508, 510, 515, 518, 520, 524, 530, 532, 533, 534, 535, 536, 538, 540, 544, 547, 555, 556, 559, 560, 570, 571, 572, 575, 581, 585, 586, 595, 599, 602, 606, 610, 614, 616, 618, 619, 625, 635, 660, 666, 672, 682, 686, 690, 704	Madera, hormigón
Suiza	550, 600, 620, 630, 640, 650, 660, 666, 670, 680, 700, 706, 715, 720, 750, 800, 820, 900, 1000	Madera, hormigón, metal
Japón	380, 500, 555, 575, 580, 595, 620, 625, 650, 660, 671, 690, 700, 710, 750, 770	Madera, hormigón
Italia	600, 630, 640, 692, 700, 720, 725, 730, 750, 752, 770, 800, 833, 850, 860, 910	Madera, hormigón
Alemania	580, 600, 620, 625, 630, 650, 660, 666, 670, 680, 700, 760, 780, 850	Madera, hormigón, acero
Reino Unido	600, 610, 662, 686, 712, 737, 762, 787, 800, 838, 914, 915, 1067	Madera, hormigón, acero
Australia	495, 533, 592, 610, 622, 666, 672, 762, 763, 661, 720, 787	Madera, hormigón, acero

*Fuente: Jane's World Railways, J.C. Spsychalski, 1996–97.*

En el caso de ferrocarriles mineros la separación varía entre 0.73 y 0.58 metros, variando en función del ancho de la vía, de la carga por eje, el trazado de la vía y los elementos de la vía y su colocación.

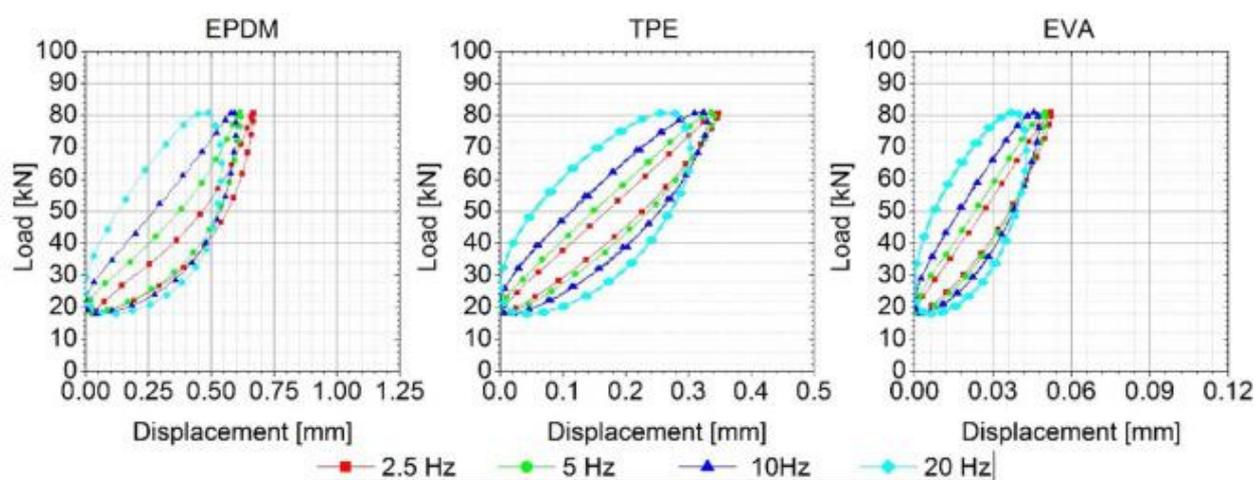
Por todo lo mencionado anteriormente, vemos que existe unos límites económicos y técnicos, que dejan como posibles opciones de separación los valores comprendidos entre 0.6 y 1 metro.

## 2.5 INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA

La frecuencia modifica el periodo de la onda y está asociada a la velocidad del tren y la distancia entre ruedas del bogie. La velocidad convencional de un tren es aproximadamente 200km/h y la de un tren de alta velocidad actual es aproximadamente 350 km/h. Con una distancia entre bogíes de 18 m, esto corresponde a una frecuencia entre 3 y 5 Hz. Para evaluar la influencia de las altas frecuencias, analizaremos un rango experimental entre 2.5 y 20 Hz.

La Figura 15 muestra la influencia de la frecuencia en la rigidez dinámica de las almohadillas de carril mas utilizadas. Se observa que a medida que aumenta la frecuencia, se disipa más energía por ciclo. La razón principal de que esto suceda se debe a que, al acelerar la prueba, las cadenas poliméricas no tienen tiempo de reorganizarse, por lo que cuando se realiza la prueba hay mayor fricción interna que disipa mas energía por ciclo.

**Figura 15.** Influencia de la frecuencia.



*Fuente: Influence of the operational conditions on static and dynamic stiffness of rail pads, A.Sainz-Aja, Isidro A.Carrascal, Diego Ferreño, Joao Pombo, Jose A.Casado, Soraya Diego, 2020.*

El marco de la vía férrea compuesto por traviesas y carriles está sujeto a vibraciones en condiciones normales. Considerando diferentes velocidades de tren para diferentes separaciones entre traviesas, la respuesta de frecuencia disminuye cuando aumenta la

distancia entre traviesas, como se observa en la Figura 16. Velocidades más altas generan frecuencias más altas que disminuye al aumentar la distancia entre traviesas.

Para obtener la frecuencia se usó la siguiente formula:

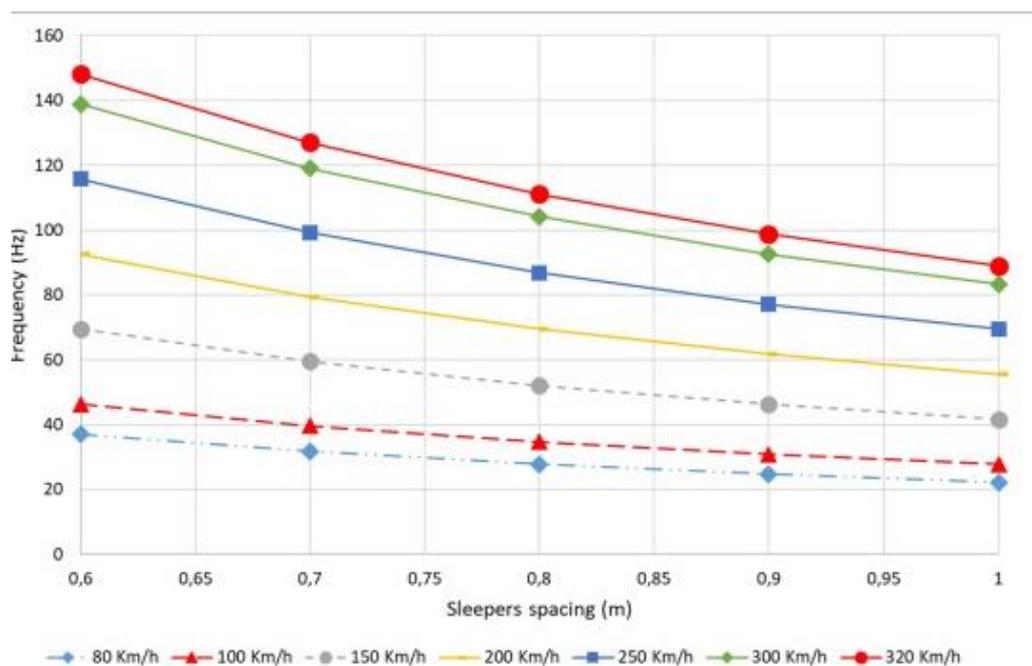
$$f = \frac{v}{\lambda}$$

**Ecuación 3.** Cálculo de la frecuencia.

donde f es la respuesta en frecuencia en hercios (Hz) para una velocidad de vehículo v (m/s), con una longitud de onda  $\lambda$  (m) y considerando diferentes distancias de las traviesas.

La Figura 16 muestra esta frecuencia de respuesta para diferentes distancias entre traviesas.

**Figura 16.** Frecuencia de respuesta para diferentes velocidades y diferentes distancias entre traviesas.



*Fuente: The importance of sleepers spacing in railways, Roberto Sañudo Ortega, Joao Pombo, Stefano Ricci y Marina Miranda, 2001.*

Niveles altos de vibraciones pueden acelerar el desgaste de los elementos de la superestructura. Sujeciones, carriles, traviesas y balasto son los elementos más propensos a sufrir el desgaste acelerado.

La variación de velocidad del tren puede tener graves consecuencias, especialmente en el caso de defectos en la superficie del carril. Las cargas de los trenes aumentan hasta dos veces las fuerzas estáticas, lo que conduce a un desgaste acelerado.

Batkjargal en su análisis, *Sleeper spacing optimization for vibration reduction in rails*, S. Batjargal, K. Abe, K. Koro, 2012, descubrió que la amplitud es sensible a la disposición de las traviesas a frecuencias más altas y que la frecuencia de resonancia es independiente de la velocidad de la rueda, mientras su amplitud depende en gran medida de ella.

Además, la irregularidad en el espaciado de las traviesas puede reducir el valor esperado de la amplitud de resonancia de la deflexión del carril debido a una carga armónica estacionaria. Otros investigadores encontraron una disposición óptima mediante la repetición de una vía compuesta por 5 vanos de traviesas con 0.6 m de separación y 5 vanos con 0.7 m.

Respecto al balasto, de acuerdo con las pautas de ORE, la separación entre traviesas en el rango de 630 a 790 mm tuvo una influencia insignificante en el nivel de tensión vertical en la subrasante para una unidad de carga aplicada a la traviesa.

Zou en su estudio de vibraciones, *Study on the Urban Rail Transit Sleeper Spacing Considering Vehicle System*, Y. Zou, Y. Wen, Q. Sun, 2019, para vías urbanas recomienda elegir entre 670 y 540 mm como separación óptima entre traviesas.

Weber, para ferrocarriles americanos usando traviesas de 12 pulgadas de ancho, sugiere que se espacien 30 pulgadas (762mm) con solo un aumento del 10% en las tensiones del riel y sin aumento en la presión de apoyo entre la traviesa y el balasto.

## **2.6 DISCUSION**

En las secciones anteriores se analizó el contexto histórico y se realizaron análisis desde diferentes perspectivas.

El estado del arte en todo el mundo proporciona unos límites entre 250 mm y 1000 mm, los análisis realizados nos proporcionan valores posibles entre 600 mm y 1900 mm. Combinando ambos resultados obtenemos una zona realista de estudio comprendida en 600 mm y 1000 mm, por lo tanto, se justifican así las distancias empleadas en el laboratorio. Finalmente, por razones de dimensiones de la máquina de ensayo, se llegó a un máximo de 900 mm de separación.

### 3 MATERIALES

Para simular una línea férrea, tomar los datos y analizar los resultados de los ensayos de laboratorio se han utilizado los siguientes materiales.

#### 3.1 CARRIL

El carril, rail o riel es cada una de las barras metálicas sobre las que se desplazan los trenes. Son un elemento indispensable de la estructura ferroviaria ya que actúan como soporte y guía del tren.

Los primeros carriles se utilizaron para guiar vagones tirados por caballos en la industria minera y eran de madera. Los avances de este sector provocaron la aparición de carriles de hierro a partir de 1760 en Alemania e Inglaterra. Durante el siglo XIX pasaron a fabricarse carriles de acero. Actualmente la fabricación se realiza mediante un proceso de laminación, donde se obtiene el perfil requerido.

Para su montaje se colocan perpendicularmente a las traviesas sujetándose a estas mediante algún sistema de fijación.

Para los ensayos se ha utilizado un Carril de acero UIC-60, Figura 17. Este modelo está fabricado según la norma EN 13674-1, se trata de un carril tipo T, carril de fondo plano, con una masa por metro de 60.21 kg. El carril UIC-60 se utiliza en vía estándar para tráfico de carga media y pesada.

**Figura 17.** Carril UIC-60.



*Fuente: Propia*

### 3.2 TRAVIESA

La traviesa o durmiente es un elemento que se coloca transversalmente a la vía, cuyo fin es mantener unidos los dos carriles a una distancia fija, manteniendo en la medida de lo posible la geometría del trazado. Además, son las responsables de transmitir los esfuerzos al balasto.

En la industria minera se utilizaban traviesas de madera, y el ferrocarril heredó estas prácticas. Salvo algunos intentos pioneros de sujetar los carriles sobre traviesas de piedra, la madera se convirtió en la solución universal. A finales del siglo XIX, apareció alguna línea con traviesas de acero, pero esta tendencia no se impuso y la madera siguió siendo el material más utilizado.

Durante la Primera Guerra Mundial comenzó el estudio de las traviesas de hormigón armado, pero no fue hasta la Segunda Guerra Mundial cuando este material se implantó masivamente.

Las traviesas de hormigón, aunque con un coste mayor que las de madera, resultan más económicas a largo plazo, además se evitan los condicionantes medioambientales que implican la obtención de traviesas de madera. Su fabricación es un proceso industrial perfectamente estandarizado, en el que se emplea un control estricto de los materiales y de los procesos de fabricación.

**Figura 18.** Traviesa.



*Fuente: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)*

En los ensayos realizados se utilizaron traviesas monobloque de hormigón pretensado, Figura 18. Dada su gran durabilidad y estabilidad, este tipo de traviesas se han impuesto en la construcción de vías de alta velocidad y en aquellas con mayor densidad de circulación en Europa y Asia.

### **3.3 MANTAS BAJO TRAVIESA**

Con el objetivo de repartir las cargas sobre una mayor superficie se comenzó a utilizar el balasto en la construcción de las vías férreas. Debido a la dificultad de utilizar este elemento en un laboratorio, se utilizarán dos tipos de soportes que simularán diferentes condiciones de balasto.

El primer tipo de soporte será de TPU, poliuretano termoplástico, un elastómero sumamente versátil, Figura 19. La clave de la versatilidad del TPU es que su dureza puede ser personalizada, y esta cualidad nos resulta sumamente útil. Pudiendo simular perfectamente la rigidez del balasto.

**Figura 19.** Placa de asiento de TPU.



*Fuente: Propia*

El segundo tipo de placa de asiento será de madera, Figura 20. Las características de la madera varían según la especie del árbol de origen, e incluso dentro de una misma especie por las condiciones del lugar de crecimiento. Nuevamente esto nos resulta beneficioso para encontrar el tipo de madera que más se ajuste a las características del balasto que queremos simular.

**Figura 20.** Placa de asiento de madera.



*Fuente: www.wikipedia.org*

### **3.4 ELEMENTOS DE SUJECION**

La sujeción, Figura 21, de carriles es el sistema de fijación de los carriles a las traviesas que, además de evitar la rotación de los carriles, proporciona elasticidad a la vía y amortigua la transmisión de ruidos y vibraciones a la infraestructura derivadas de la circulación del tren.

**Figura 21.** Sujeción.



*Fuente: Influence of the operational conditions on static and dynamic stiffness of rail pads, A.Sainz-Aja, Isidro A.Carrascal, Diego Ferreño, Joao Pombo, Jose A.Casado, Soraya Diego, 2020.*

El sistema utilizado en los ensayos es el sistema SKL-1, Figura 22. es el elemento encargado de mantener unidos el carril y la traviesa. En los ensayos se utilizó un clip elástico SKL-1, Figura 22. Este elemento es de acero y se ha sometido a tratamientos de templado y revenido.

**Figura 22.** Clip elástico SKL-1.



*Fuente: Propia.*

Entre el carril y la traviesa se sitúa una placa EPDM, Figura 23. Es una almohadilla de caucho sintético que está en contacto con la traviesa de hormigón y ofrece propiedades altamente elásticas, minimiza las vibraciones transmitidas a la estructura y también reduce ruido propagado por la estructura.

**Figura 23.** Placa EPDM.



*Fuente: Propia.*

Entre el Clip elástico y la traviesa se Encuentra la placa acodada, Figura 24. Fabricadas en poliamida reforzada con fibra de vidrio. Están ubicadas a ambos lados del carril y se utilizan de guía lateral del carril para asegurarlos contra el movimiento lateral.

**Figura 24.** Placa de guía angular.



*Fuente: Propia.*

Para asegurar la unión del clip, la placa acodada y la traviesa, se utilizan tornillos de 22mm de diámetro, Figura 25.

**Figura 25.** Tornillo



*Fuente: Propia.*

### 3.5 EQUIPOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Durante los ensayos se utilizarán diferentes equipos de adquisición de datos. La adquisición de los datos es un proceso muy importante pues permite obtener y comparar las deformaciones que sufren diferentes elementos de la vía, así como la magnitud de la fuerza que provoca dichas deformaciones. Para una correcta medición se utilizaron dos tipos de equipos, los LVDT y las galgas extensiométricas.

#### 3.5.1 LVDT

Un LVDT, Transformador Diferencial Variable Lineal, es un dispositivo electromecánico que convierte el movimiento en corriente eléctrica. Este elemento permite medir la deformación del carril en los diferentes ensayos.

El principio de funcionamiento consiste en una corriente alterna que circula a través de la bobina principal, causando un voltaje inducido en las bobinas secundarias. A medida que el núcleo se mueve, la inductancia cambia, causando que el voltaje inducido varíe. Cuando el núcleo está en su posición central, se encuentra equidistante a las dos bobinas secundarias, al estar estas conectadas en serie, pero invertidas, los voltajes serán iguales, pero de signo contrario, siendo el voltaje de salida cero. Al sufrir un desplazamiento el núcleo, el voltaje de una bobina aumentará y el voltaje de la otra disminuirá, causando que el voltaje de salida sea distinto a cero. El valor de este voltaje será proporcional al desplazamiento, permitiendo así convertir el voltaje a una medida en mm.

En estos ensayos se utilizaron LVDTs, Figura 26, con una señal analógica comprendida entre +10V y -10V

**Figura 26.** LVDT.



*Fuente: Propia.*

### **3.5.2 GALGA EXTENSIOMETRICA**

Una galga extensiométrica, Figura 27, es un elemento que permite medir la deformación. Se basa en el efecto piezorresistivo, que es la propiedad de ciertos materiales de cambiar su resistencia eléctrica cuando se ven sometidos a una deformación.

Las galgas extensiométricas utilizan la propiedad física de la resistencia eléctrica. Cuando un conductor es deformado dentro de su límite elástico, este se volverá más estrecho y alargado. Esta deformación incrementa su resistencia eléctrica. En caso contrario, si la fuerza provoca una compresión del material conductor, su resistencia disminuye. Este fenómeno nos permitirá medir la deformación de los elementos de la vía férrea.

**Figura 27.** Galga extensiométrica.



*Fuente: [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)*

### **3.6 EQUIPOS DE REGISTRO**

Para el registro de datos se utilizarán tres ordenadores capaces de hacer un registro digital del tiempo, la fuerza aplicada y los valores de los desplazamientos.

Los ordenadores se conectarán a los diferentes equipos de medida, así como a la máquina servohidráulica encargada de aplicar la fuerza de ensayo. Estos datos se guardarán en diferentes archivos '.txt' que permitirán su posterior manejo y análisis.

### **3.7 MAQUINA SERVOHIDRAULICA**

Los ensayos se realizaron con una máquina de ensayo universal servohidráulica equipada con una celda de carga capacidad de carga hasta 1500kN, Figura 28.

**Figura 28.** Máquina servohidráulica.



*Fuente: [www.ladicim.es](http://www.ladicim.es)*

El carril se conectó a la máquina de ensayo mediante una rotula, Figura 29, para asegurar la verticalidad de la carga aplicada.

**Figura 29.** Rotula.



*Fuente: [www.ladicim.es](http://www.ladicim.es)*

## **4 METODOLOGIA**

En este apartado se describen los ensayos y como se realizó la toma de datos. En primer lugar, se diferenciarán entre ensayos dinámicos y estáticos. Posteriormente se compararán los resultados obtenidos manteniendo constante la distancia entre traviesas y modificando la frecuencia de ensayo, para finalmente mantener la frecuencia de ensayo constante y modificar la distancia entre traviesas.

### **4.1 CONDICIONES DE ENSAYO**

Para un correcto análisis se realizaron ensayos estáticos y dinámicos. El área de ensayo se encontrará a una temperatura controlada ( $23\pm 5^{\circ}$ ).

Los elementos de medición del desplazamiento se encuentran conformes a la Norma EN ISO 9513:2012, tabla 2, clase 2.

Los equipos encargados de la medición de la fuerza son conformes a la Norma EN ISO 7500-1:2018, clase 1, en todo el rango de fuerzas.

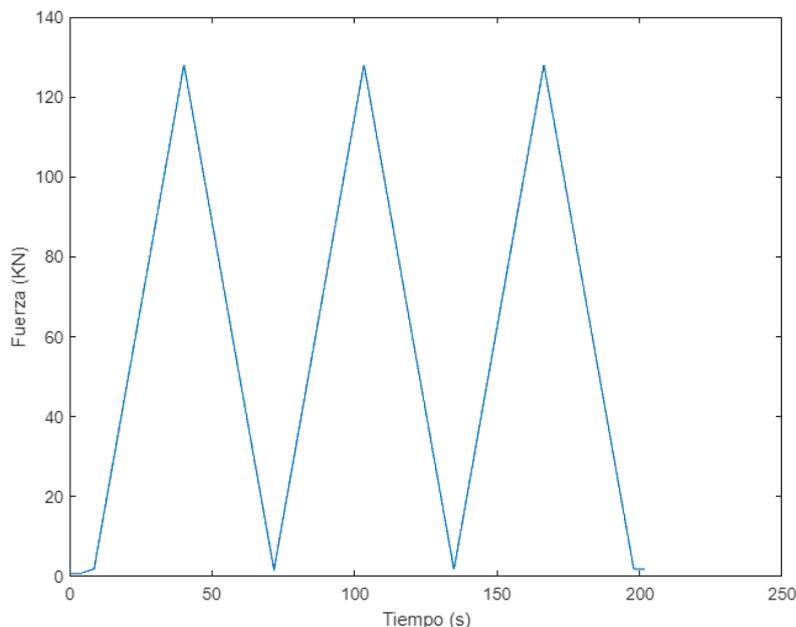
Para proceder al ensayo, todos los componentes y el equipo utilizado se han mantenido a la temperatura de ensayo durante al menos 16 horas antes de iniciar el ensayo.

La fuerza se aplica mediante un asiento esférico en el actuador, siendo esta de  $120\pm 10$  kN.

#### **4.1.1 ENSAYOS ESTATICOS**

Los ensayos estáticos se usan comúnmente para determinar dos cosas: si un material puede soportar una carga específica y cuál es la resistencia máxima a la rotura. Este estudio se encuentra en el primer caso, ya que el objetivo último no es lograr la rotura de alguno de los elementos de la vía, sino que se busca simular los esfuerzos que sufren los elementos de la vía cuando un tren se encuentra parado sobre ellos.

**Figura 30.** Ensayo estático.



*Fuente: Propia.*

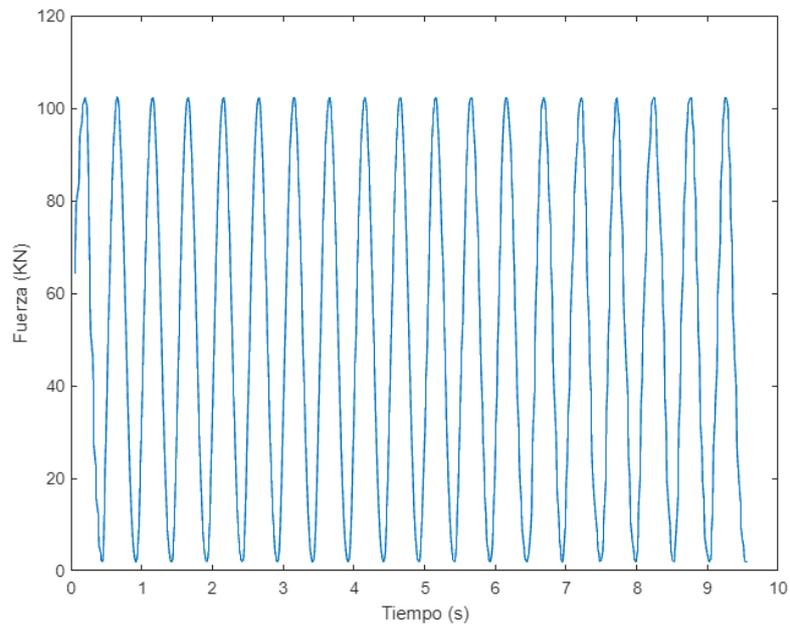
En los ensayos estáticos se aplicaron tres ciclos de carga, de forma lenta y a velocidad constante, tal y como se aprecia en la Figura 30. Estos ensayos permiten determinar si las cargas de trabajo son toleradas por los diferentes elementos que componen la vía.

#### **4.1.2 ENSAYO DINAMICO**

A diferencia de los ensayos estáticos, los ensayos dinámicos implican aplicar la carga rápidamente, tal y como se aprecia en la Figura 31. Al aumentar la velocidad en la que actúa la fuerza, se prueba la capacidad de los elementos para responder a un pico de tensión repentino. Cuanto más rápido se genera la carga, más demanda sufre el material. Incluso si la fuerza máxima dinámica es idéntica a una fuerza estática, el hecho de que la carga se produzca durante un tiempo más corto significa que los efectos pueden ser mayores.

Con los ensayos dinámicos se quiere simular las fuerzas que ejerce un tren a diferentes velocidades, por ello en los ensayos dinámicos se realizaron a 3 frecuencias de ensayo, 2HZ, 5HZ y 10HZ.

**Figura 31.** Ensayo Dinámico.

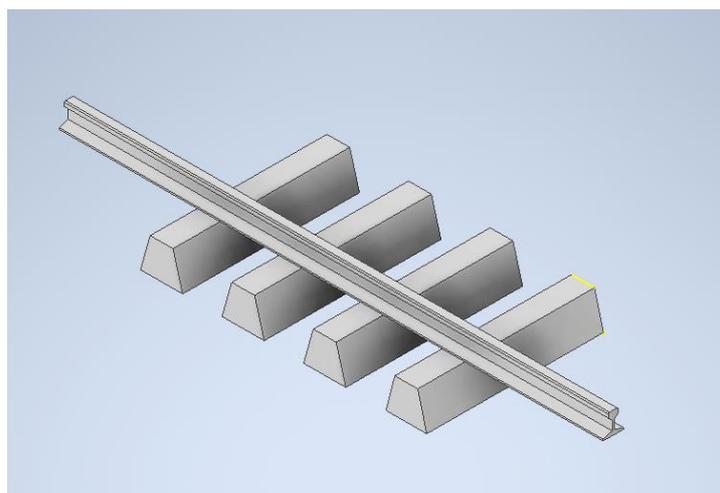


*Fuente: Propia.*

## 4.2 MONTAJE

Durante los ensayos se simuló la acción sobre un solo carril, por motivos de espacio, siguiendo el montaje el esquema de la Figura 32.

**Figura 32.** Esquema de montaje.



*Fuente: Propia.*

Como se aprecia en la Figura 32, el montaje constó de 4 traviesas, separadas inicialmente 600mm. Sobre las traviesas se colocó un solo carril, el cual se sujeta a estas mediante los elementos de sujeción. Todo ello estaría colocado sobre la placa de asiento, inicialmente TPU y posteriormente madera.

El actuador aplica la fuerza en el centro del montaje, dejando dos traviesas a cada lado del punto de aplicación de la fuerza.

El centrado del carril y del actuador se realiza con la ayuda de un láser, Figura 33.

**Figura 33.** Montaje.



*Fuente: Propia.*

Sobre este esquema inicial se fueron modificando parámetros. Inicialmente se modificó la frecuencia de ensayo, realizando primero un ensayo estático, seguido después de ensayos dinámicos a 2Hz, 5Hz y 10Hz.

Posteriormente se modificó la separación entre traviesas a 700mm, 800mm y 900mm, repitiendo todo el proceso de modificar la frecuencia de ensayo para distancia entre traviesas.

Por último, se sustituyó la palca de asiento de TPU por una placa de asiento de madera, y se repitió todo el proceso.

### 4.3 TOMA DE DATOS

Para la toma de datos se utilizaron tres ordenadores, 8 LVDTs y 8 Bandas extensométricas.

En el ordenador 1, se registró el tiempo y la fuerza aplicada. Este proceso se realiza de forma automática sin necesidad del uso de ningún sensor. Además, mediante sensores se registraron los siguientes datos:

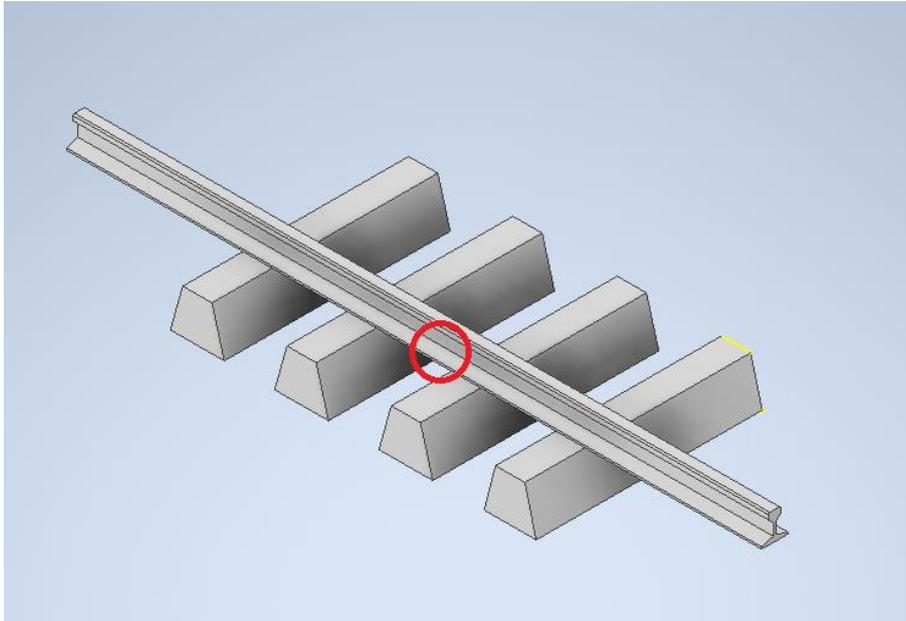
- La fecha que sufre el carril entre las dos traviesas entre las que el actuador aplica la fuerza, Figura 34 y Figura 35. Para registrar estos datos se utilizó un LVDT.

**Figura 34.** LVDT flecha del carril.



*Fuente: Propia.*

**Figura 35.** Colocación LVDT flecha del carril.



*Fuente: Propia.*

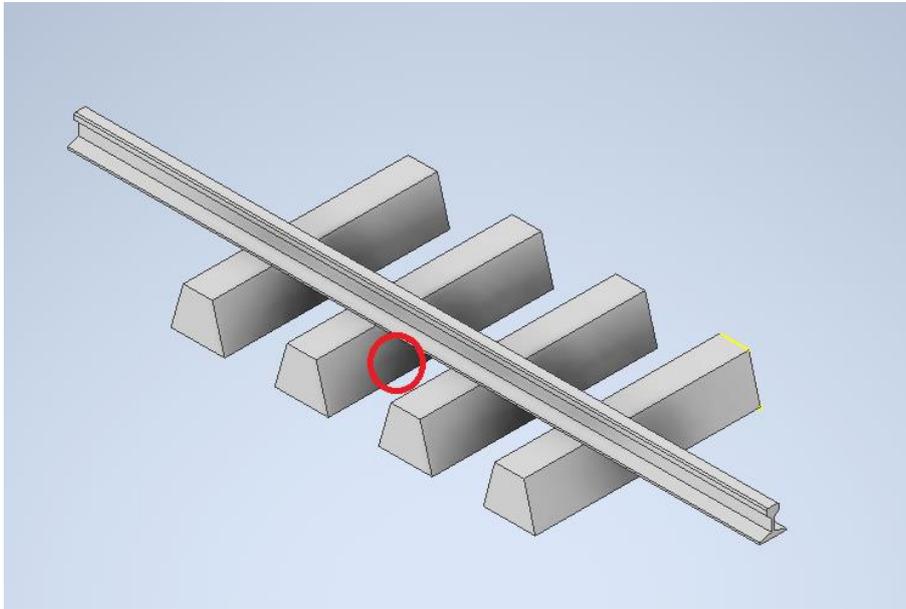
- El desplazamiento vertical que sufre una de las traviesas más próxima al actuador, Figura 36 y Figura 37. Para registrar esta medida se utilizó un LVDT.

**Figura 36.** LVDT desplazamiento de la traviesa.



*Fuente: Propia.*

**Figura 37.** Colocación LVDT desplazamiento traviesa.



*Fuente: Propia.*

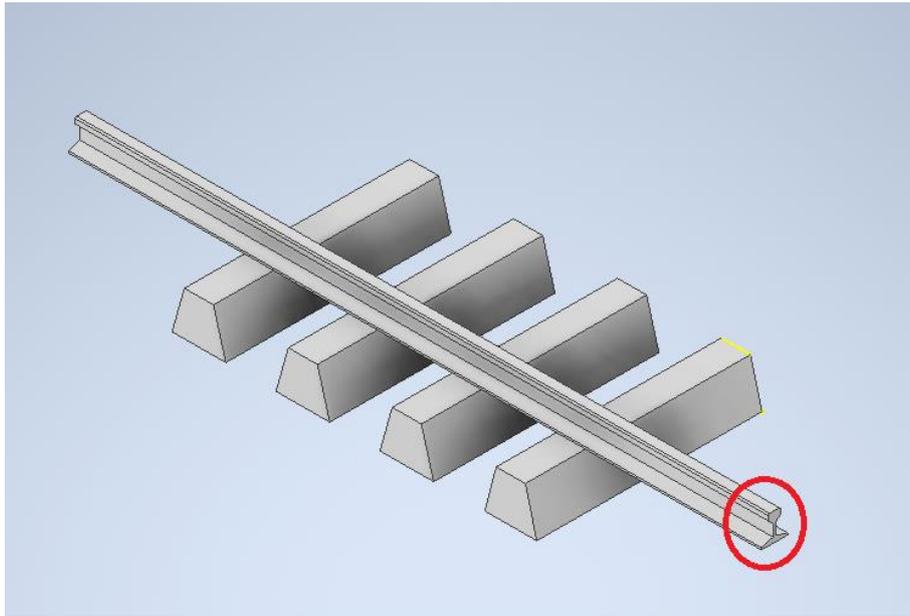
- El movimiento que se produce en el extremo libre del carril, Figura 38 y Figura 39. Para la medición se utilizó nuevamente un LVDT.

**Figura 38.** LVDT desplazamiento en el extremo.



*Fuente: Propia.*

**Figura 39.** Esquema LVDT desplazamiento en el extremo



*Fuente: Propia.*

En el ordenador 2, también se registra sin necesidad de sensor el tiempo y la fuerza aplicada. Los datos registrados con los LVDTs son:

- El desplazamiento del actuador, Figura 40

**Figura 40.** LVDT actuador.



*Fuente: Propia.*

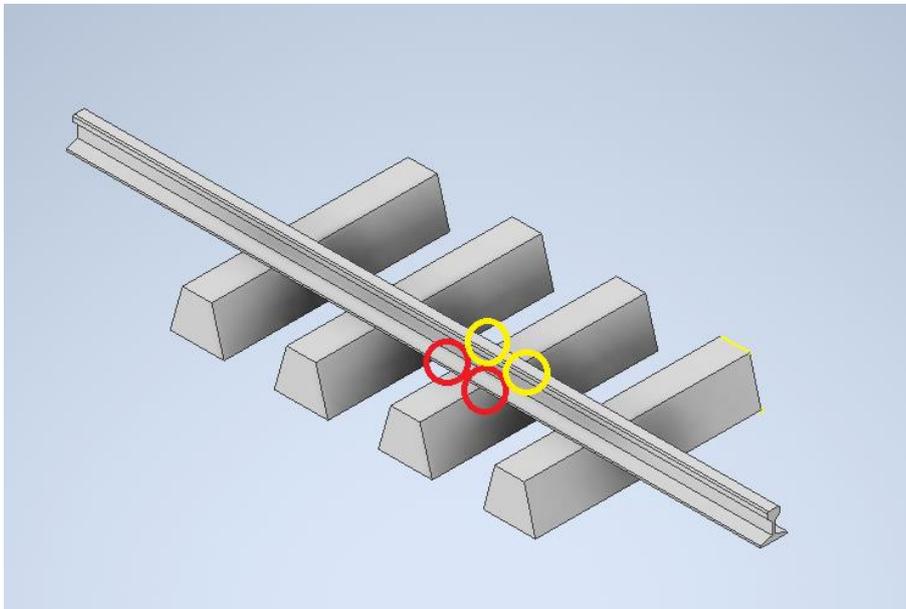
- El desplazamiento tanto del patín interior como del exterior, Figura 41 y 42. Para cada patín se utilizan dos LVDT, uno a cada lado de la traviesa, y se calcula el desplazamiento mediante la media de las medidas.

**Figura 41.** LVDT desplazamiento en el patín interior y en el patín exterior.



*Fuente: Propia.*

**Figura 42.** Esquema LVDT desplazamiento en el patín interior y en el patín exterior.

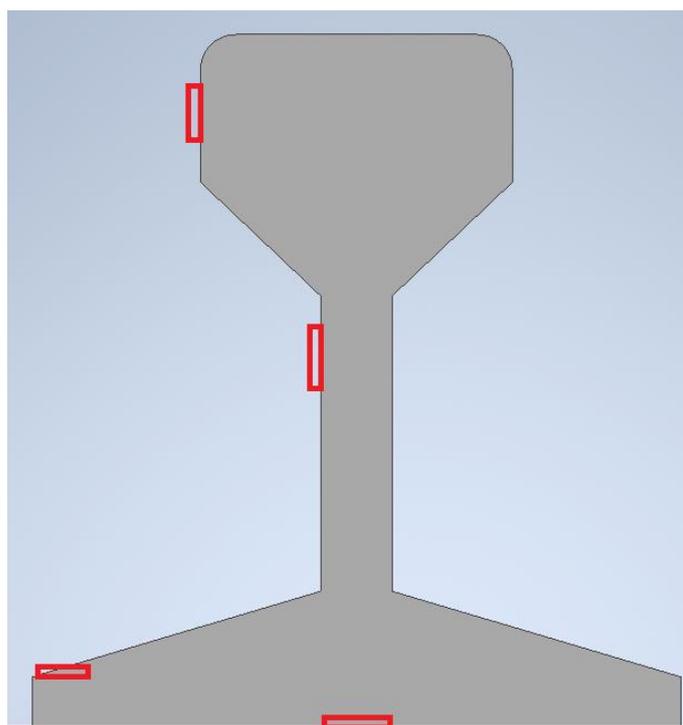


*Fuente: Propia.*

En el tercer ordenador, se registrarán los datos de las bandas extensiométricas junto con el tiempo. El tiempo se registrará nuevamente de forma automática sin necesidad de equipo de medida. Los datos de las bandas se registrarán en dos archivos '.txt', uno para los datos del carril y otro para los datos de la traviesa. Las medidas se tomarán en  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Las bandas en el carril se colocarán de la siguiente manera: en la parte central de la base, en el patín, en el alma a 6 cm de la parte superior de la cabeza y en la cabeza a 2 cm de la parte superior de la misma, todas ellas en el centro de luz, Figura 43.

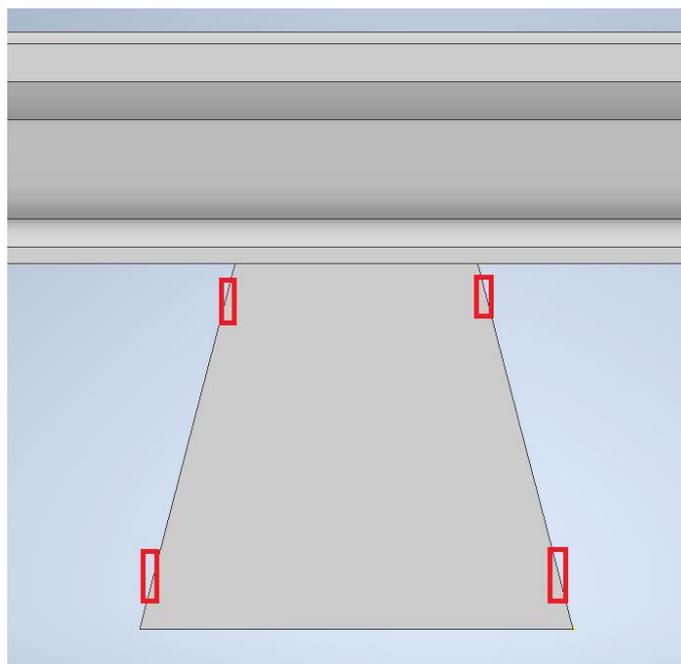
**Figura 43.** Bandas extensiométricas Carril.



*Fuente: Propia.*

Las bandas en la traviesa se ubicarán de la siguiente forma: por el lado interior y exterior en la parte superior e inferior, Figura 44. La distancia al extremo superior e inferior es de entre 10 y 25mm.

**Figura 44.** Bandas extensiométricas Traviesa.



Fuente: Propia.

### 4.3 CALCULO DE LA RIGIDEZ

En ingeniería, la rigidez es una medida cuantitativa de la oposición a las deformaciones producidas en un material a causa de una fuerza.

Para calcular la rigidez usaremos la siguiente formula:

$$\text{Rigidez dinámica} = \frac{\text{Variación de Fuerza}}{\text{Variación de Desplazamiento}}$$

**Ecuación 4.** Cálculo de la rigidez dinámica.

Como en los ensayos usaremos el mismo intervalo de fuerzas, las diferencias en la rigidez vendrán determinadas por la deformación. Obteniendo que con una variación de la deformación menor la rigidez será mayor.

### 4.5 POSPROCESADO DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados registrados por los LVDT y las bandas extensiométricas durante las pruebas de laboratorio son registrados de manera discreta. En este trabajo se utiliza un procedimiento de posprocesado para obtener una representación gráfica de los datos de los sensores con el fin de facilitar la comparación de resultados experimentales y numéricos.

Para ello se utiliza una regresión de Fourier, para encontrar el mejor ajuste a una ecuación armónica:

$$y(t) = a_0 + a_1 \cdot \cos(w \cdot t) + b_1 \cdot \sin(w \cdot t)$$

**Ecuación 5.** Ecuación armónica.

donde  $a_0$ ,  $a_1$  y  $b_1$  son parámetros de regresión y  $w$  es la frecuencia. Esta ecuación se puede transformar en una ecuación sinusoidal típica:

$$y(t) = y_0 + A \cdot \sin(w \cdot t + \varphi_0)$$

**Ecuación 6.** Ecuación sinusoidal.

usando las siguientes relaciones:

$$y_0 = a_0; \quad A = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}; \quad \varphi_0 = \arctan\left(\frac{b_1}{a_1}\right)$$

**Ecuación 7.** Relaciones.

Donde  $y_0$  es el desplazamiento vertical,  $A$  es la amplitud y  $\varphi_0$  es el cambio de fase de la onda sinusoidal.

#### 4.5.1. POSPROCESADO DE LOS LVDT

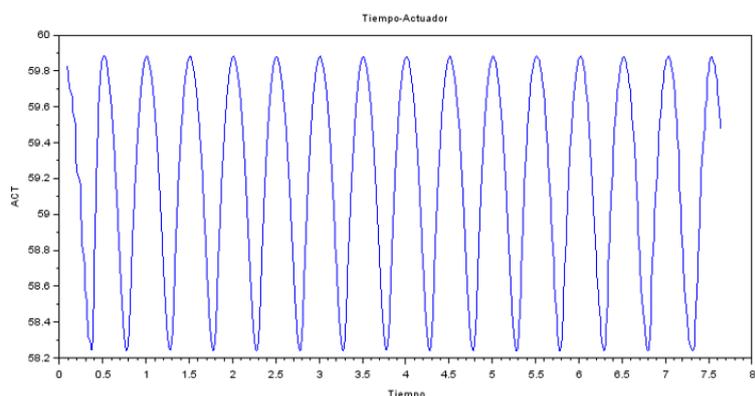
El análisis se centrará fundamentalmente en los ensayos dinámicos. Para realizar este proceso nos ayudaremos del programa informático Matlab.

El proceso es sencillo, se comenzará cargando el archivo .txt generado con los datos del ensayo y se asociará cada columna de datos a una variable.

Tras esto se procede a llevar a cero los datos de los sensores de desplazamiento y deformación. Esta acción se realiza porque cada LVDT comenzó a medir en una posición diferente, y si queremos realizar una comparación entre ensayos debemos buscar el cero de estos. Este paso no tiene dificultad, se calcula el valor mínimo de cada variable, y se resta a todos las celdas de dicha variable.

Tras este punto, se procede a un primer cálculo de la rigidez para cada configuración de ensayo, además se realizará una representación Deformación - Tiempo de cada parámetro, Figura 45.

**Figura 45.** Grafica Deformación – Tiempo.

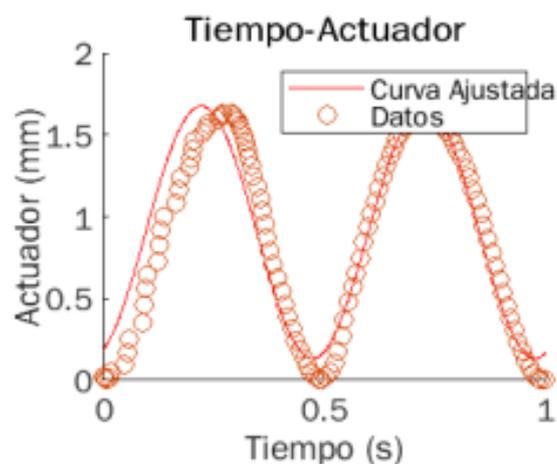


*Fuente: Propia.*

Este primer análisis dará una ligera idea de que variables son las más interesantes para estudiar en profundidad, y cuales debemos descartar porque los ensayos no devuelven respuestas concluyentes.

Una vez se conoce que variables son las más interesantes, se repite el proceso anterior y además se realizara una regresión de Fourier. Esto permite tener la curva ajustada, con la cual se puede hacer una representación gráfica donde se realizará una comparativa de la curva original con la curva ajustada, Figura 46. También se realizará un nuevo cálculo de la rigidez con los datos de la curva ajustada.

**Figura 46.** Comparación curva original – curva ajustada LVDT.



*Fuente: Propia.*

#### **4.5.2 POSTPROCESADO DE LAS BANDAS EXTENSIOMETRICAS**

En este proceso se analizan las bandas extensiométricas colocadas sobre el carril.

Para ello se utiliza nuevamente Matlab. El proceso consiste en cargar el archivo y definir los datos necesarios para realizar una regresión de Fourier. Al contrario que en el caso de los LVDTs, donde todo el proceso de la regresión se hacía automáticamente, aquí se deberá definir la frecuencia de forma manual. Nuevamente esto permite representar los datos originales y la curva ajustada.

#### **4.6 ANALISIS DE LOS DATOS**

En el análisis de los datos se comprobará en primer lugar que las regresiones se ajustan correctamente a la curva original.

Una vez sepamos que las regresiones se ajustan correctamente, obtendremos de ellas los valores de R<sup>2</sup>, Fase, Frecuencia Angular, Amplitud, Valor Medio y Rigidez para cada variable, en el supuesto de los LVDTs.

De estos valores, los más interesantes serán la amplitud y la rigidez. Ya que como hemos explicado antes, la variación en la deformación será el valor que influya en la rigidez.

Para las bandas extensiométricas obtendremos  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $w$ , la amplitud y la fase. Siendo la amplitud el valor más importante de estudio.

Con estos datos se realiza un análisis más profundo, consistente en fijar la frecuencia de ensayo y comparar los datos obtenidos con diferentes separaciones de traviesa. Luego fijaremos la separación de traviesa, y compararemos los datos en las diferentes frecuencias de ensayo.

A partir de estas comparaciones debemos ser capaces de responder las siguientes preguntas:

¿Aumentar la separación entre traviesas aumenta o disminuye la rigidez?

¿Aumentar la frecuencia aumenta o disminuye la rigidez?

¿Cómo influye la separación entre traviesas en la amplitud? ¿Y la frecuencia?

## **5 RESULTADOS**

En este apartado se realizará un análisis de los resultados obtenidos y se procederá a dar respuesta a las preguntas planteadas en el apartado anterior.

### **5.1 RIGIDECES**

La primera fase consiste en calcular las rigideces de las diferentes variables. Este valor junto con su representación gráfica permite decidir que variables resultan más interesantes para realizar un estudio en profundidad. Cada ensayo dispone de dos tomas de datos, por tanto, se dispone de dos archivos que se deben analizar.

Tomaremos como variables de estudio el desplazamiento del actuador y el desplazamiento que sufre la traviesa, variable que llamaremos bloque. Se toma esta decisión al considerar que son las variables más relevantes para conocer la respuesta que ofrece la vía ante las diferentes situaciones de ensayo.

En la Tabla 5 se pueden ver las rigideces obtenidas con los datos del actuador, obtenidos en los ensayos. En la tabla se puede observar que los valores de rigidez muestran una tendencia.

**Tabla 5.** Rigideces actuador.

	Rigidez ensayo 1 (kN/mm)	Rigidez ensayo 2 (kN/mm)
600 mm Madera Estático	35.8	57.2
600 mm Madera 2Hz	57.64	63.97
600 mm Madera 5hz	59.12	64.98
600 mm Madera 10hz	55.73	62.26
600 mm Manta Estático	19.8	21.5
600 mm Manta 2Hz	24.88	25.54
600 mm Manta 5Hz	24.81	25.28
600 mm Manta 10Hz	23.51	24.08
700 mm Madera Estático	43.6	43.9
700 mm Madera 2Hz	45.70	63.97
700 mm Madera 5hz	46.18	64.97
700 mm Madera 10hz	39.94	62.26
700 mm Manta Estático	20.3	20.4
700 mm Manta 2Hz	24.02	25.54
700 mm Manta 5Hz	23.84	25.28
700 mm Manta 10Hz	23.11	24.08
800 mm Madera Estático	41.4	61.7
800 mm Madera 2Hz	66.75	69.27
800 mm Madera 5hz	69.37	70.3
800 mm Madera 10hz	69.10	69.73
800 mm Manta Estático	20.1	20
800 mm Manta 2Hz	23.48	24.24
800 mm Manta 5Hz	23.44	23.74
800 mm Manta 10Hz	22.87	21.62
900 mm Madera Estático	55.3	57.2
900 mm Madera 2Hz	63.01	63.14
900 mm Madera 5hz	63.86	64.02
900 mm Madera 10hz	62.76	63.18
900 mm Manta Estático	18	19.4
900 mm Manta 2Hz	22.42	22.35
900 mm Manta 5Hz	22.20	22.12
900 mm Manta 10Hz	21.39	21.63

Fuente: Propia.

Al comparar los dos resultados que se han realizado para situación de ensayo, se puede observar que en el caso de utilizar como soporte la placa de madera, en algunos casos existen diferencias importantes, en algunos casos mayores al 30%, mientras que en el caso de utilizar como soporte mantas de goma, las mayores diferencias que se aprecian son de entorno a un 5%. Analizando los motivos por los que esta variación en los datos se produce, se llega a la conclusión de que la placa de caucho se adapta al contacto entre elementos, permitiendo una transmisión de esfuerzos más uniforme, mientras que la madera no tiene esa capacidad de adaptarse, por lo que el sistema es más sensible a fenómenos locales, que son los que producen dichas variaciones en los resultados.

En la Tabla 6 se observan los resultados obtenidos en la variable bloque.

**Tabla 6.** Rigideces bloque.

	Rigidez ensayo 1 (kN/mm)	Rigidez ensayo 2 (kN/mm)
600 mm Madera Estático	39.2	80
600 mm Madera 2Hz	69.5	85.5
600 mm Madera 5hz	70.2	87
600 mm Madera 10hz	66.1	86.8
600 mm Manta Estático	21.7	22.8
600 mm Manta 2Hz	26.2	26.1
600 mm Manta 5Hz	26.2	26.5
600 mm Manta 10Hz	26.1	25.5
700 mm Madera Estático	75	70.9
700 mm Madera 2Hz	72.5	66.9
700 mm Madera 5Hz	71.7	65
700 mm Madera 10Hz	64.8	59.7
700 mm Manta Estático	23.8	24
700 mm Manta 2Hz	27.1	27.9
700 mm Manta 5Hz	27.8	27.7
700 mm Manta 10Hz	28	27.4
800 mm Madera Estático	61.1	179
800 mm Madera 2Hz	197	211
800 mm Madera 5Hz	202	209
800 mm Madera 10Hz	211	223
800 mm Manta Estático	24.8	24.5
800 mm Manta 2Hz	27.9	28.4
800 mm Manta 5Hz	28.1	28.4
800 mm Manta 10Hz	27.9	28
900 mm Madera Estático	170	194
900 mm Madera 2Hz	240	245
900 mm Madera 5Hz	244	242
900 mm Madera 10Hz	242	242
900 mm Manta Estático	20.4	23.4
900 mm Manta 2Hz	24.8	25.1
900 mm Manta 5Hz	25	25.1
900 mm Manta 10Hz	24.9	25.1

Fuente: Propia.

En este caso podemos ver las mismas tendencias relativas a la placa de apoyo utilizada comentadas previamente.

Otras variables medidas se corresponden al desplazamiento en el patín interior, Tabla 7 y el patín exterior, Tabla 8. En ambos casos resulta muy complicado predecir como se comportarán, lo que las convierte en variables secundarias de estudio.

**Tabla 7.** Rigideces patín interior.

	Rigidez ensayo 1 (kN/mm)	Rigidez ensayo 2 (kN/mm)
600 mm Madera Estático	478	704
600 mm Madera 2Hz	648	1020
600 mm Madera 5hz	694	1100
600 mm Madera 10hz	499	523
600 mm Manta Estático	387	508
600 mm Manta 2Hz	845	829
600 mm Manta 5Hz	966	999
600 mm Manta 10Hz	695	741
700 mm Madera Estático	848	699
700 mm Madera 2Hz	1220	1070
700 mm Madera 5Hz	1030	868
700 mm Madera 10Hz	318	320
700 mm Manta Estático	549	549
700 mm Manta 2Hz	939	930
700 mm Manta 5Hz	695	1010
700 mm Manta 10Hz	832	821
800 mm Madera Estático	664	1460
800 mm Madera 2Hz	1230	1010
800 mm Madera 5Hz	679	635
800 mm Madera 10Hz	296	297
800 mm Manta Estático	475	517
800 mm Manta 2Hz	896	956
800 mm Manta 5Hz	972	983
800 mm Manta 10Hz	686	694
900 mm Madera Estático	1020	1100
900 mm Madera 2Hz	904	879
900 mm Madera 5Hz	616	609
900 mm Madera 10Hz	227	228
900 mm Manta Estático	206	245
900 mm Manta 2Hz	336	342
900 mm Manta 5Hz	398	427
900 mm Manta 10Hz	521	547

Fuente: Propia.

**Tabla 8.** Rigideces patín exterior.

	Rigidez ensayo 1 (kN/mm)	Rigidez ensayo 2 (kN/mm)
600 mm Madera Estático	154	196
600 mm Madera 2Hz	247	257
600 mm Madera 5hz	261	273
600 mm Madera 10hz	265	281
600 mm Manta Estático	243	328
600 mm Manta 2Hz	505	511
600 mm Manta 5Hz	571	600
600 mm Manta 10Hz	1050	1210
700 mm Madera Estático	168	167
700 mm Madera 2Hz	198	200
700 mm Madera 5Hz	207	207
700 mm Madera 10Hz	207	206
700 mm Manta Estático	392	395
700 mm Manta 2Hz	665	664
700 mm Manta 5Hz	772	900
700 mm Manta 10Hz	2130	1850
800 mm Madera Estático	164	210
800 mm Madera 2Hz	244	262
800 mm Madera 5Hz	623	270
800 mm Madera 10Hz	277	281
800 mm Manta Estático	324	340
800 mm Manta 2Hz	565	689
800 mm Manta 5Hz	707	828
800 mm Manta 10Hz	1890	2130
900 mm Madera Estático	184	192
900 mm Madera 2Hz	245	247
900 mm Madera 5Hz	257	257
900 mm Madera 10Hz	252	257
900 mm Manta Estático	397	457
900 mm Manta 2Hz	721	797
900 mm Manta 5Hz	878	1090
900 mm Manta 10Hz	829	866

Fuente: Propia.

Al observar las rigideces obtenidas de las variables patín interior y patín exterior se ven resultados similares entre las dos tomas de datos correspondientes a cada ensayo, pero al ser variables de estudio secundarias, no se profundiza en su estudio.

Tras los primeros cálculos de rigideces se tendrá en cuenta lo comentado sobre la placa de apoyo de madera y los problemas que presenta en el resto de los elementos de la vía para lograr un apoyo estable sobre la misma y en cómo puede influir este suceso en la toma de datos y se profundizó únicamente en el análisis de los resultados derivados de ensayo sobre placas de caucho.

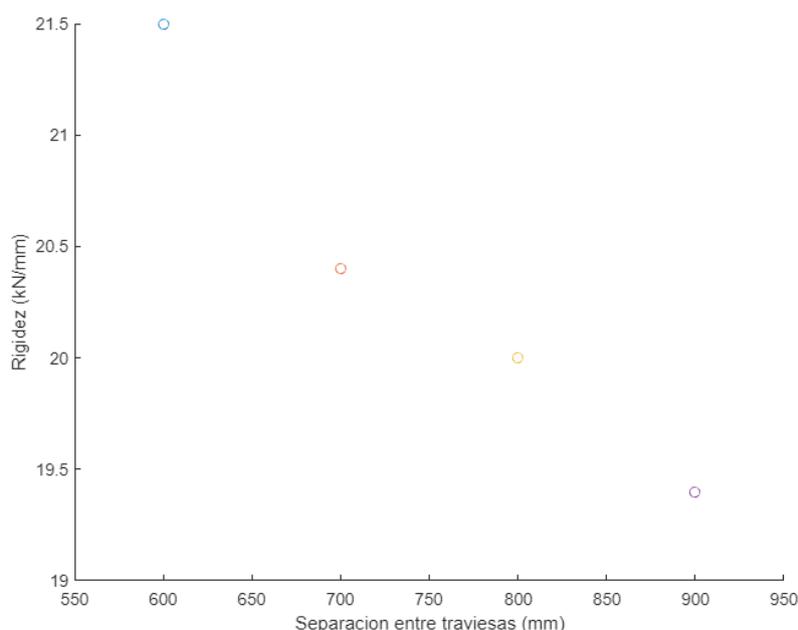
## 5.2 ENSAYOS ESTATICOS

Analizando las rigideces obtenidas con los datos medidos por el LVDT del actuador, obtenemos la Figura 47.

Como se observa en la Figura 47, a medida que aumentamos la separación entre traviesas, la rigidez disminuye.

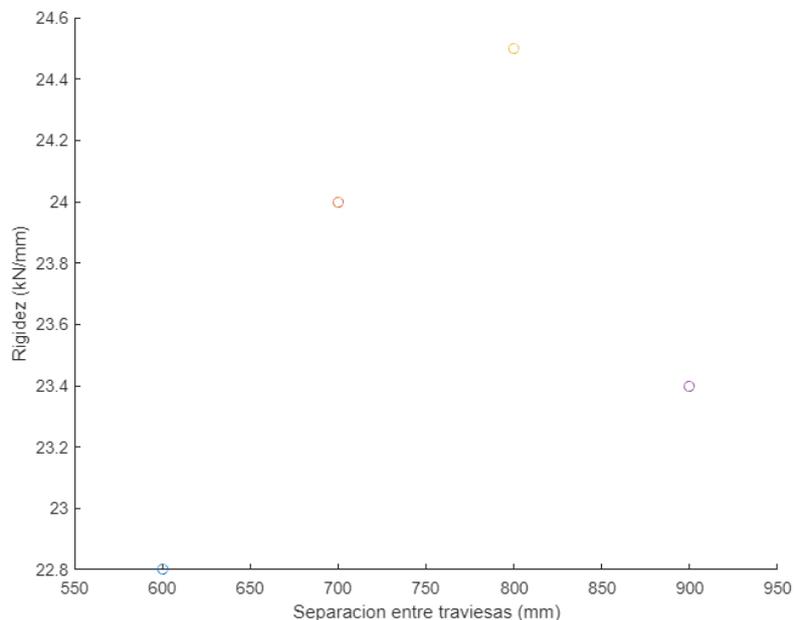
La deformación medida en el actuador, se corresponde aproximadamente a la suma de la deformación en la flecha y la deformación en el bloque. Por ello los resultados obtenidos son lógicos, ya que, al estar las traviesas más juntas, la deformación que sufre la vía en su totalidad será menor, y por tanto la rigidez del conjunto será mayor.

**Figura 47.** Influencia de la separación entre traviesas en los ensayos estáticos sobre manta en la variable actuador.



*Fuente: Propia.*

**Figura 48.** Influencia de la separación entre traviesas en los ensayos estáticos sobre manta en la variable bloque.



*Fuente: Propia.*

En la Figura 48 vemos que la rigidez aumenta con la separación en el bloque, teniendo nuevamente los resultados lógicos, ya que, al aumentar la separación, la fuerza soportada por cada traviesa será mayor y por tanto el bloque tendrá una rigidez mayor. También vemos que el ensayo a 900mm no se debió realizar correctamente, ya que se interrumpe la tendencia.

Con los ensayos estáticos también se comprueba que aumentar la separación de las traviesas no provoca daños en ninguno de los elementos de la vía y que se puede comenzar a realizar los ensayos dinámicos.

### 5.3 ENSAYOS DINAMICOS

El análisis de los resultados dinámicos se dividirá en dos. En primer lugar, la influencia de la frecuencia y a continuación la influencia de la separación entre traviesas.

### **5.3.1 INFLUENCIA DE LA FRECUENCIA**

Como ya se comentó, la velocidad convencional de un tren es aproximadamente 200km/h y la de un tren de alta velocidad actual es aproximadamente 350 km/h. Con una distancia entre bogíes de 18 m, esto corresponde a una frecuencia entre 3 y 5 Hz. Por tanto, para simular las diferentes velocidades en los ensayos se utilizan 3 frecuencias diferentes, 2Hz que se corresponde con una frecuencia angular de 12,5 rad s<sup>-1</sup>, 5Hz que se corresponde a una frecuencia angular de 31,4 rad s<sup>-1</sup> y 10Hz que se corresponde a una frecuencia angular de 62,8 rad s<sup>-1</sup>.

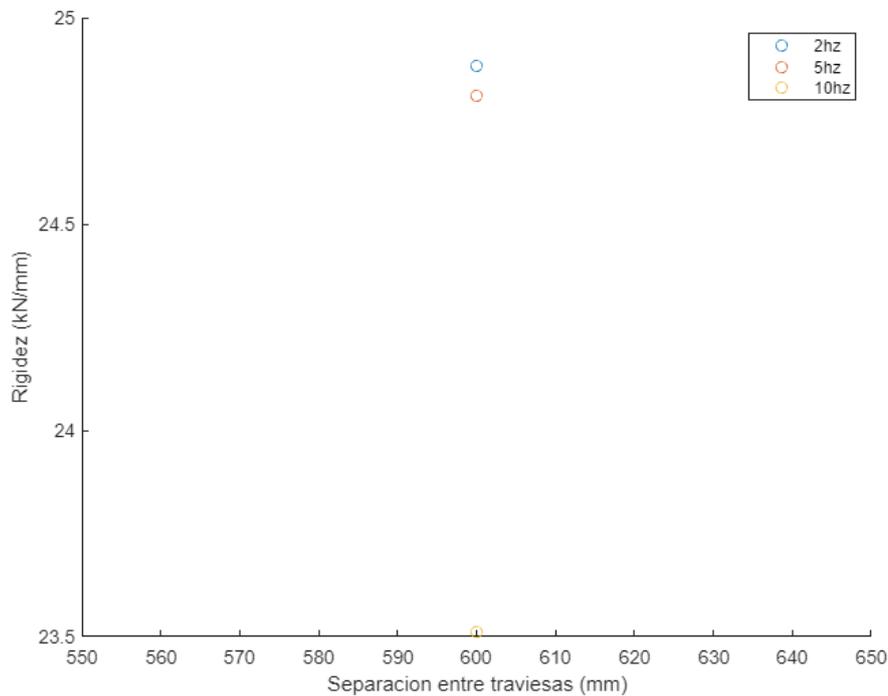
En el análisis teórico de la influencia de la frecuencia, se concluye que una mayor velocidad del tren provocará mayores deformaciones en los elementos de la superestructura, lo que se traducirá en una disminución de la rigidez de la vía.

Para comprobar si la hipótesis es correcta, será necesario analizar las variaciones de la rigidez de la vía. Para ello se mantiene fija la distancia entre traviesas, y se modifica la frecuencia de ensayo, comparando las rigideces obtenidas en cada caso.

Para un cálculo más preciso de las rigideces, se realizará un ajuste de Fourier a los datos obtenidos en la medición, obteniendo así una curva ajustada y por tanto unos valores de rigidez más precisos.

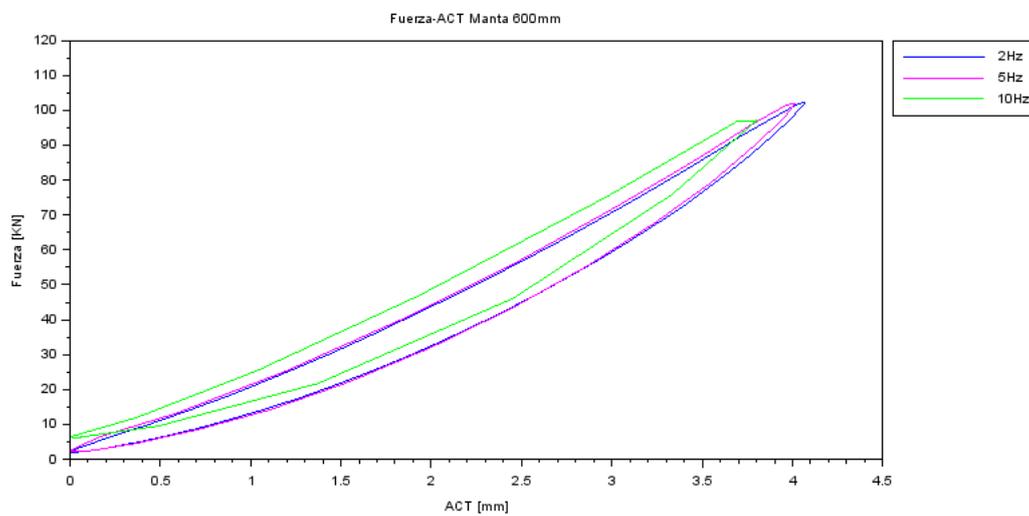
Se analiza en primer lugar las rigideces obtenidas de la variable actuador, en ensayos realizados sobre una placa de asiento de goma. Para ello fijaremos la distancia entre traviesas en 600mm, obteniendo los resultados de la Figura 49 y Figura 50.

**Figura 49.** Influencia de la frecuencia con separación entre traviesas de 600mm en el actuador. Grafica Rigidez-Separación entre traviesas.



Fuente: Propia.

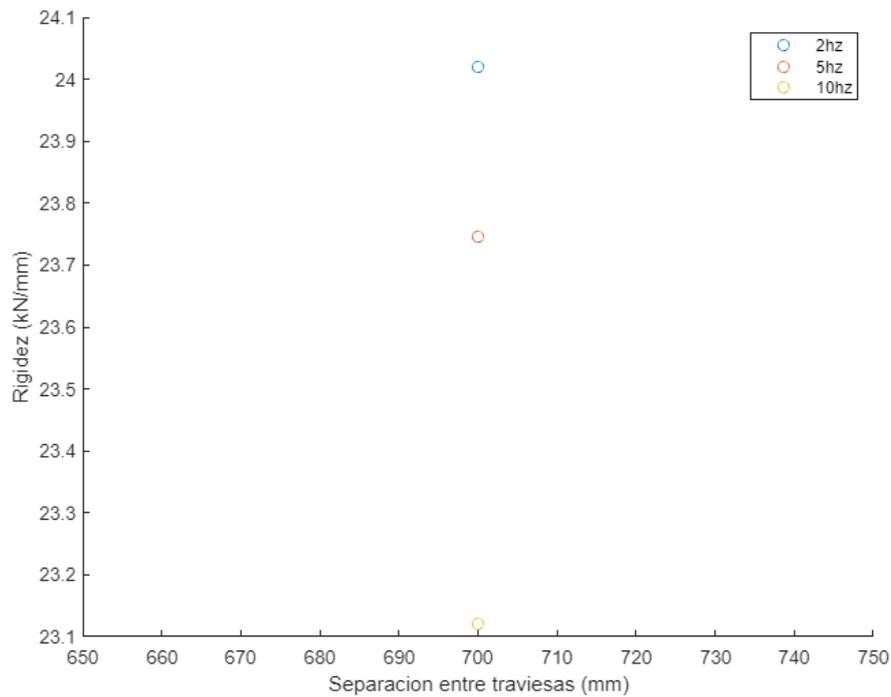
**Figura 50.** Influencia de la frecuencia con separación entre traviesas de 600mm en el actuador. Grafica Fuerza-Desplazamiento.



Fuente: Propia.

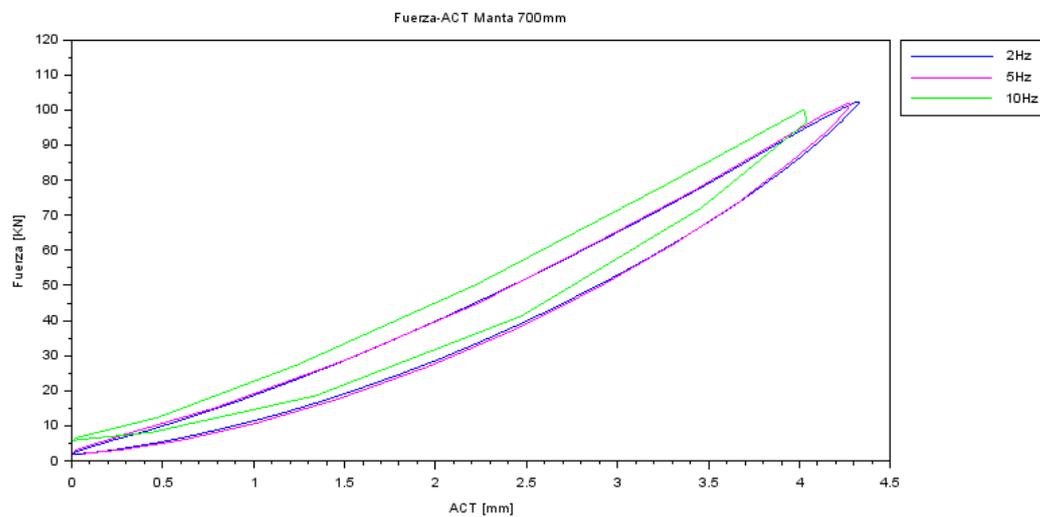
Se repite la comparación fijando la separación en 700mm (Figura 51 y Figura 52), en 800mm (Figura 53 y Figura 54) y finalmente en 900mm (Figura 55 y Figura 56).

**Figura 51.** Influencia de la frecuencia con separación entre traviesas de 700mm en el actuador. Grafica Rigidez-Separación entre traviesas.



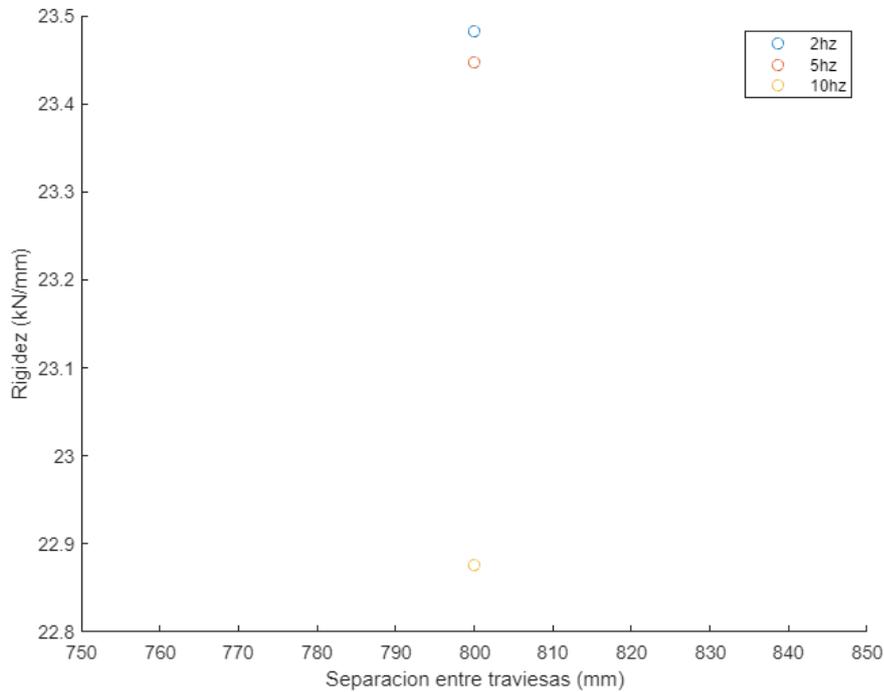
Fuente: Propia.

**Figura 52.** Influencia de la frecuencia con separación entre traviesas de 700mm en el actuador. Grafica Fuerza-Desplazamiento.



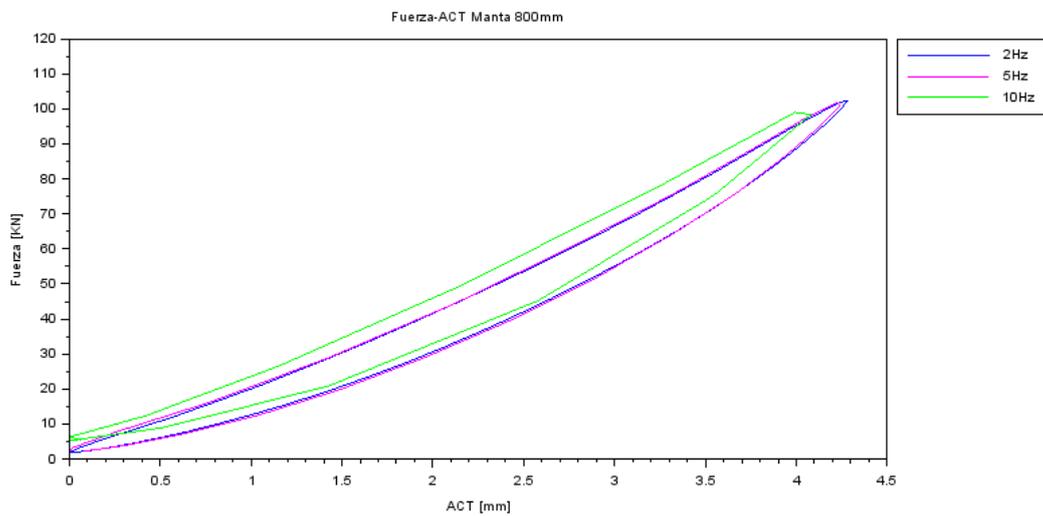
Fuente: Propia.

**Figura 53.** Influencia de la frecuencia con separación entre traviesas de 800mm en el actuador. Grafica Rigidez-Separación entre traviesas.



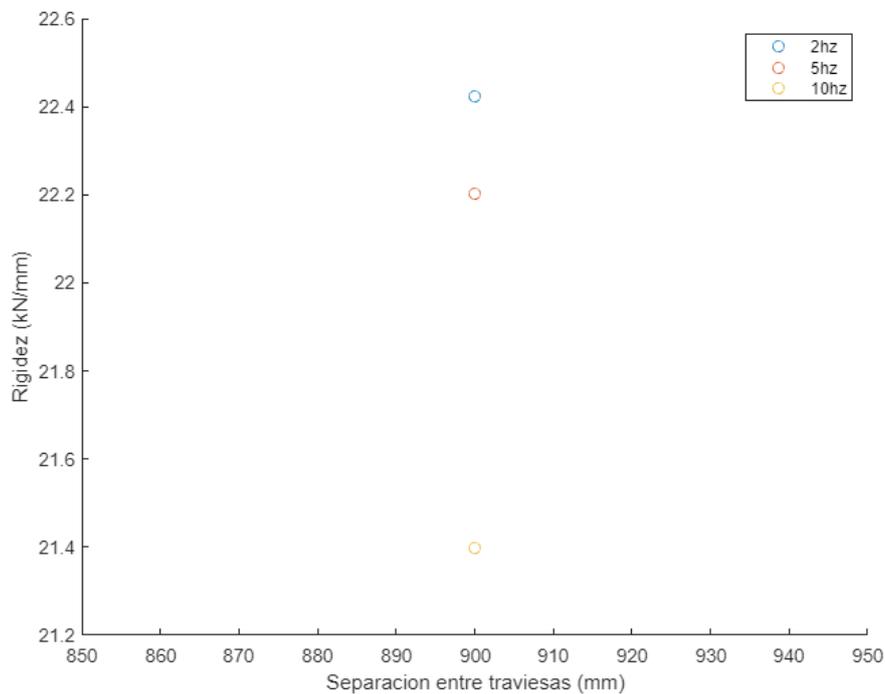
Fuente: Propia.

**Figura 54.** Influencia de la frecuencia con separación entre traviesas de 800mm en el actuador. Grafica Fuerza-Desplazamiento.



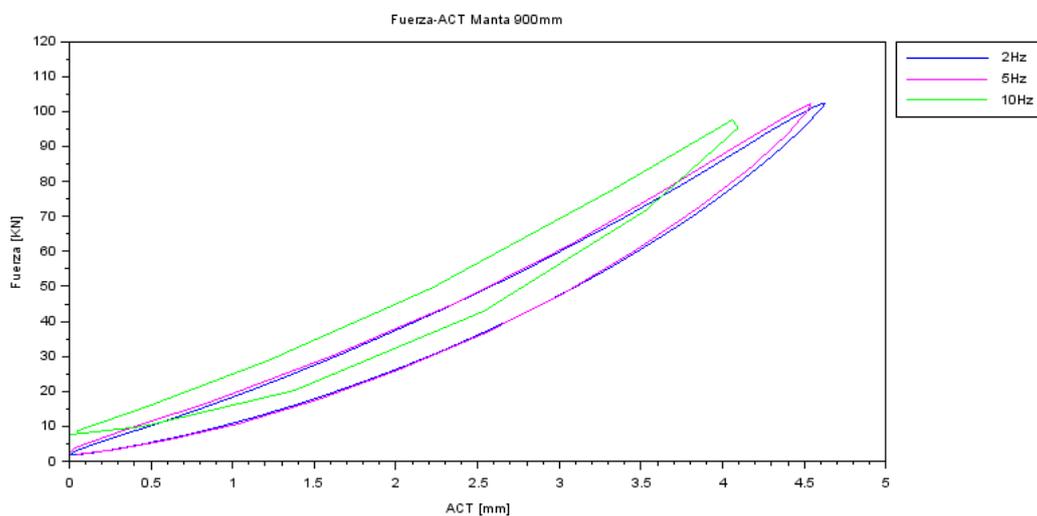
Fuente: Propia.

**Figura 55.** Influencia de la frecuencia con separación entre traviesas de 900mm en el actuador. Grafica Rigidez-Separación entre traviesas.



Fuente: Propia.

**Figura 56.** Influencia de la frecuencia con separación entre traviesas de 900mm en el actuador. Grafica Fuerza-Desplazamiento.



Fuente: Propia.

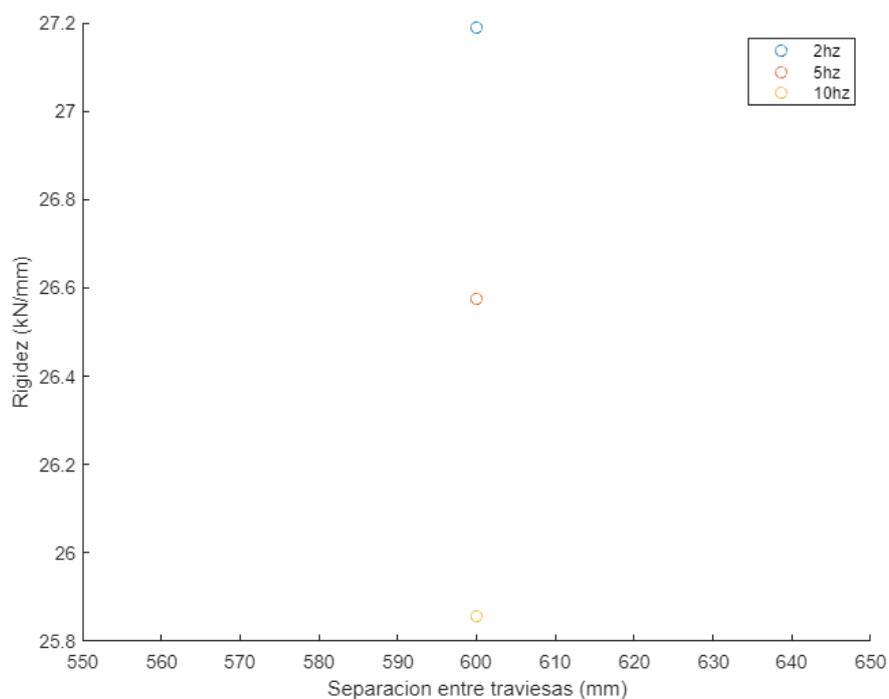
El comportamiento observado con una separación de 600mm entre traviesas, se repite nuevamente con 700mm, 800mm y 900mm de distancia.

Se repite el proceso analizando los ensayos sobre placa de madera. Tras obtener la curva ajustada y calcular las rigideces, no se obtienen unos valores que muestren una tendencia clara. Como se intuía en el primer análisis, la placa de asiento de madera no ofrece la suficiente estabilidad para colocar los elementos de la vía, generando ligeros movimientos durante el ensayo y provocando así una medición de datos incorrecta.

Finalmente, se vuelve a realizar el proceso analizando esta vez las rigideces obtenidas de la variable bloque. Solo se analizarán los ensayos sobre palca de asiento de goma.

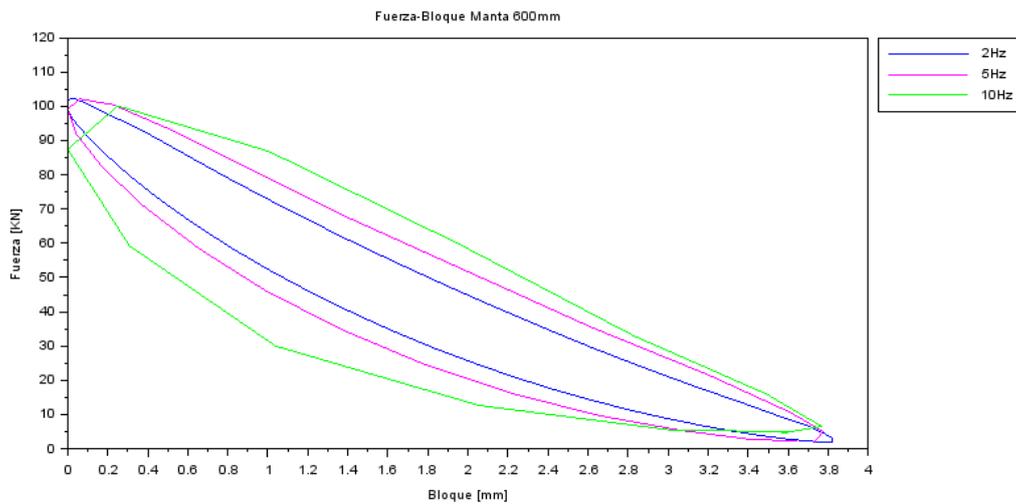
La Figura 57 y la Figura 59 muestran los resultados con 600mm de separación entre traviesas, la Figura 59 y la Figura 60 con 700mm, la Figura 61 y la Figura 62 con 800mm y la Figura 63 y la Figura 64 con 900mm.

**Figura 57.** Influencia de la frecuencia con separación entre traviesas de 600mm en el bloque. Grafica Rigidez-Separación entre traviesas.



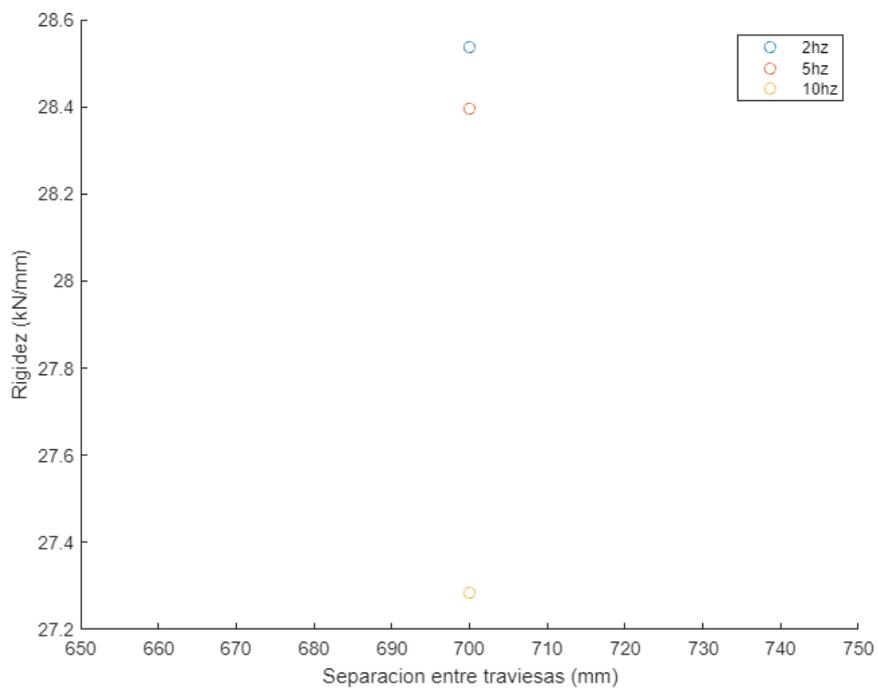
*Fuente: Propia.*

**Figura 58.** Influencia de la frecuencia con separación entre traviesas de 600mm en el bloque. Grafica Fuerza-Desplazamiento.



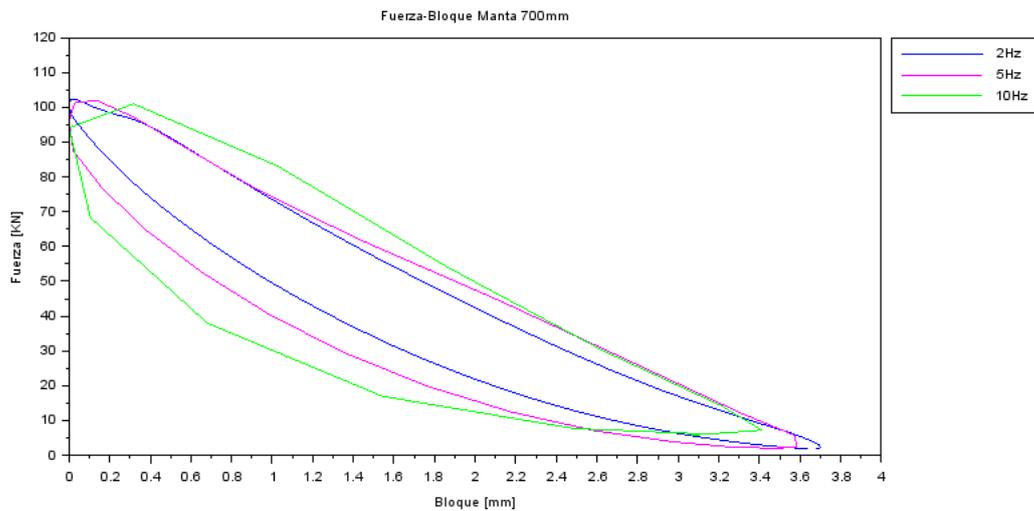
Fuente: Propia.

**Figura 59.** Influencia de la frecuencia con separación entre traviesas de 700mm en el bloque. Grafica Rigidez-Separación entre traviesas.



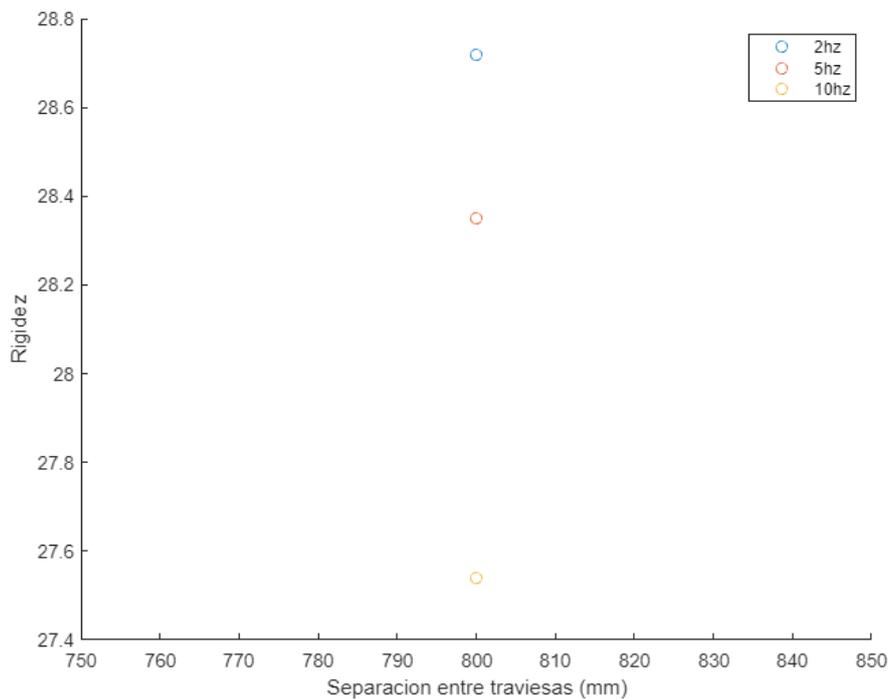
Fuente: Propia.

**Figura 60.** Influencia de la frecuencia con separación entre traviesas de 700mm en el bloque. Grafica Fuerza-Desplazamiento.



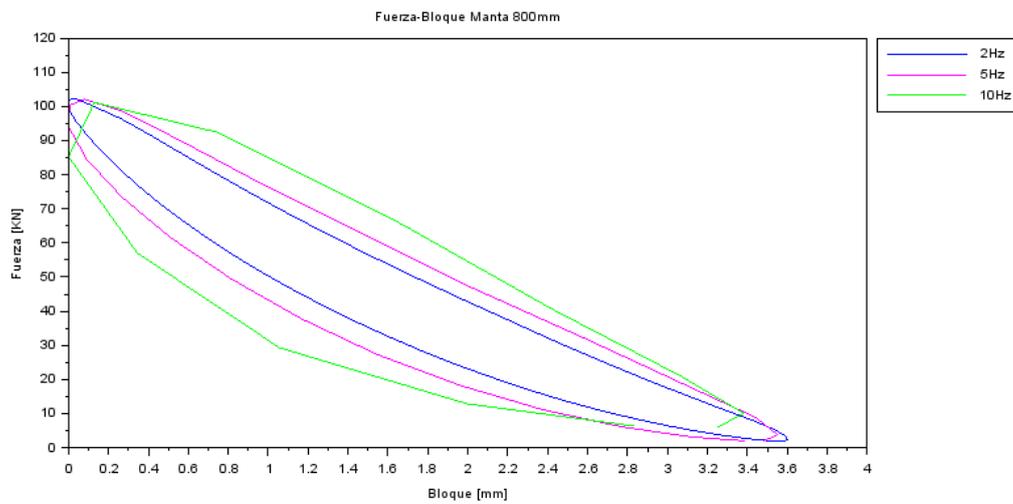
Fuente: Propia.

**Figura 61.** Influencia de la frecuencia con separación entre traviesas de 800mm en el bloque. Grafica Rigidez-Separación entre traviesas.



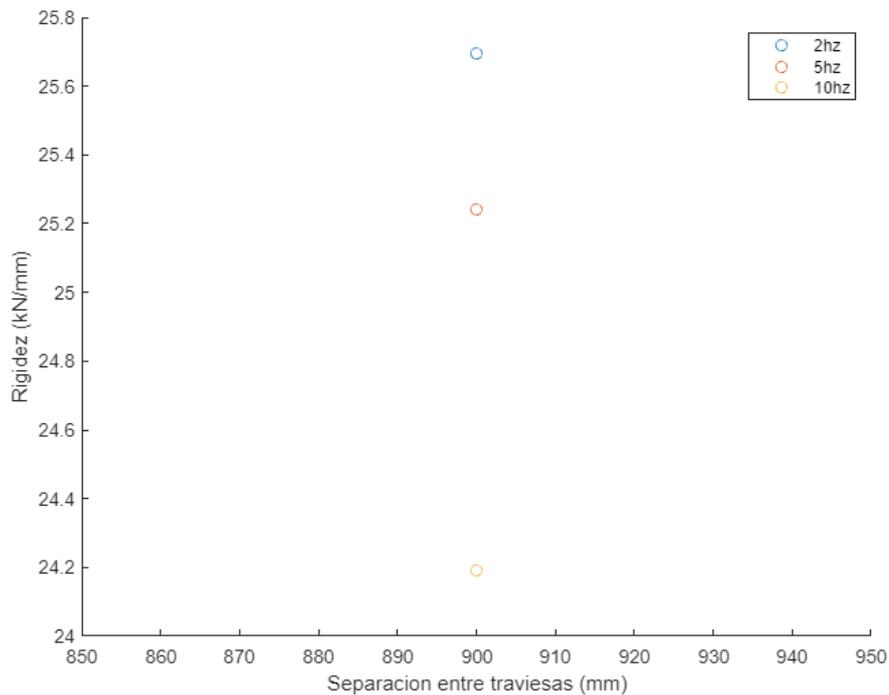
Fuente: Propia.

**Figura 62.** Influencia de la frecuencia con separación entre traviesas de 800mm en el bloque. Grafica Fuerza-Desplazamiento.



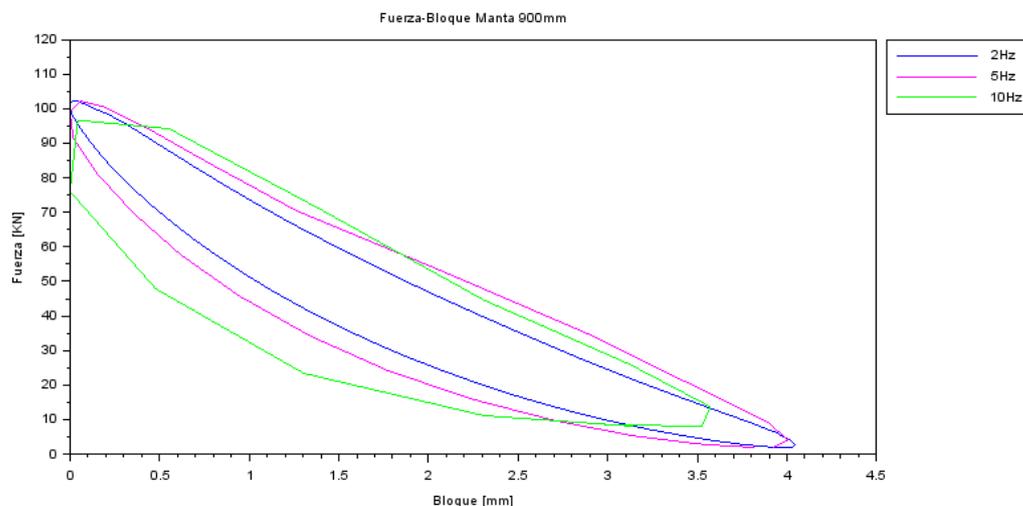
Fuente: Propia.

**Figura 63.** Influencia de la frecuencia con separación entre traviesas de 900mm en el bloque. Grafica Rigidez-Separación entre traviesas.



Fuente: Propia.

**Figura 64.** Influencia de la frecuencia con separación entre traviesas de 900mm en el bloque. Grafica Fuerza-Desplazamiento.



Fuente: Propia.

Nuevamente en todos los casos de estudio se observa la misma tendencia ya observada en el caso de las rigideces de la variable actuador.

Se puede afirmar por tanto que, aumentando la frecuencia, la rigidez disminuye.

### 5.3.2 INFLUENCIA DE LA SEPARACION ENTRE TRAVIESAS

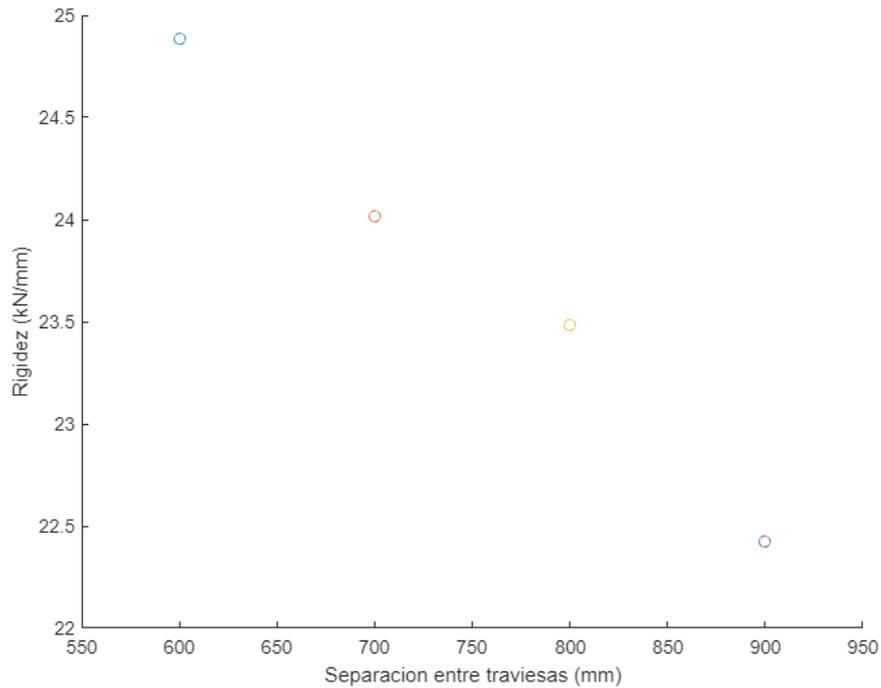
Se utilizaron 4 distancias entre traviesas para realizar los ensayos, 600mm, 700mm, 800mm y 900mm. Se utilizan estos valores de ensayo, porque en el análisis teórico se ve que existe unos límites económicos y técnicos, que dejan como posibles opciones de separación los valores comprendidos entre 0.6 y 1 metros.

En el análisis teórico se llega a la conclusión que colocar las traviesas más lejos unas de otras, aumenta la tensión debajo de ellas y disminuye la rigidez.

Para comprobar si la hipótesis es correcta, se fija una frecuencia de ensayo y se aumenta la separación entre traviesas. Con los datos obtenidos de los ensayos y ajustados mediante Fourier, se calculan las rigideces y se compararan.

En primer lugar, se calculan las rigideces del actuador con una frecuencia de 2 Hz, obteniendo los resultados de la Figura 65.

**Figura 65.** Influencia de la separación entre traviesas con una frecuencia de 2 Hz en el actuador.

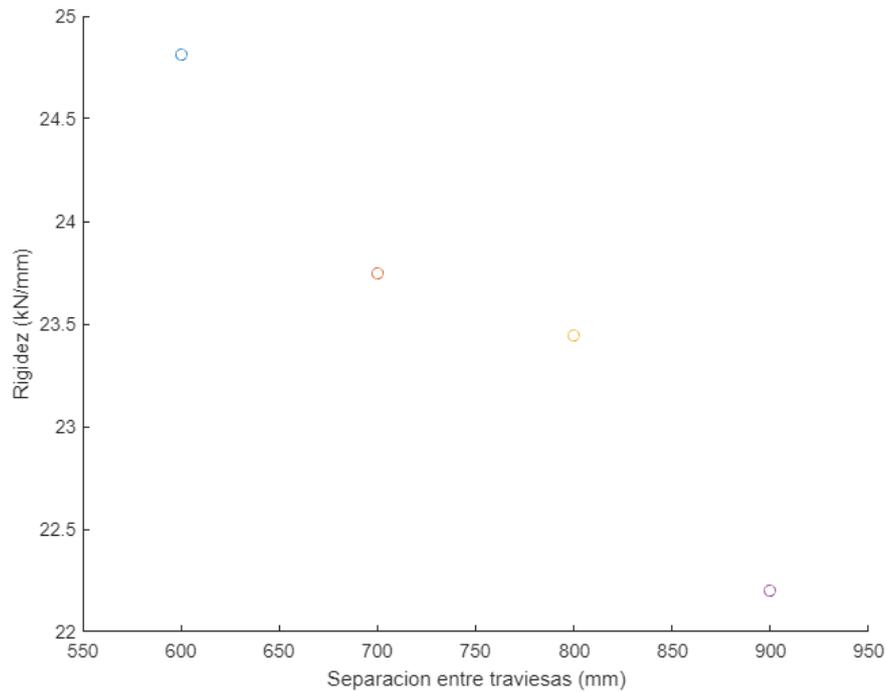


*Fuente: Propia.*

En la gráfica se observa como al aumentar la distancia entre traviesas, la rigidez disminuye, con ello se confirma de la hipótesis teórica.

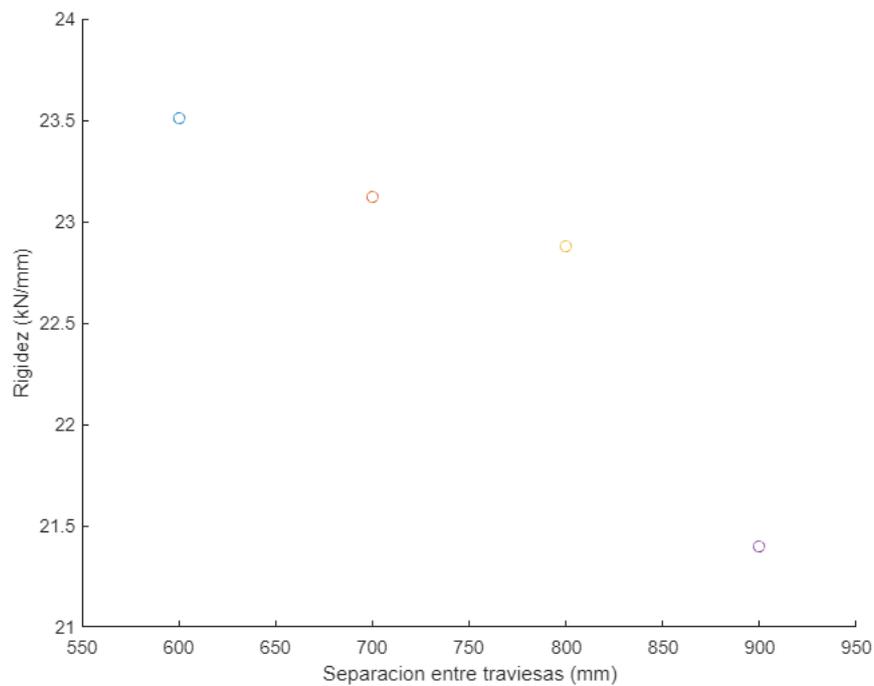
Se repite el proceso para 5 Hz, Figura 66, y para 10 Hz, Figura 67.

**Figura 66.** Influencia de la separación entre traviesas con una frecuencia de 5 Hz en el actuador.



Fuente: Propia.

**Figura 67.** Influencia de la separación entre traviesas con una frecuencia de 10 Hz en el actuador.



Fuente: Propia.

Los datos obtenidos con 5 Hz y 10 Hz muestran nuevamente la misma tendencia, al aumentar la separación entre traviesas se disminuye la rigidez de la vía.

Se confirma por tanto la hipótesis teórica, aumentar la separación entre traviesas, disminuye la rigidez de la vía.

## 5.4 BANDAS EXTENSIOMETRICAS

Se dispone de la medición de 4 bandas extensiométricas. De ellas la más interesante será la banda de cabeza y en ella se centrará el análisis.

En la Tabla 6, vemos los resultados medidos. En este caso también se descartan los valores obtenidos en los ensayos realizados sobre placa de asiento de madera por los motivos comentados con anterioridad.

**Tabla 6.** Resultados Bandas extensiométricas.

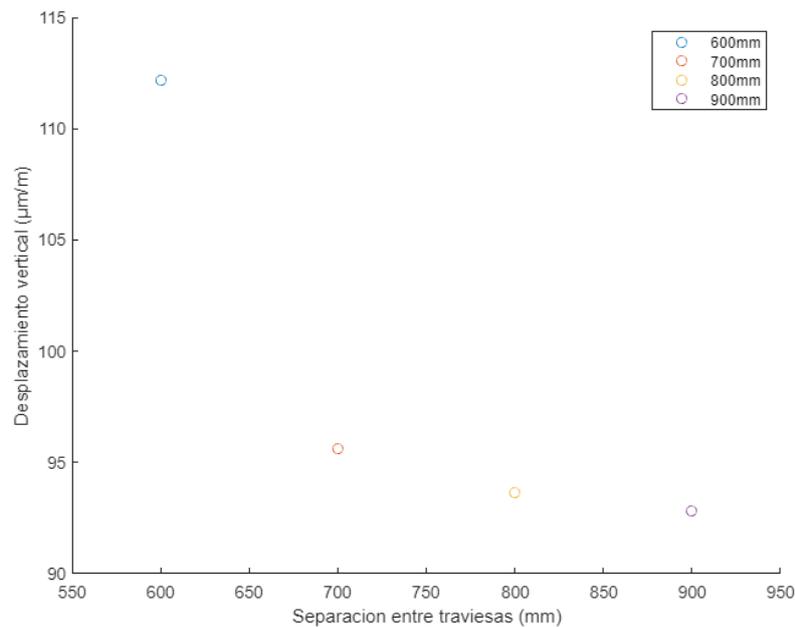
	a0	a1	b1	w	Amplitud	Fase
600mm 2Hz	112.2	-88.28	-58.73	12.56	106.03	0.587
700mm 2Hz	95.63	-35.16	82.46	12.56	89.643	-1.168
800mm 2Hz	93.64	66.69	-64.4	12.56	92.709	-0.768
900mm 2Hz	92.85	86.63	33.61	12.56	92.921	0.3701
600mm 5Hz	104.6	101.8	-22.27	31.41	104.21	-0.215
700mm 5Hz	87.6	-73.46	-49.15	31.41	88.386	0.5897
800mm 5Hz	86.79	-46.59	75.93	31.41	89.084	-1.02
900mm 5Hz	84.67	0.7655	-89.61	31.41	89.613	-1.562
600mm 10Hz	94.43	68.56	78.9	62.81	104.53	0.8554
700mm 10Hz	82.19	64.76	58.58	62.81	87.324	0.7353
800mm 10Hz	79.63	66.65	76.9	62.81	101.76	0.8567
900mm 10Hz	80.76	66.65	76.9	62.81	101.76	0.8567

*Fuente: Propia.*

a0 se corresponde con el desplazamiento vertical, y será la medición más interesante de las obtenidas tras realizar el ajuste de Fourier.

En primer lugar, si se mantiene la frecuencia constante, se observa una tendencia a disminuir el desplazamiento cuando aumenta la separación entre traviesas, como se ve en la Figura 68.

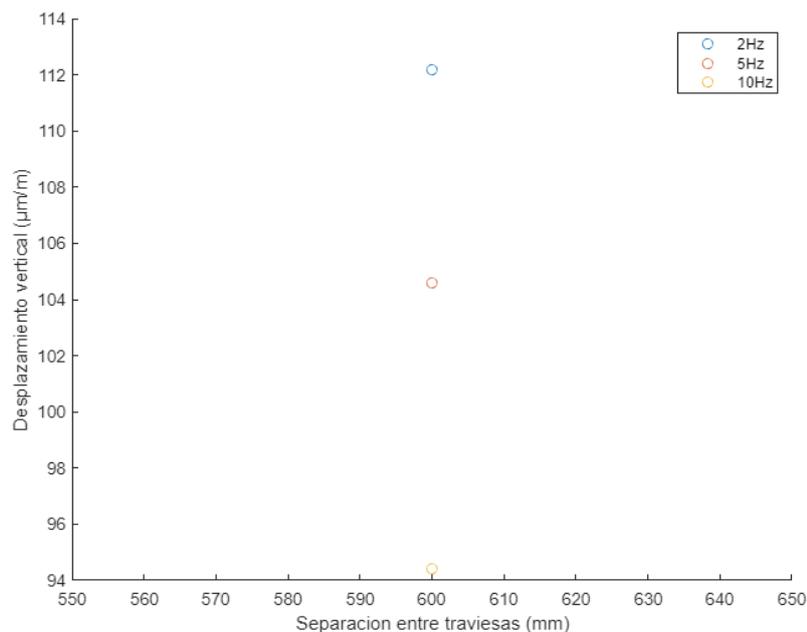
**Figura 68.** Influencia de la separación entre traviesas con una frecuencia de 2 Hz en el desplazamiento vertical del carril.



*Fuente: Propia.*

En segundo lugar, si se mantiene la separación entre traviesas constante, se observa también una tendencia a disminuir el desplazamiento cuando se aumenta la frecuencia de ensayo, como se ve en la Figura 69.

**Figura 69.** Influencia de la frecuencia con una separación entre traviesas de 600mm en el desplazamiento vertical del carril.



*Fuente: Propia.*

## 6. PRESUPUESTO

En este apartado se calcula el precio estimado de los 32 ensayos realizados durante el estudio. Para el precio de los materiales y el ensayo se ha tomado como referencia la tabla de precios del laboratorio.

**Tabla 7.** Gasto en materiales.

<b>MATERIALES</b>			
<b>DESCRIPCION</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>CANTIDAD UTILIZADA</b>	<b>PRECIO TOTAL</b>
Carril UIC-60	500€/unidad	1 unidad	500€
Traviesa (incluye corte)	500€/unidad	4 unidades	2000€
Elementos de sujeción y soporte	100€/conjunto	8 conjuntos	800€
<b>TOTAL</b>		<b>3300€</b>	

**Tabla 8.** Gasto en ensayos.

<b>ENSAYOS</b>			
<b>DESCRIPCION</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>CANTIDAD UTILIZADA</b>	<b>PRECIO TOTAL</b>
Mano de obra	20€/hora	96 horas	1920€
Material de medición y toma de datos	50€/ensayo	32 ensayos	1600€
Maquinaria	200€/ensayo	32 ensayos	6400€
Mantenimiento y reparaciones	20€/ensayo	32 ensayos	640€
<b>TOTAL</b>		<b>10560€</b>	

**Tabla 9.** Gasto en ingeniería.

<b>INGENIERIA</b>			
<b>DESCRIPCION</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>CANTIDAD UTILIZADA</b>	<b>PRECIO TOTAL</b>
Elaboración de documentación	50€/hora	10 horas	500€
Análisis de datos	50€/hora	30 horas	1500€
<b>TOTAL</b>		<b>2000€</b>	

**Tabla 10.** Gasto total.

<b>PRESUPUESTO FINAL</b>	
Gasto en materiales	3300€
Gasto en ensayos	10560€
Gasto en ingeniería	2000€
<b>TOTAL</b>	<b>15860€</b>

## **7. CONCLUSIONES**

Este trabajo detalla la importancia de la separación entre las traviesas en el ámbito ferroviario. Al mismo tiempo, repasa los aspectos más importantes que se deben tener en cuenta a la hora de analizar la distancia entre traviesas desde el punto de vista económico, técnico y estructural. También se consideran aspectos relevantes en el diseño de vías férreas para aumentar la separación entre traviesas.

De la revisión del estado de la técnica, una conclusión importante es que la distancia entre traviesas se puede aumentar más allá de 0.6 metros. Conclusión que se ve confirmada por los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados, donde se ha observado que aumentar la separación entre traviesas un 50% apenas modifica los desplazamientos verticales de las traviesas en un 5% y el desplazamiento del actuador en un 10%. Estudios posteriores pueden encontrar distancias óptimas dependiendo de las condiciones de servicio y el tipo de tren que circule por la vía, con el objetivo de lograr un ahorro económico en la construcción y el mantenimiento de la infraestructura.

A futuro sería recomendable afrontar de forma gradual el problema para encontrar la distancia óptima entre traviesas en cumplimiento de la seguridad, la operación y la resistencia mecánica de la vía a corto, mediano y largo plazo, desde el punto de vista dinámico y estático. Se recomienda realizar análisis de vibraciones, así como un análisis de desgaste de los diferentes elementos que compone la superestructura para tener un mejor conocimiento sobre el rendimiento de la vía en diferentes configuraciones de separación entre traviesas.

## **7. BIBLIOGRAFIA**

The importance of sleepers spacing in railways, Roberto Sañudo Ortega, Joao Pombo, Stefano Ricci y Marina Miranda, 2001.

Effect of sleeper size on ballasted track settlement, A. Namura, Y. Kohata, S. Miura, 2004.

Behaviour of train–track interaction in stiffness transitions, M. Banimahd, P.K. Woodward, J. Kennedy, G.M. Medero, 2012.

Transition of railroad bridge approaches, D. Li, D. Davis, 2005.

Investigation on the accuracy of the current practices in analysis of railway track concrete sleepers, J.M. Sadeghi, 2005.

Railway track design: a review of current practice, N.F. Doyle, 1980.

Effect of sleeper distance on rail corrugation, E.G. Vadillo, J. Tárrago, G.G. Zubiaurre, C.A. Duque, 1998

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos C y P. Ferrocarriles: apuntes de clase, J.M.G.D. de Villegas, 1993

Tratado de ferrocarriles, Oliveros Rives F, López Pita A, Meía Puente J. , 1977.

Manual de vía, Lichtberger B, 2011.

Railroad tie spacing related to wheel-load distribution and ballast pressure, N. Hasan, 2015.

Modern Railway Track, 2nd Editon, C.Esveld, 2001.

Jane's World Railways, J.C. Spsychalski, 1996–97.

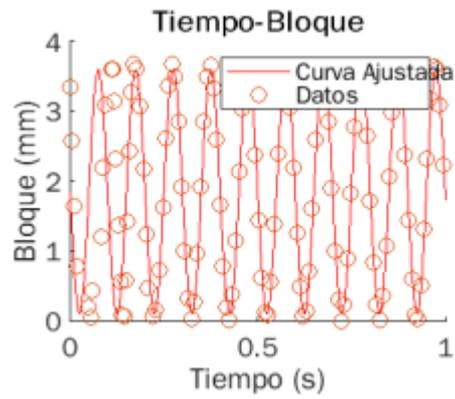
Influence of the operational conditions on static and dynamic stiffness of rail pads, A.Sainz-Aja, Isidro A.Carrascal, Diego Ferreño, Joao Pombo, Jose A.Casado, Soraya Diego, 2020.

Sleeper spacing optimization for vibration reduction in rails, S. Batjargal, K. Abe, K. Koro, 2012.

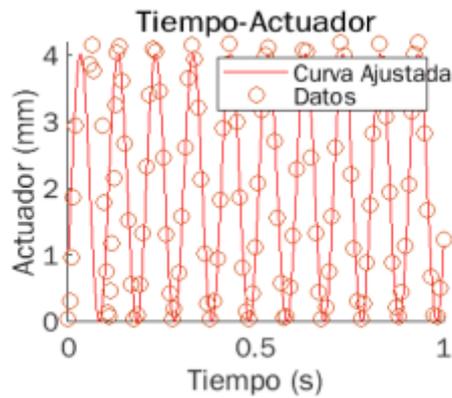
Study on the Urban Rail Transit Sleeper Spacing Considering Vehicle System, Y. Zou, Y. Wen, Q. Sun, 2019

## 8. ANEXO

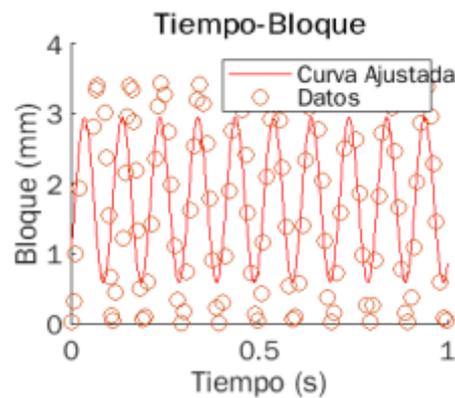
Gráfica 1. PC-1 10Hz Manta 900mm.



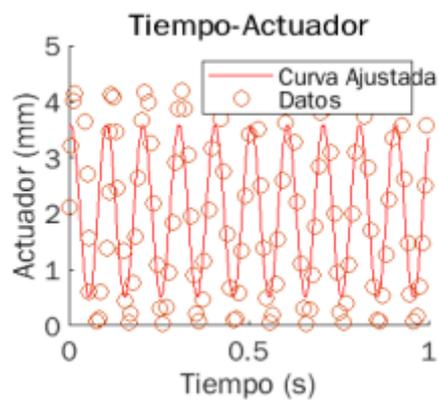
Gráfica 2. PC-2 10Hz Manta 900mm.



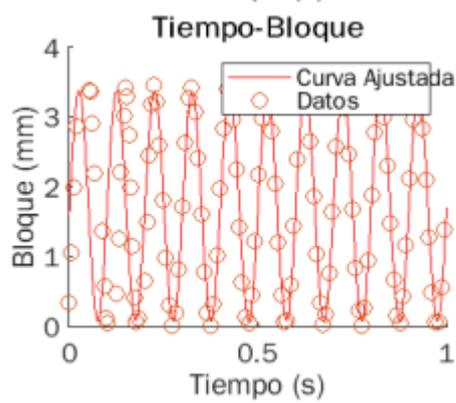
Gráfica 3. PC-1 10Hz Manta 800mm.



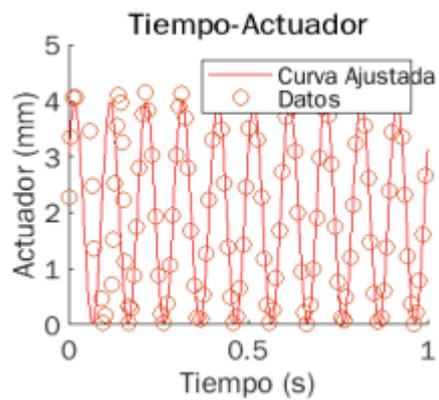
**Gráfica 4.** PC-2 10Hz Manta 800mm.



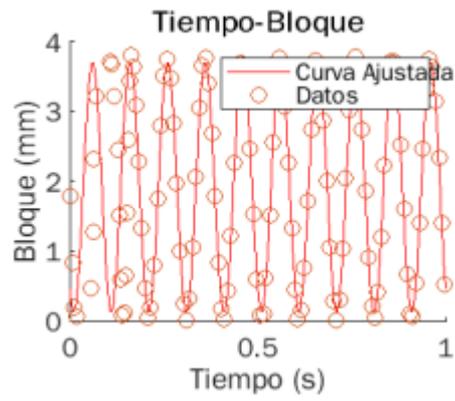
**Gráfica 5.** PC-1 10Hz Manta 700mm.



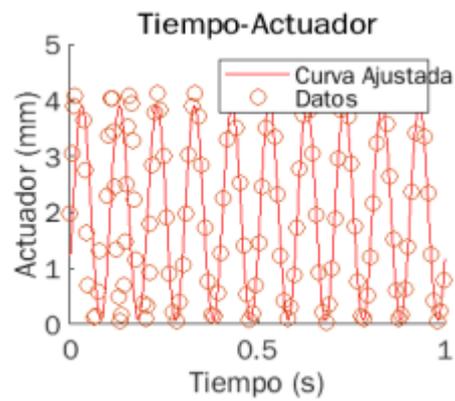
**Gráfica 6.** PC-2 10Hz Manta 700mm.



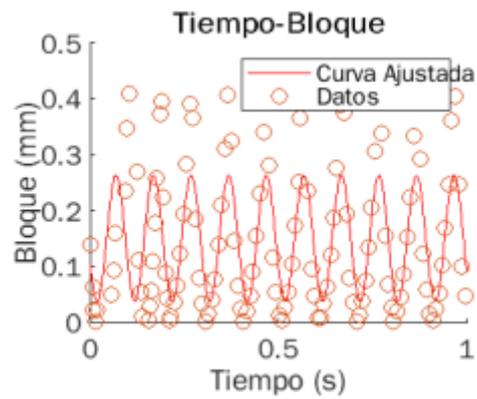
**Gráfica 7.** PC-1 10Hz Manta 600mm.



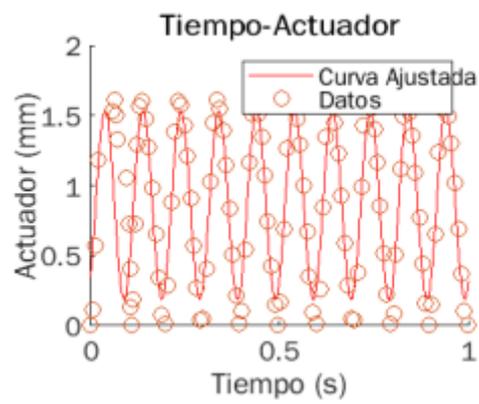
**Gráfica 8.** PC-2 10Hz Manta 600mm.



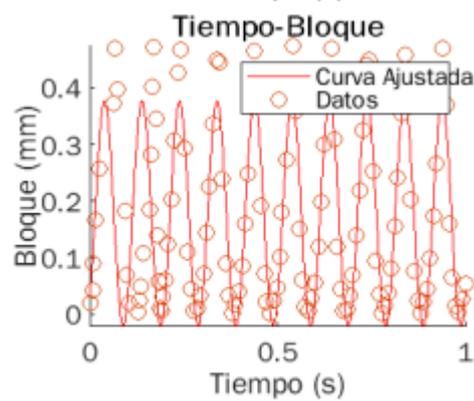
**Gráfica 9.** PC-1 10Hz Madera 900mm.



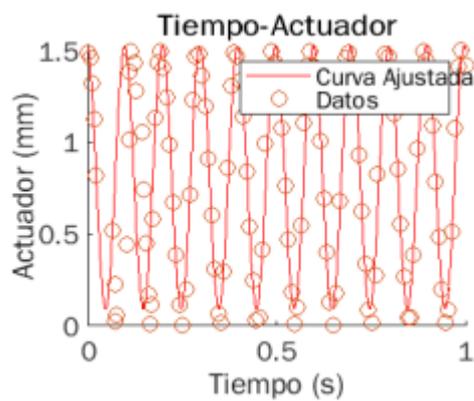
**Gráfica 10.** PC-2 10Hz Madera 900mm.



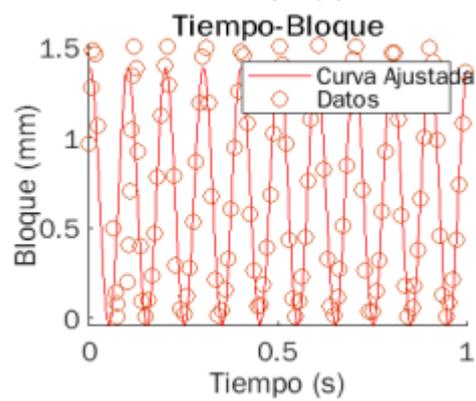
**Gráfica 11.** PC-1 10Hz Madera 800mm.



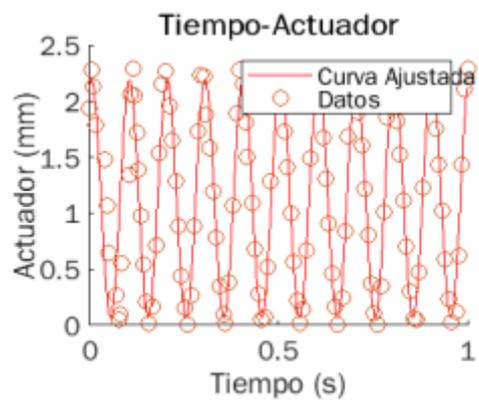
**Gráfica 12.** PC-2 10Hz Madera 800mm.



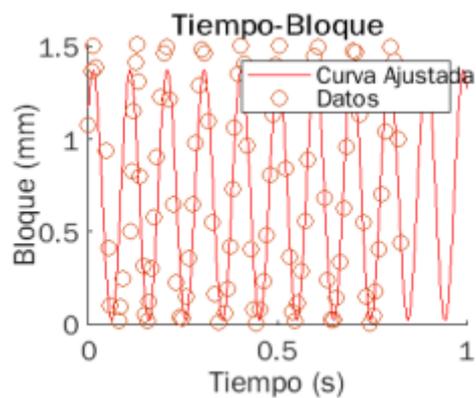
**Gráfica 13.** PC-1 10Hz Madera 700mm.



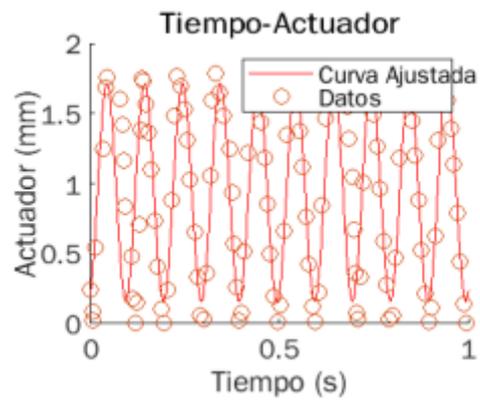
**Gráfica 14.** PC-2 10Hz Madera 700mm.



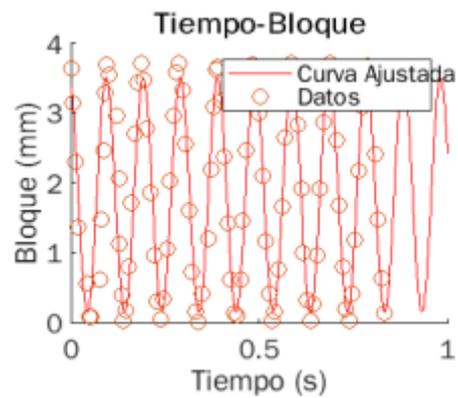
**Gráfica 15.** PC-1 10Hz Madera 600mm.



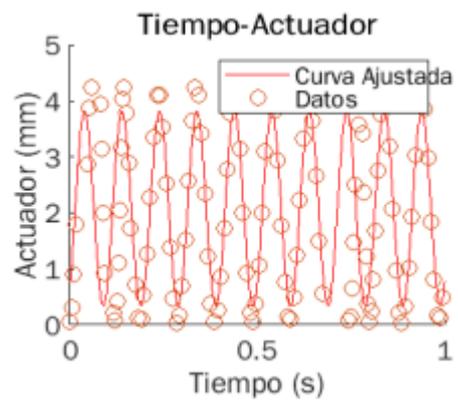
**Gráfica 16.** PC-2 10Hz Madera 600mm.



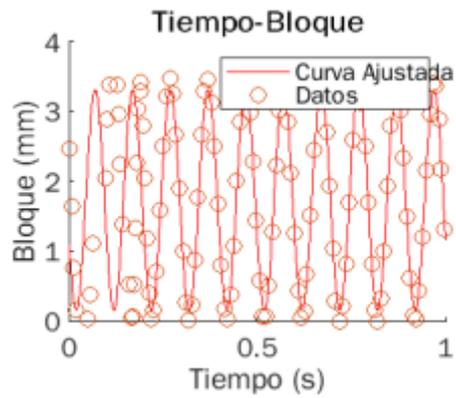
**Gráfica 17.** PC-1 10Hz Manta 900mm Ensayo 2.



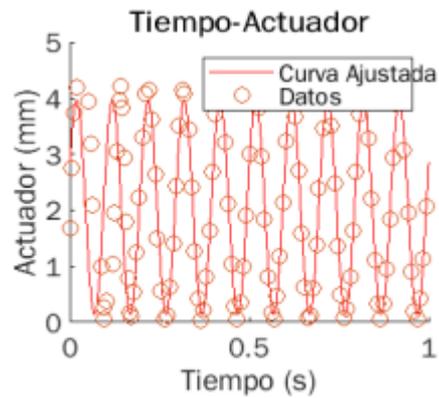
**Gráfica 18.** PC-2 10Hz Manta 900mm Ensayo 2.



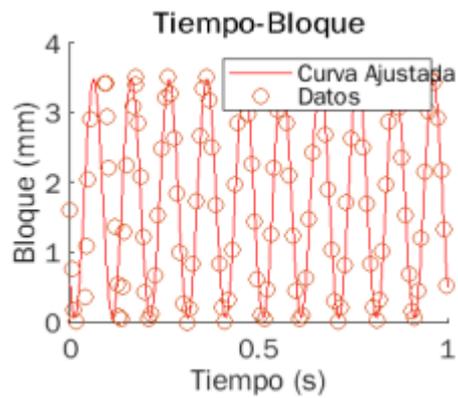
**Gráfica 19.** PC-1 10Hz Manta 800mm Ensayo 2.



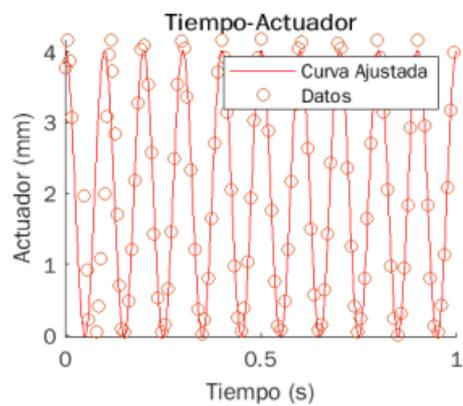
**Gráfica 20.** PC-2 10Hz Manta 800mm Ensayo.



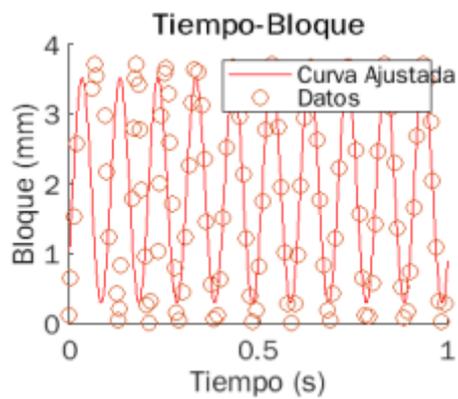
**Gráfica 21.** PC-1 10Hz Manta 700mm Ensayo 2.



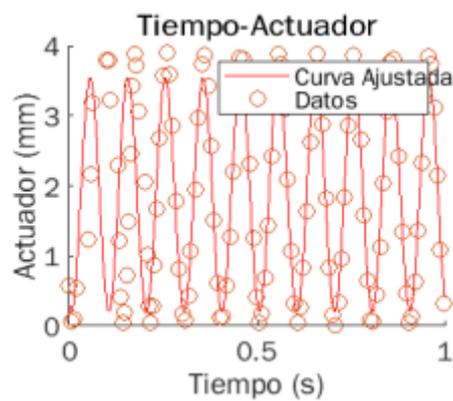
**Gráfica 22.** PC-2 10Hz Manta 700mm Ensayo 2.



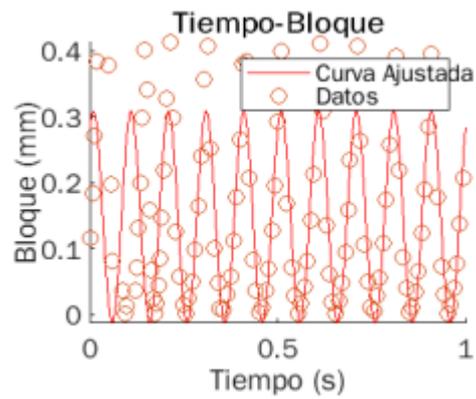
**Gráfica 23.** PC-1 10Hz Manta 600mm Ensayo 2.



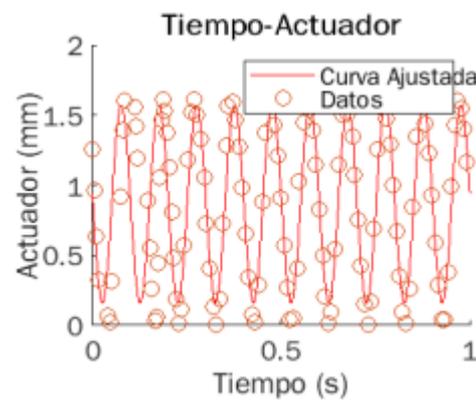
**Gráfica 24.** PC-2 10Hz Manta 600mm Ensayo 2.



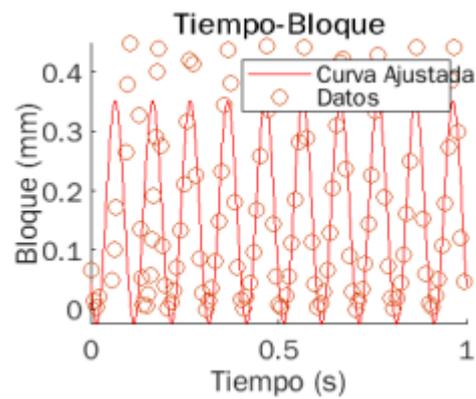
**Gráfica 25.** PC-1 10Hz Madera 900mm Ensayo 2.



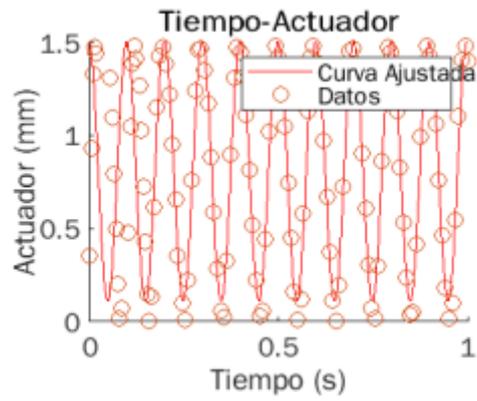
**Gráfica 26.** PC-2 10Hz Madera 900mm Ensayo 2.



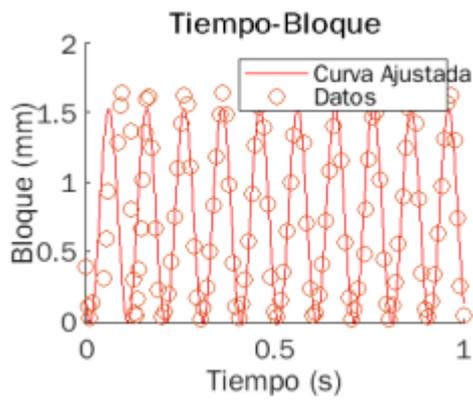
**Gráfica 27.** PC-1 10Hz Madera 800mm Ensayo 2.



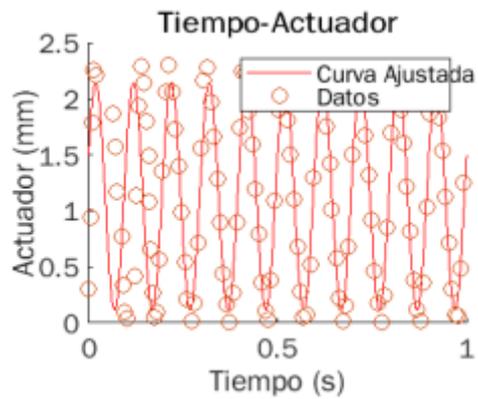
**Gráfica 28.** PC-2 10Hz Madera 800mm Ensayo 2.



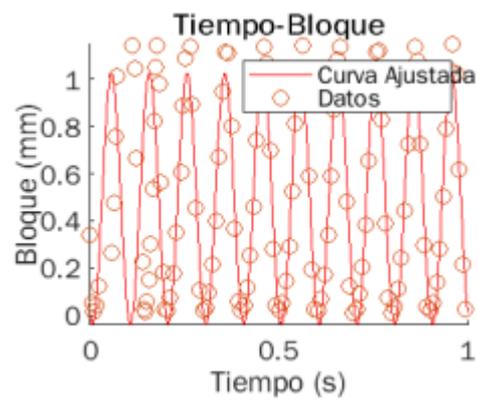
**Gráfica 29.** PC-1 10Hz Madera 700mm Ensayo 2.



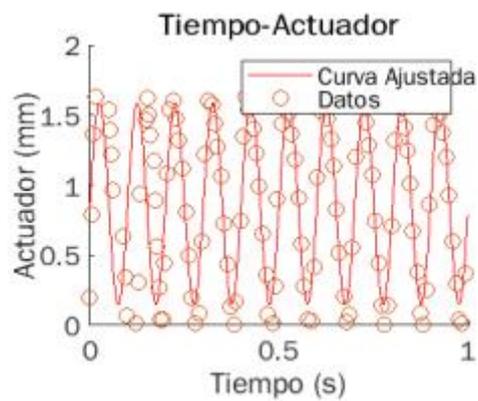
**Gráfica 30.** PC-2 10Hz Madera 700mm Ensayo 2.



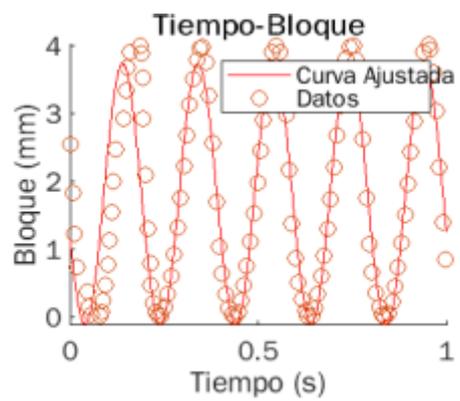
**Gráfica 31.** PC-1 10Hz Madera 600mm Ensayo 2.



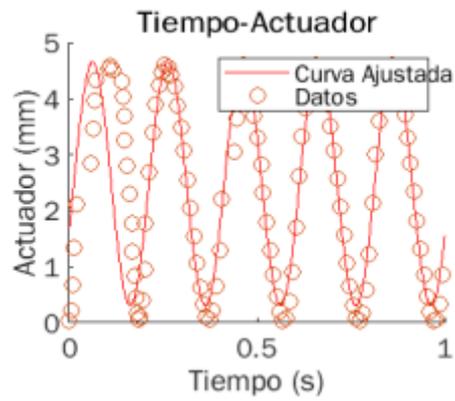
**Gráfica 32.** PC-2 10Hz Madera 600mm Ensayo 2.



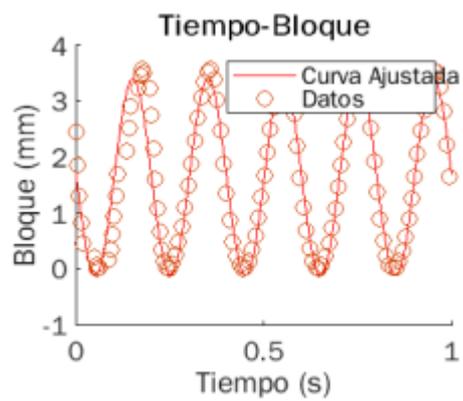
**Gráfica 33.** PC-1 5Hz Manta 900mm.



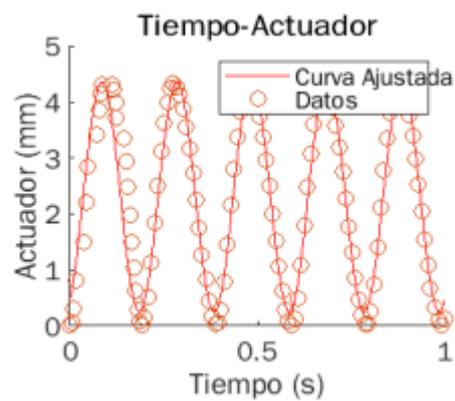
**Gráfica 34.** PC-2 5Hz Manta 900mm.



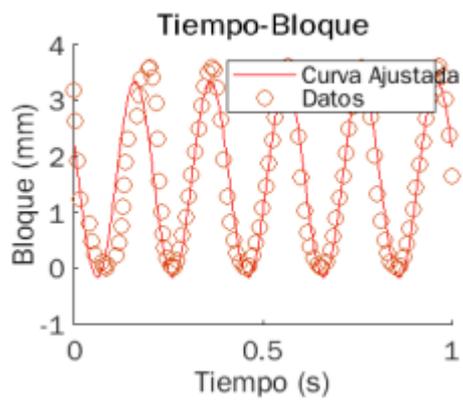
**Gráfica 35.** PC-1 5Hz Manta 800mm.



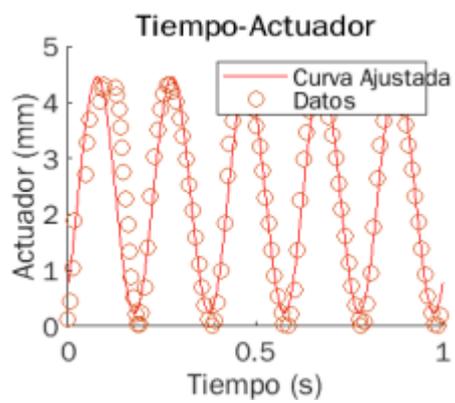
**Gráfica 36.** PC-2 5Hz Manta 800mm.



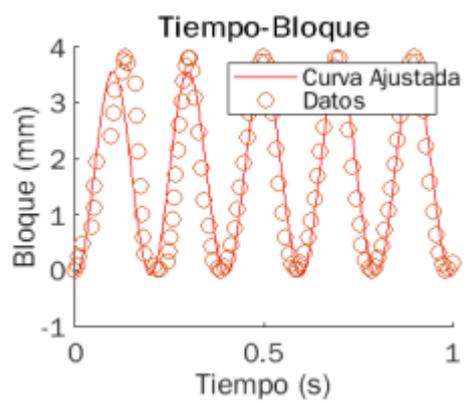
**Gráfica 37.** PC-1 5Hz Manta 700mm.



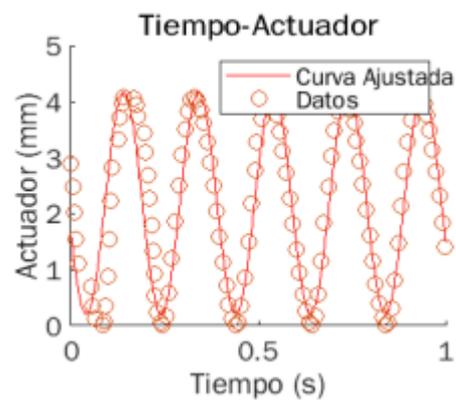
**Gráfica 38.** PC-2 5Hz Manta 700mm.



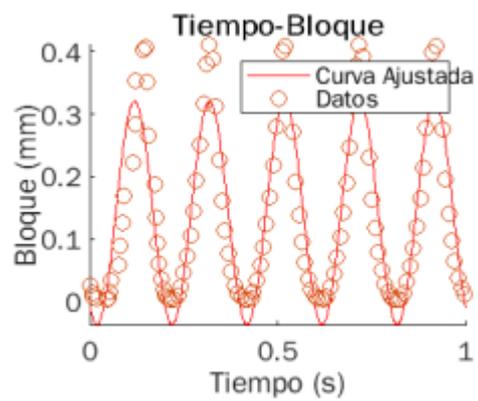
**Gráfica 39.** PC-1 5Hz Manta 600mm.



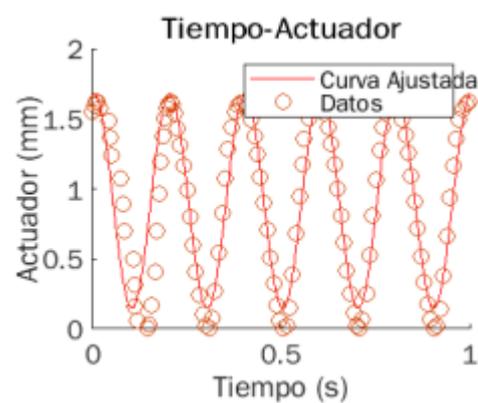
**Gráfica 40.** PC-2 5Hz Manta 600mm.



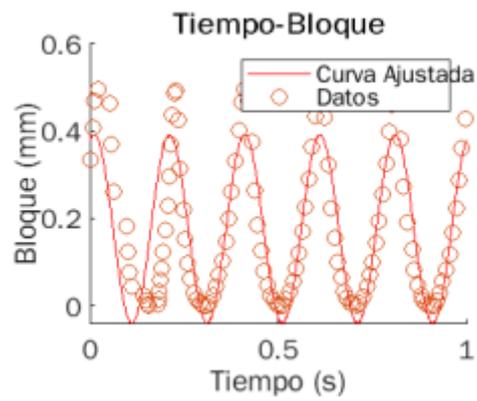
**Gráfica 41.** PC-1 5Hz Madera 900mm.



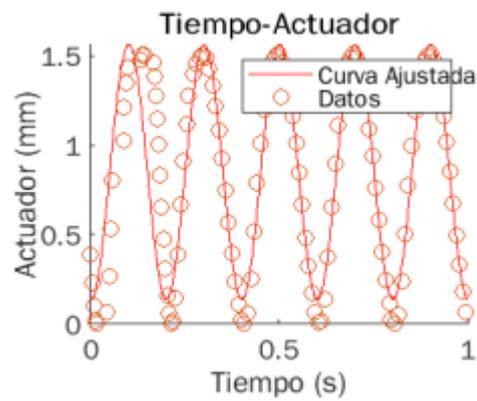
**Gráfica 42.** PC-2 5Hz Madera 900mm.



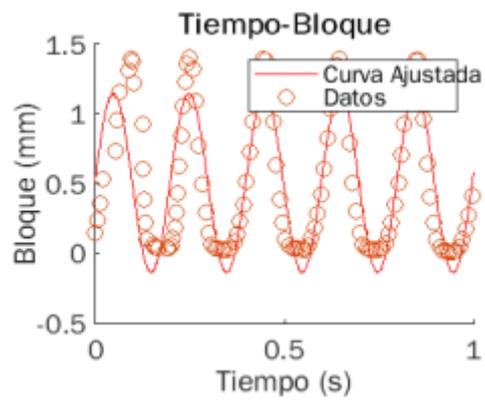
**Gráfica 43.** PC-1 5Hz Madera 800mm.



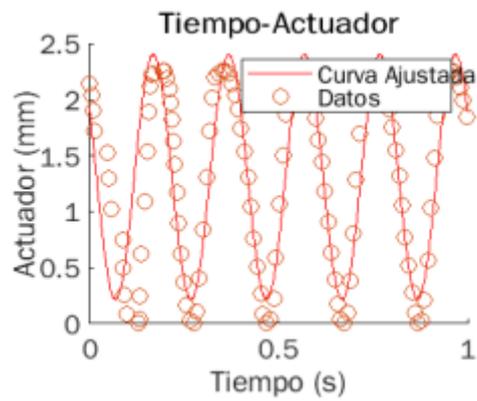
**Gráfica 44.** PC-2 5Hz Madera 800mm.



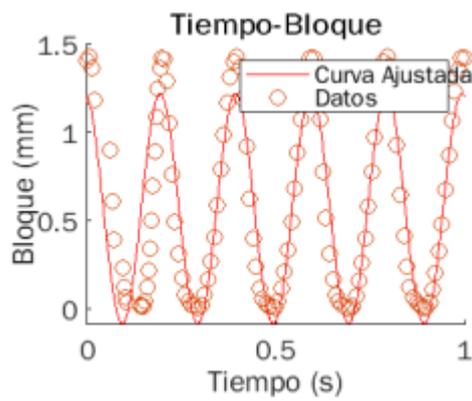
**Gráfica 45.** PC-1 5Hz Madera 700mm.



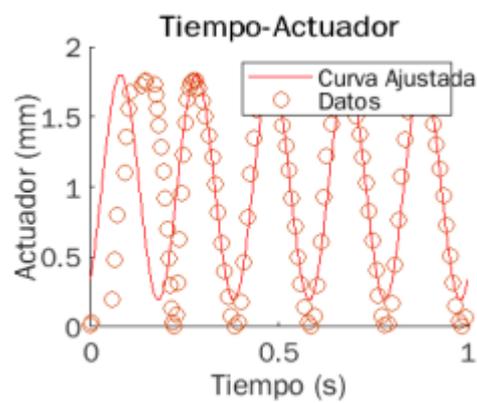
**Gráfica 46.** PC-2 5Hz Madera 700mm.



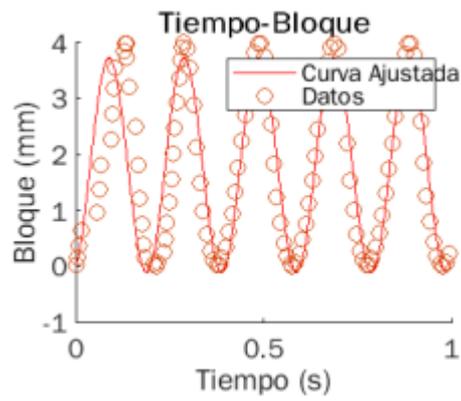
**Gráfica 47.** PC-1 5Hz Madera 600mm.



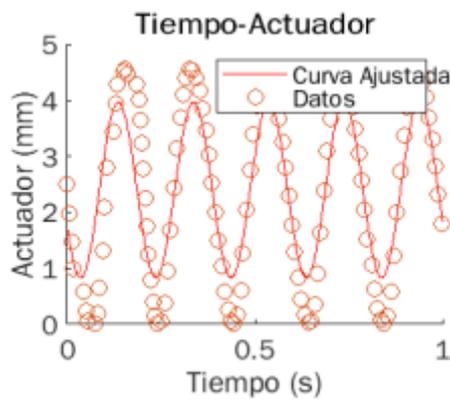
**Gráfica 48.** PC-2 5Hz Madera 600mm.



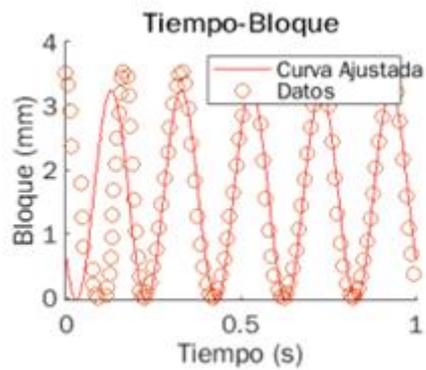
**Gráfica 49.** PC-1 5Hz Manta 900mm Ensayo 2.



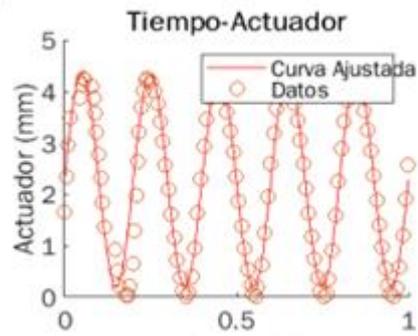
**Gráfica 50.** PC-2 5Hz Manta 900mm Ensayo 2.



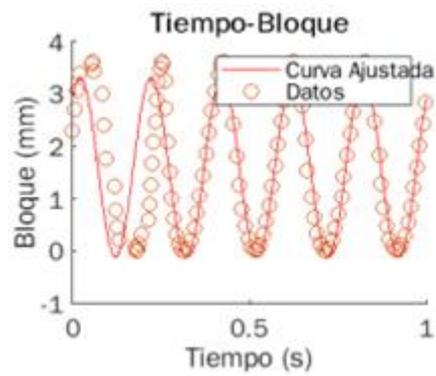
**Gráfica 51.** PC-1 5Hz Manta 800mm Ensayo 2.



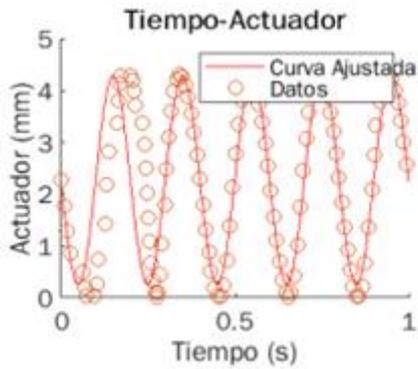
**Gráfica 52.** PC-2 5Hz Manta 800mm Ensayo 2.



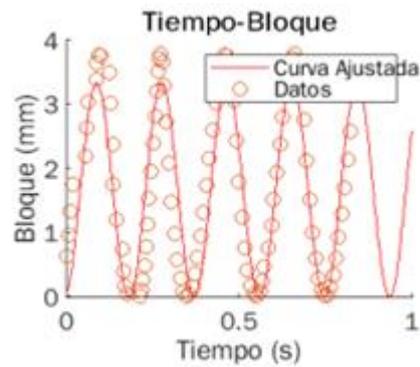
**Gráfica 53.** PC-1 5Hz Manta 700mm Ensayo 2.



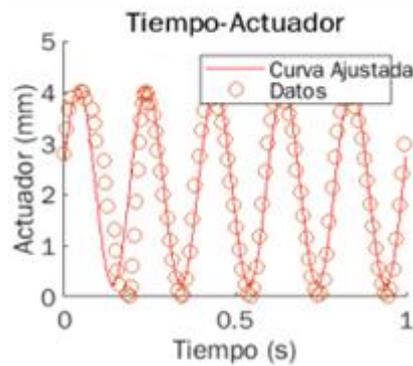
**Gráfica 54.** PC-2 5Hz Manta 700mm Ensayo 2.



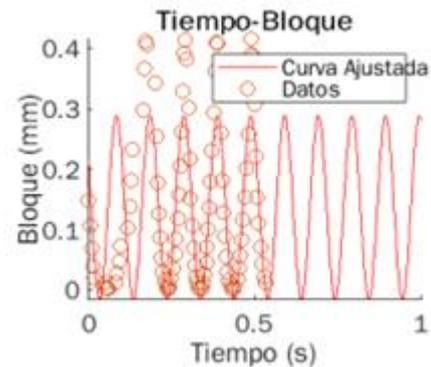
**Gráfica 55.** PC-1 5Hz Manta 600mm Ensayo 2.



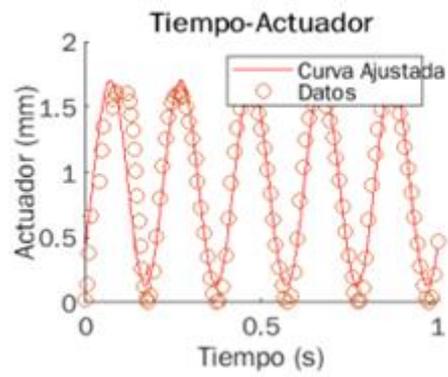
**Gráfica 56.** PC-2 5Hz Manta 600mm Ensayo 2.



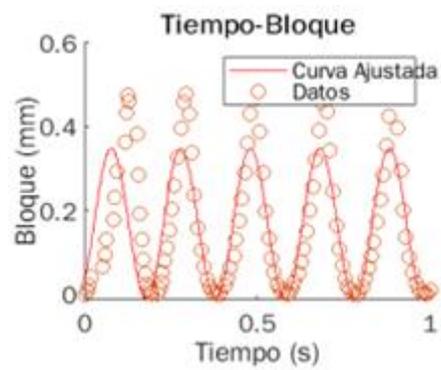
**Gráfica 57.** PC-1 5Hz Madera 900mm Ensayo 2.



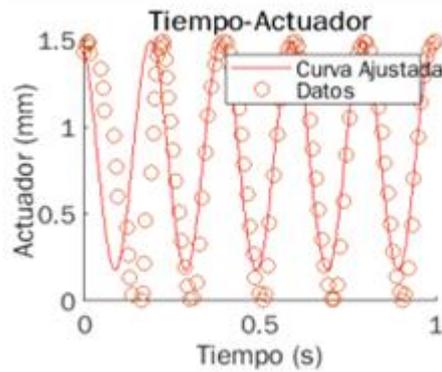
**Gráfica 58.** PC-2 5Hz Madera 900mm Ensayo 2.



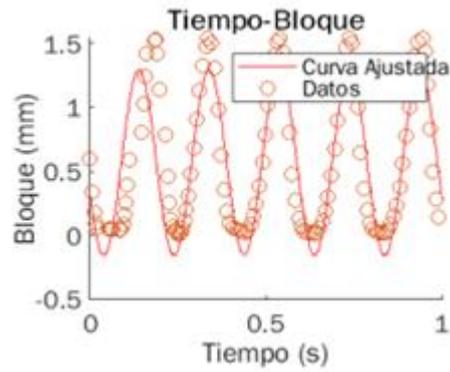
**Gráfica 59.** PC-1 5Hz Madera 800mm Ensayo 2.



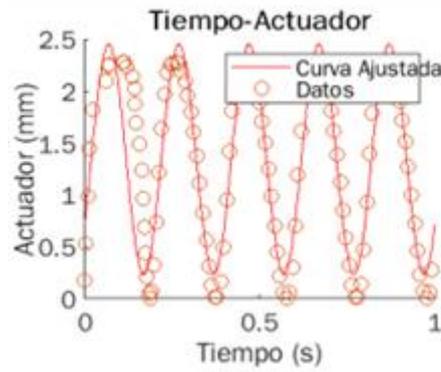
**Gráfica 60.** PC-2 5Hz Madera 800mm Ensayo 2.



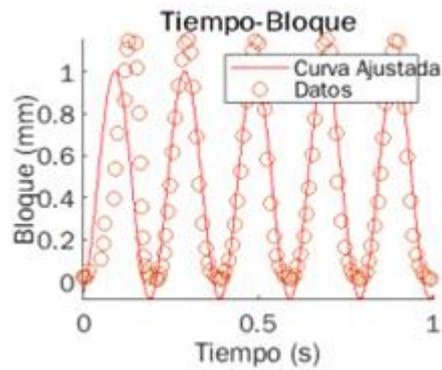
**Gráfica 61.** PC-1 5Hz Madera 700mm Ensayo 2.



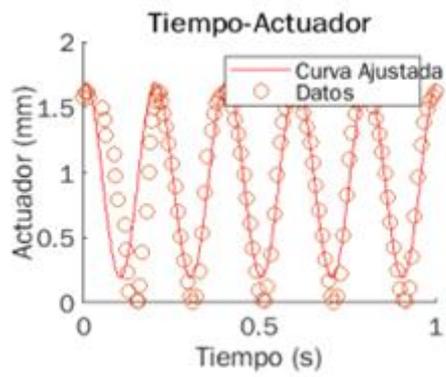
**Gráfica 62.** PC-2 5Hz Madera 700mm Ensayo 2.



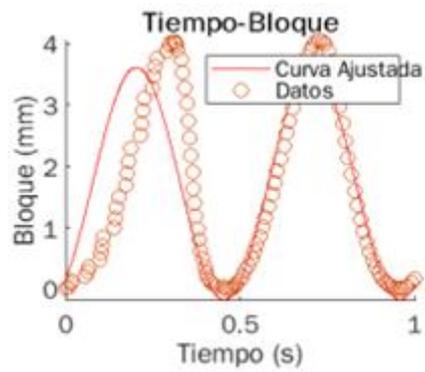
**Gráfica 63.** PC-1 5Hz Madera 600mm Ensayo 2.



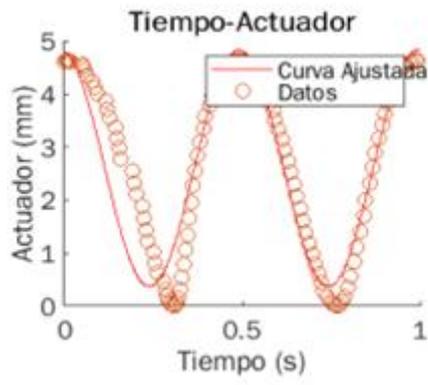
**Gráfica 64.** PC-2 5Hz Madera 600mm Ensayo 2.



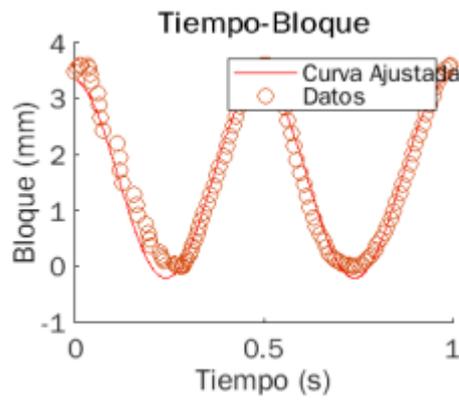
**Gráfica 65.** PC-1 2Hz Manta 900mm.



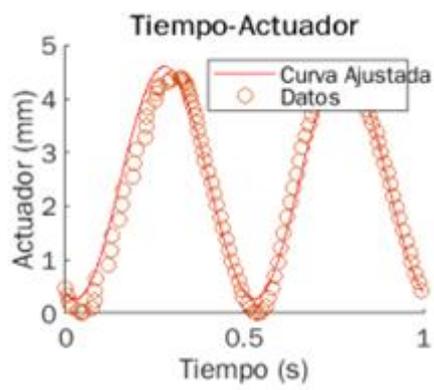
**Gráfica 66.** PC-2 2Hz Manta 900mm.



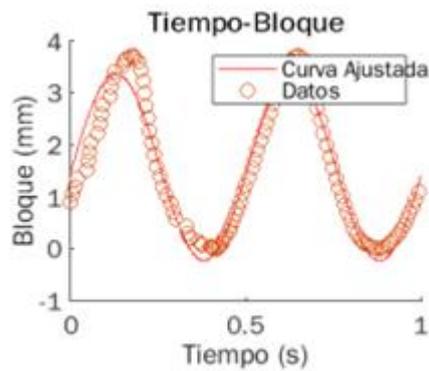
**Gráfica 67.** PC-1 2Hz Manta 800mm.



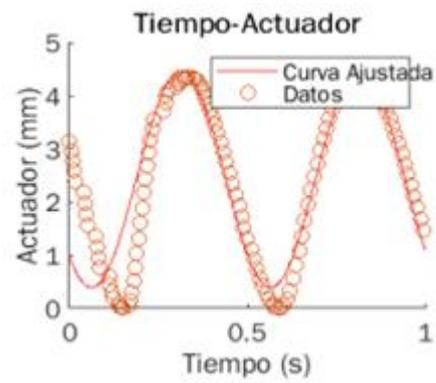
**Gráfica 68.** PC-2 2Hz Manta 800mm.



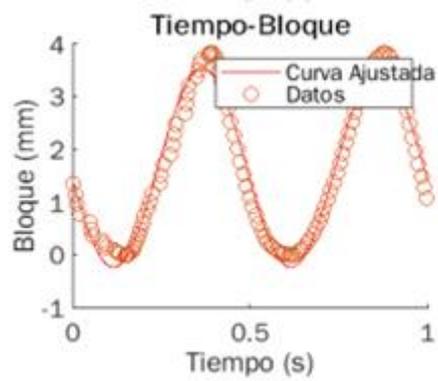
**Gráfica 69.** PC-1 2Hz Manta 700mm.



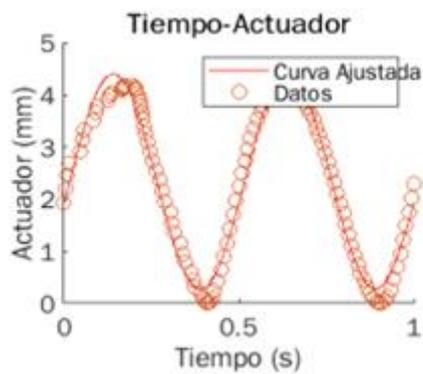
**Gráfica 70.** PC-2 2Hz Manta 700mm.



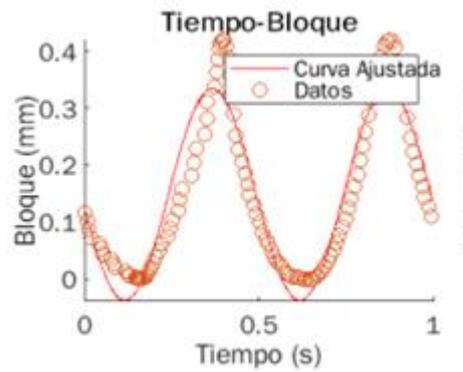
**Gráfica 71.** PC-1 2Hz Manta 600mm.



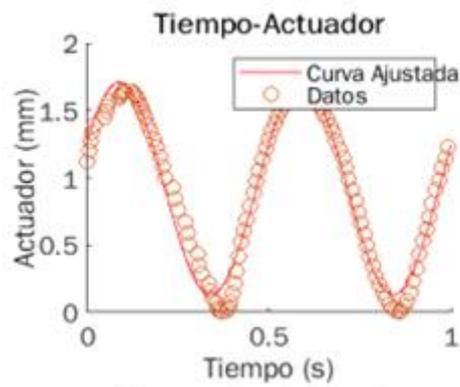
**Gráfica 72.** PC-2 2Hz Manta 600mm.



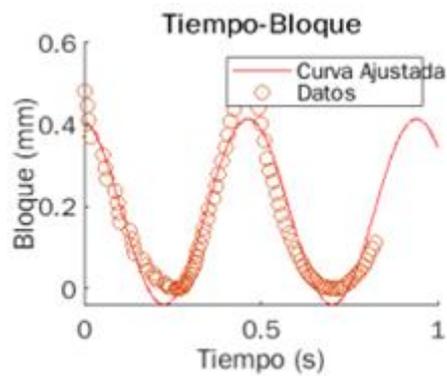
**Gráfica 73.** PC-1 2Hz Madera 900mm.



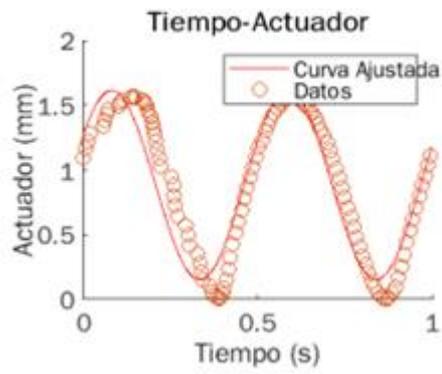
**Gráfica 74.** PC-2 2Hz Madera 900mm.



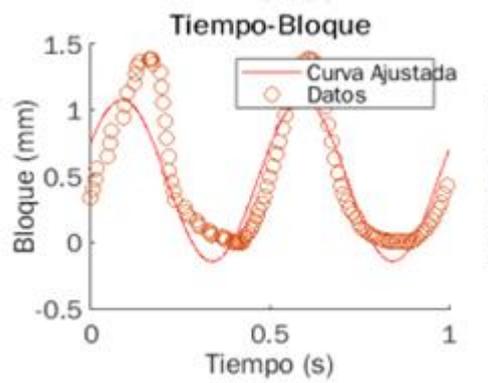
**Gráfica 75.** PC-1 2Hz Madera 800mm.



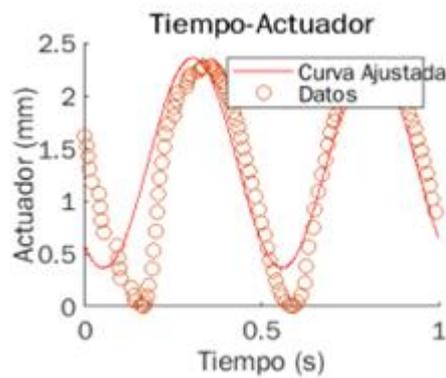
**Gráfica 76.** PC-2 2Hz Madera 800mm.



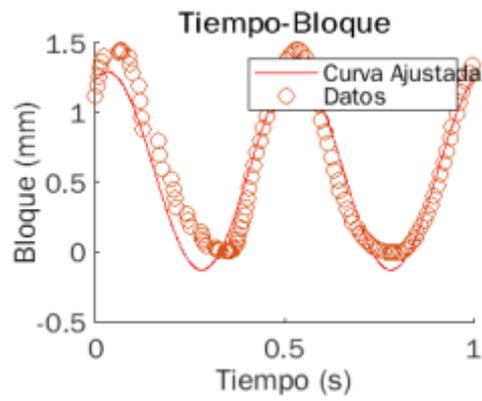
**Gráfica 77.** PC-1 2Hz Madera 700mm.



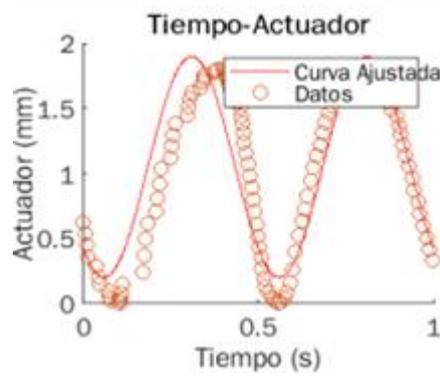
**Gráfica 78.** PC-2 2Hz Madera 700mm.



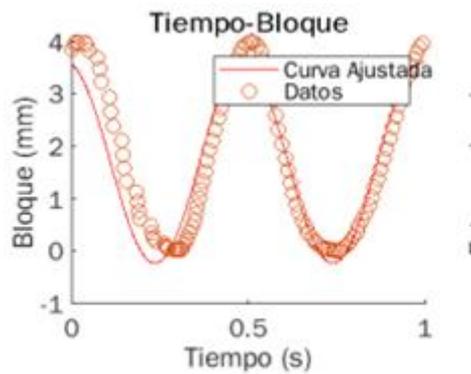
**Gráfica 79.** PC-1 2Hz Madera 600mm.



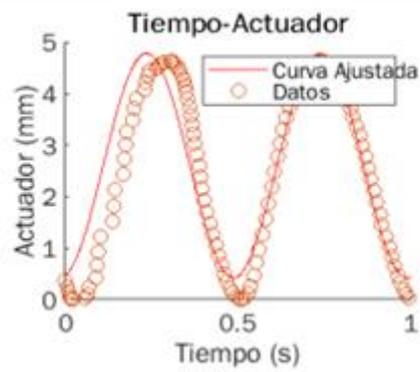
**Gráfica 80.** PC-2 2Hz Madera 600mm.



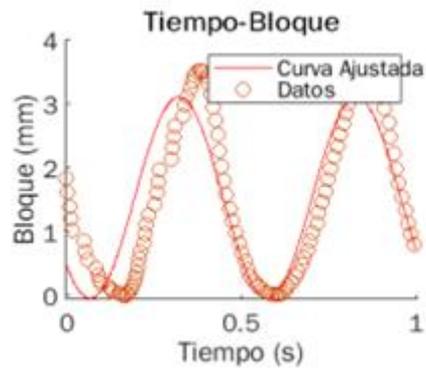
**Gráfica 81.** PC-1 2Hz Manta 900mm Ensayo 2.



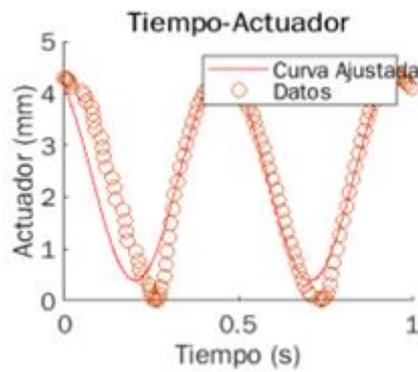
**Gráfica 82.** PC-2 2Hz Manta 900mm Ensayo 2.



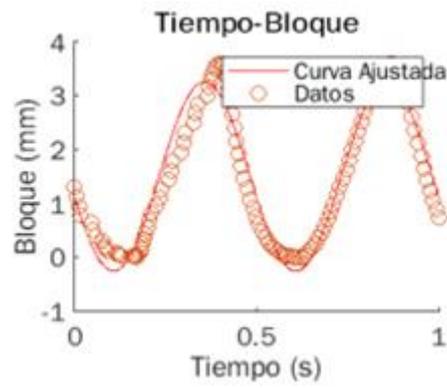
**Gráfica 83.** PC-1 2Hz Manta 800mm Ensayo 2.



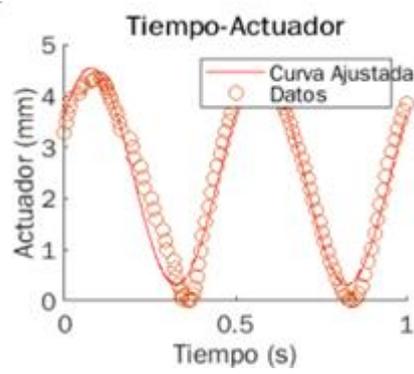
**Gráfica 84.** PC-2 2Hz Manta 800mm Ensayo 2.



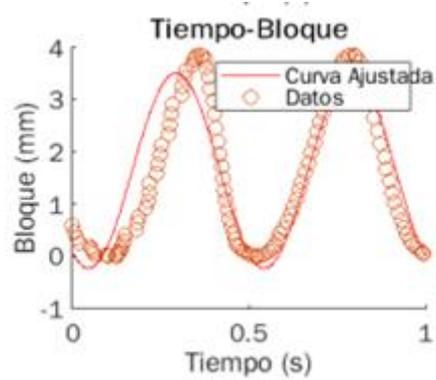
**Gráfica 85.** PC-1 2Hz Manta 700mm Ensayo 2.



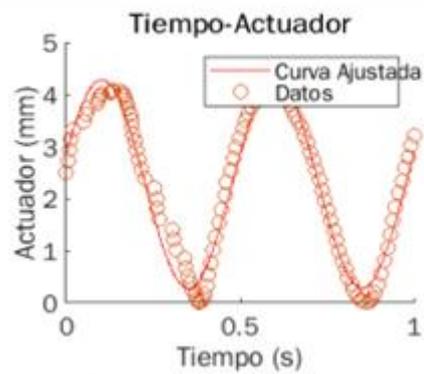
**Gráfica 86.** PC-2 2Hz Manta 700mm Ensayo 2.



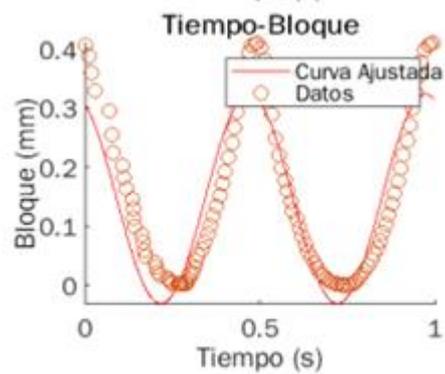
**Gráfica 87.** PC-1 2Hz Manta 600mm Ensayo 2.



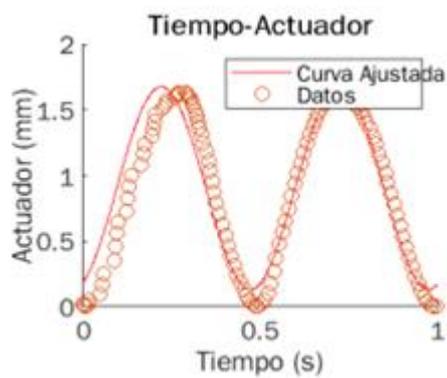
**Gráfica 88.** PC-2 2Hz Manta 600mm Ensayo 2.



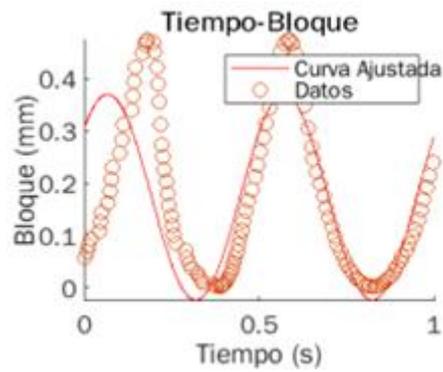
**Gráfica 89.** PC-1 2Hz Madera 900mm Ensayo 2.



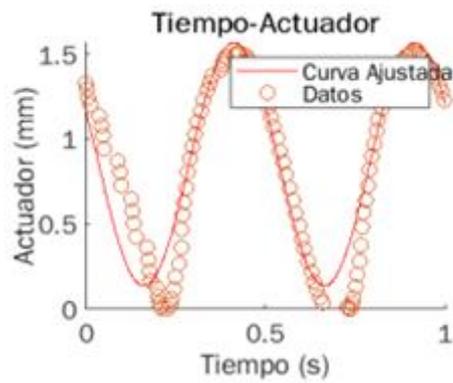
**Gráfica 90.** PC-2 2Hz Madera 900mm Ensayo 2.



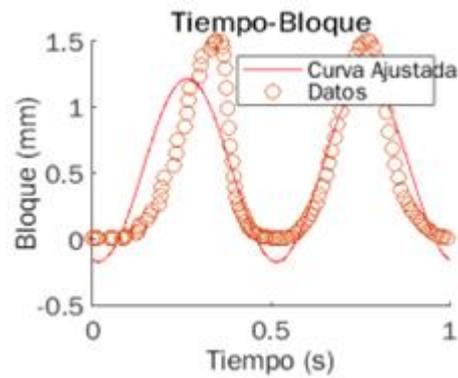
**Gráfica 91.** PC-1 2Hz Madera 800mm Ensayo 2.



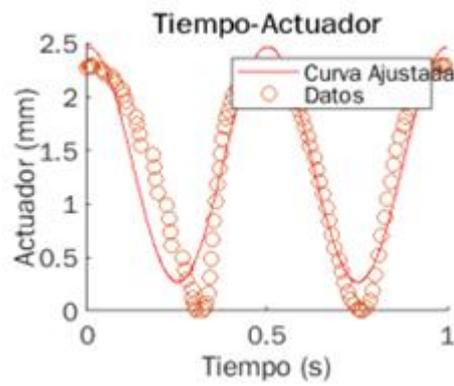
**Gráfica 92.** PC-2 2Hz Madera 800mm Ensayo 2.



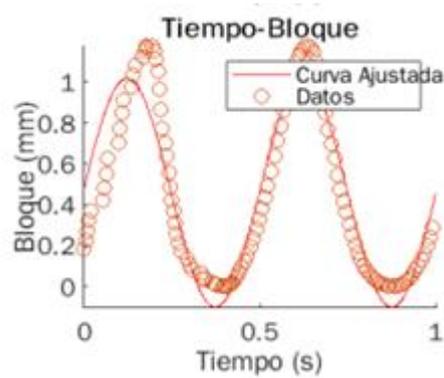
**Gráfica 93.** PC-1 2Hz Madera 700mm Ensayo 2.



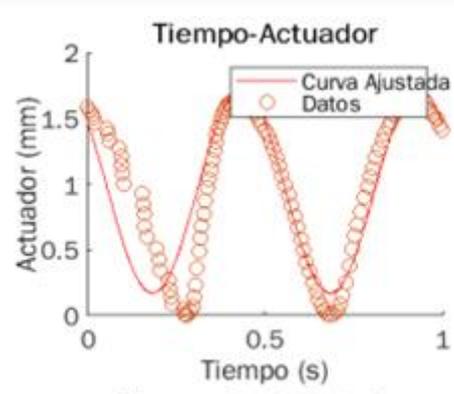
**Gráfica 94.** PC-2 2Hz Madera 700mm Ensayo 2.



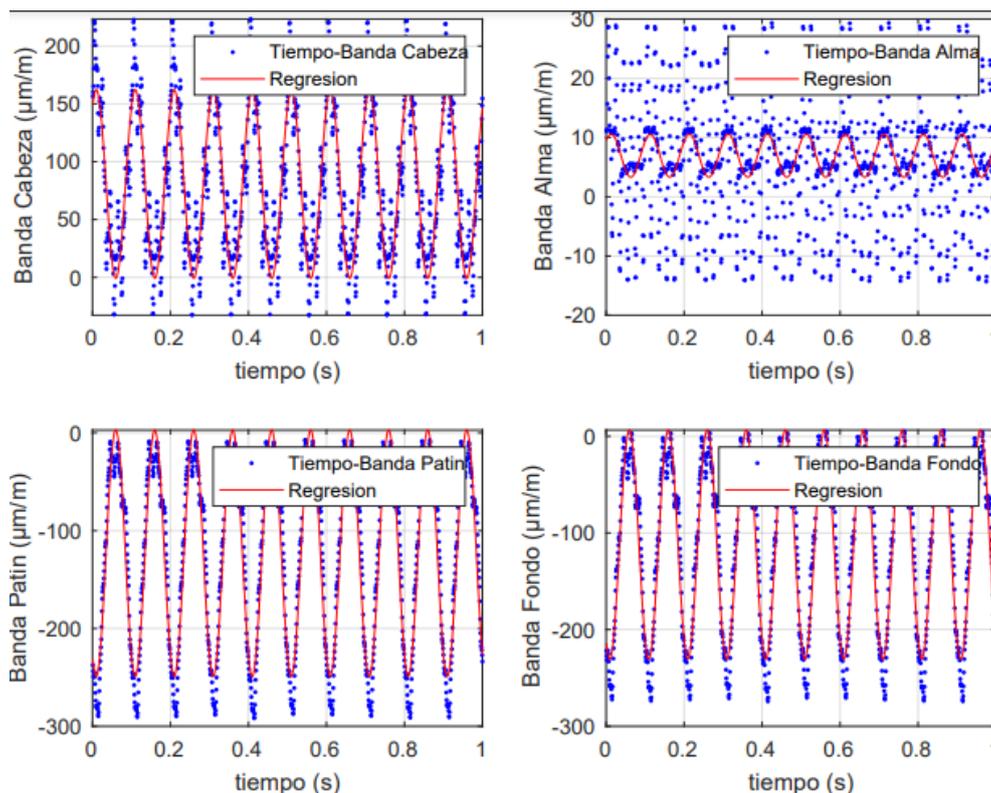
**Gráfica 95.** PC-1 2Hz Madera 600mm Ensayo 2.



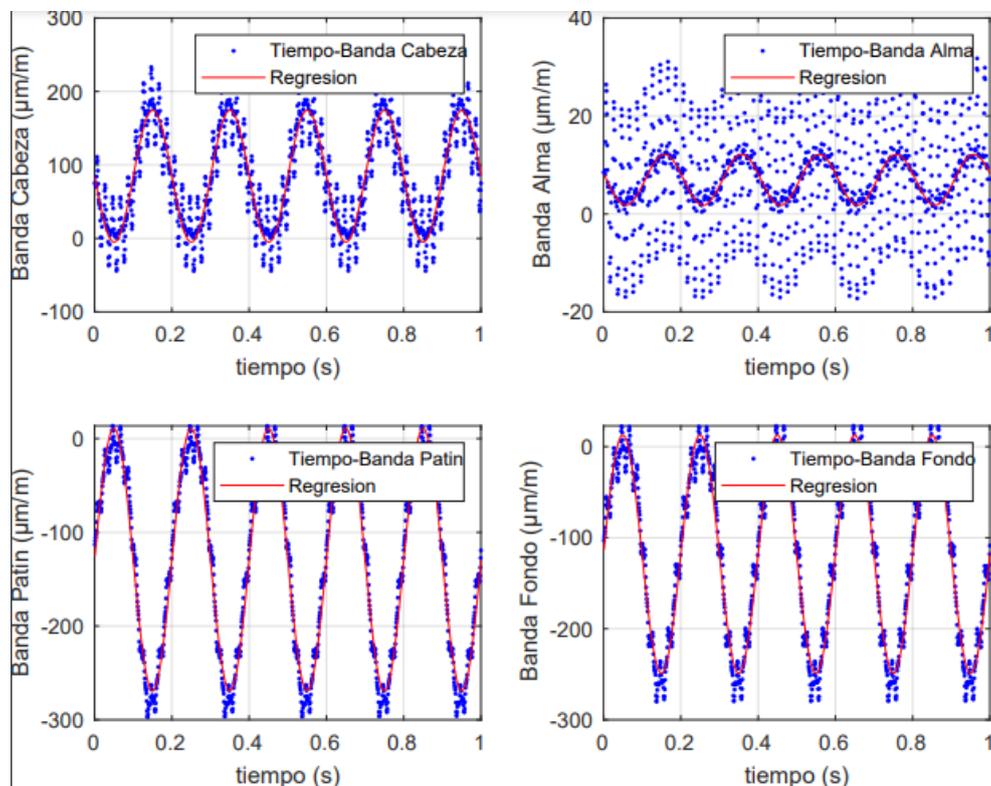
**Gráfica 96.** PC-2 2Hz Madera 600mm Ensayo 2.



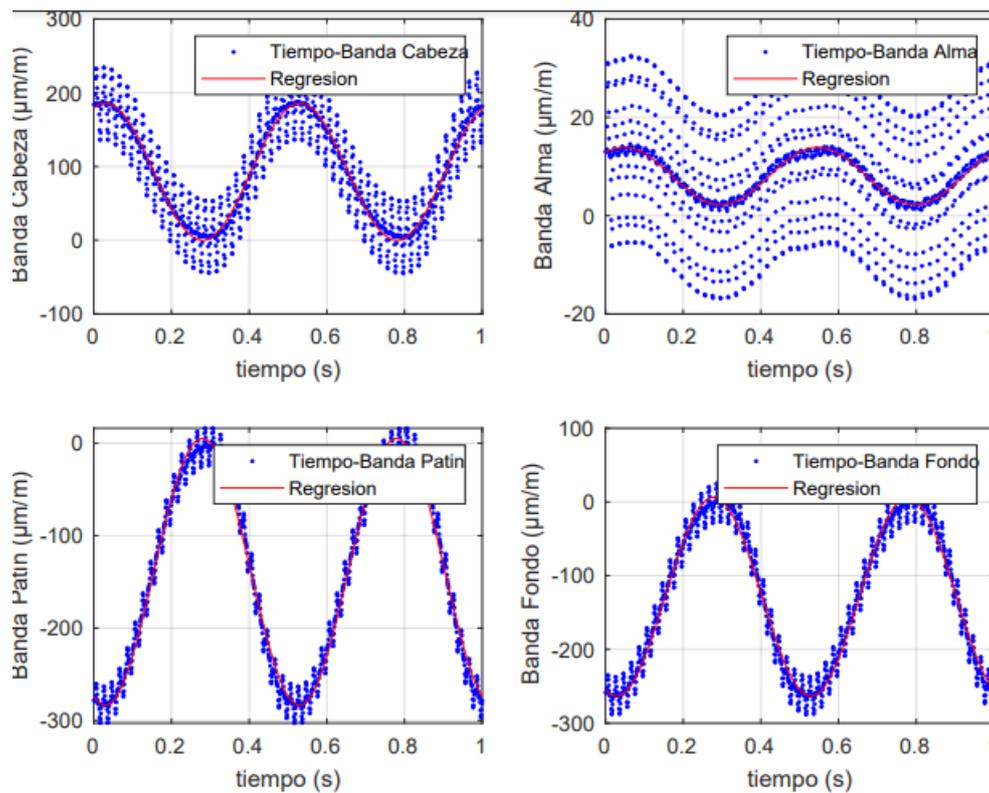
**Gráfica 97.** Banda 10Hz Manta 900mm.



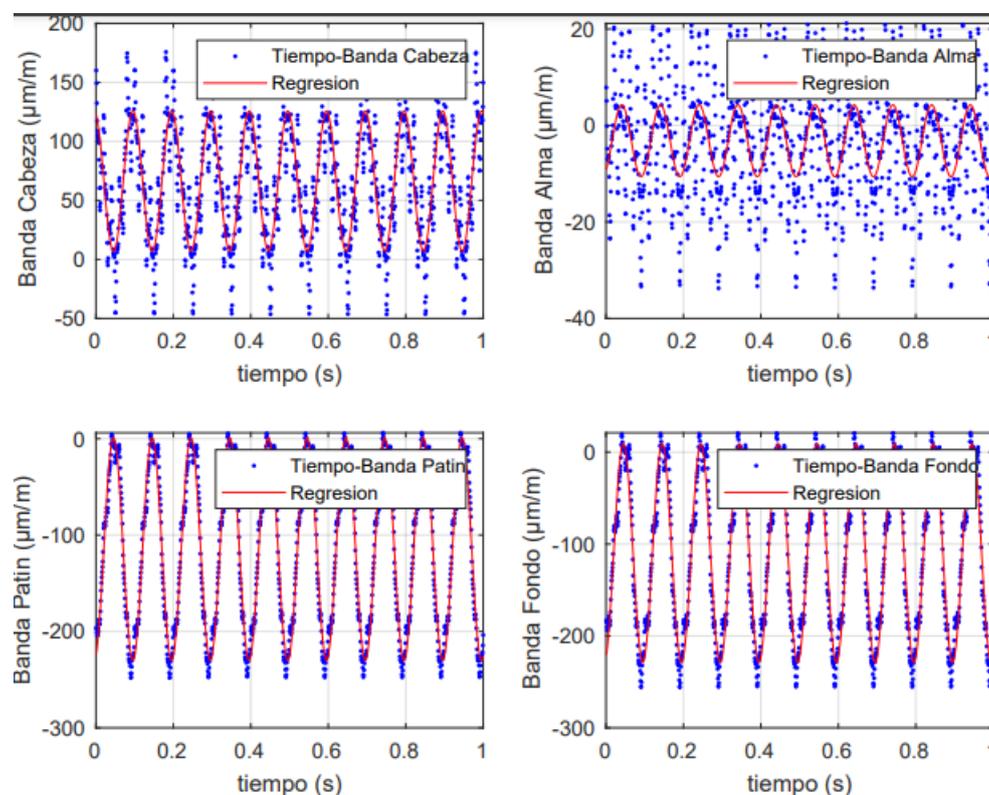
**Gráfica 98.** Banda 5Hz Manta 900mm.



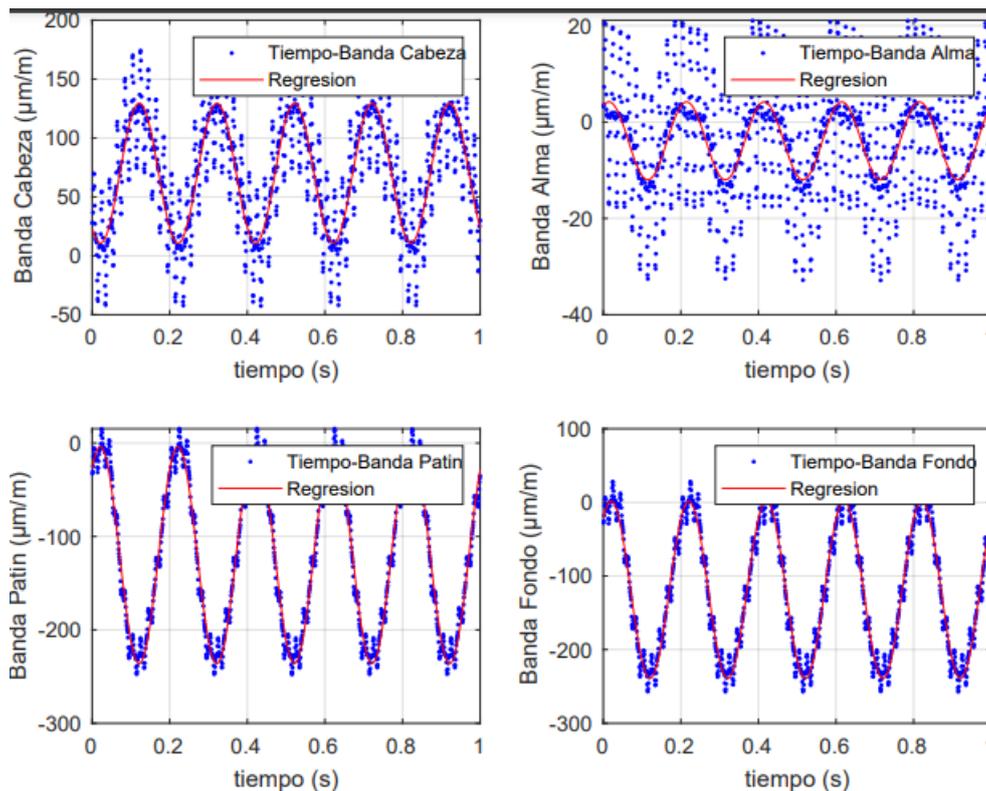
**Gráfica. 99** Banda 2Hz Manta 900mm.



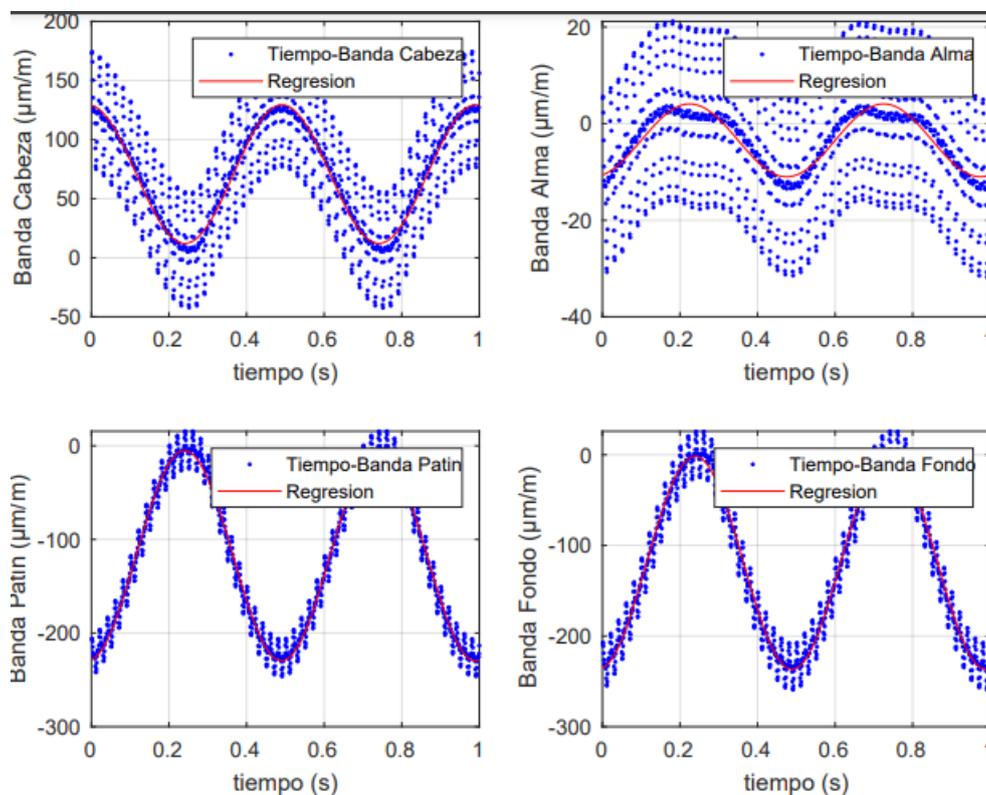
**Gráfica 100.** Banda 10Hz Madera 900mm.



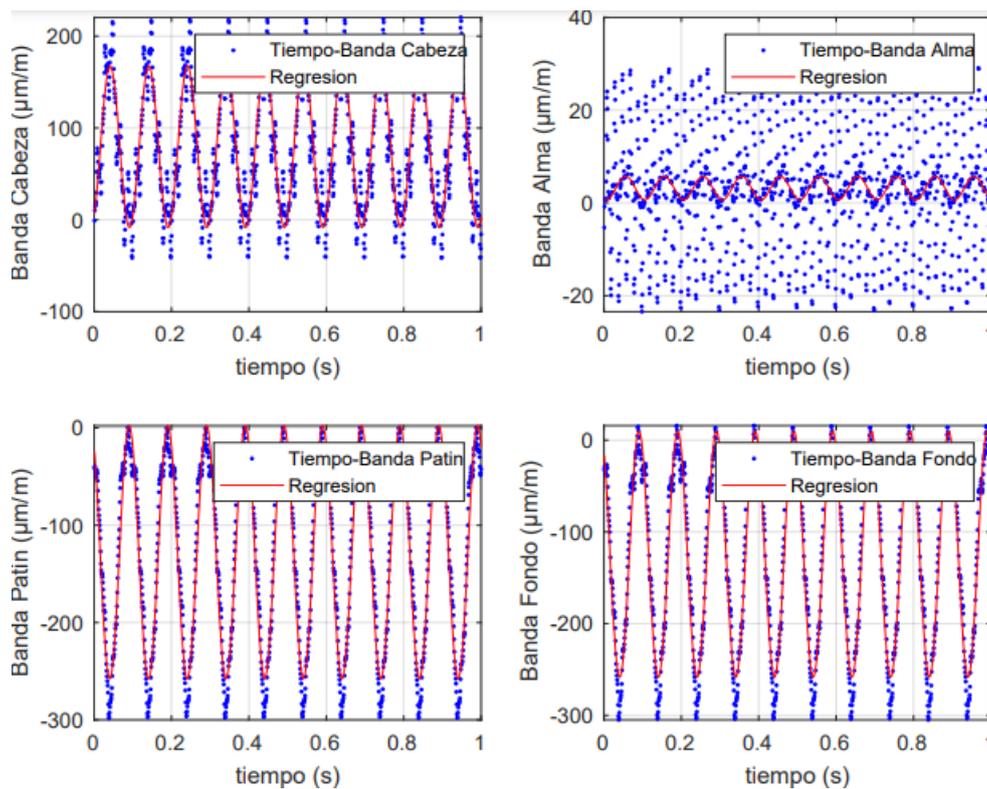
**Gráfica 101.** Banda 5Hz Madera 900mm.



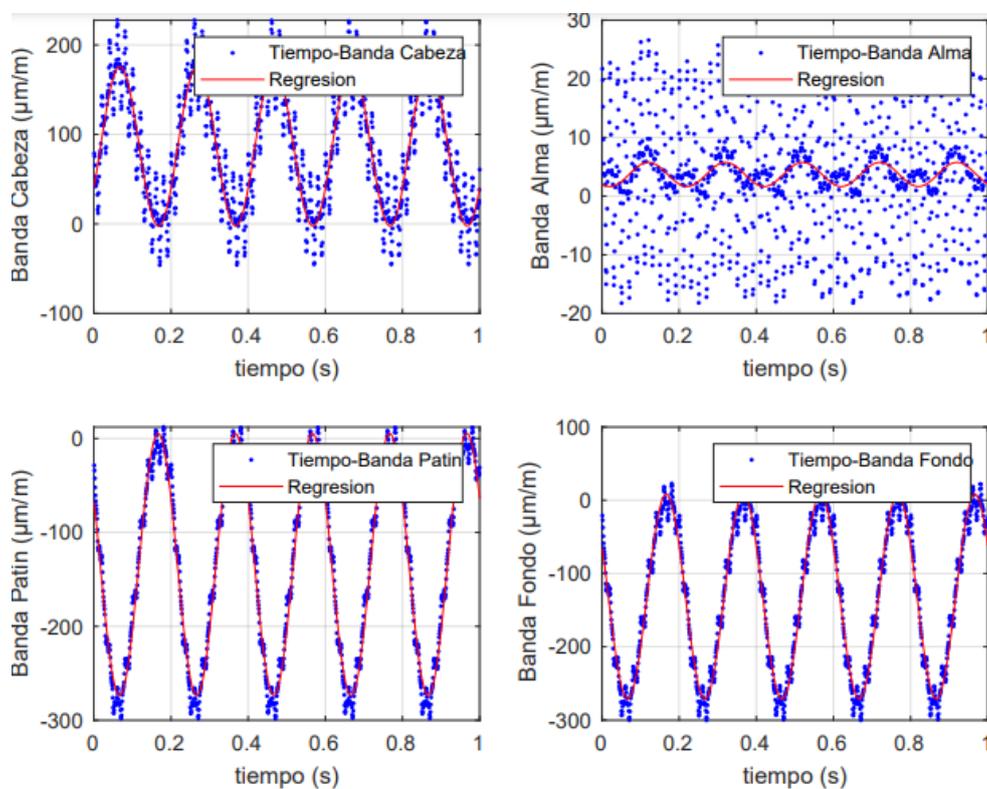
**Gráfica 102.** Banda 2Hz Madera 900mm.



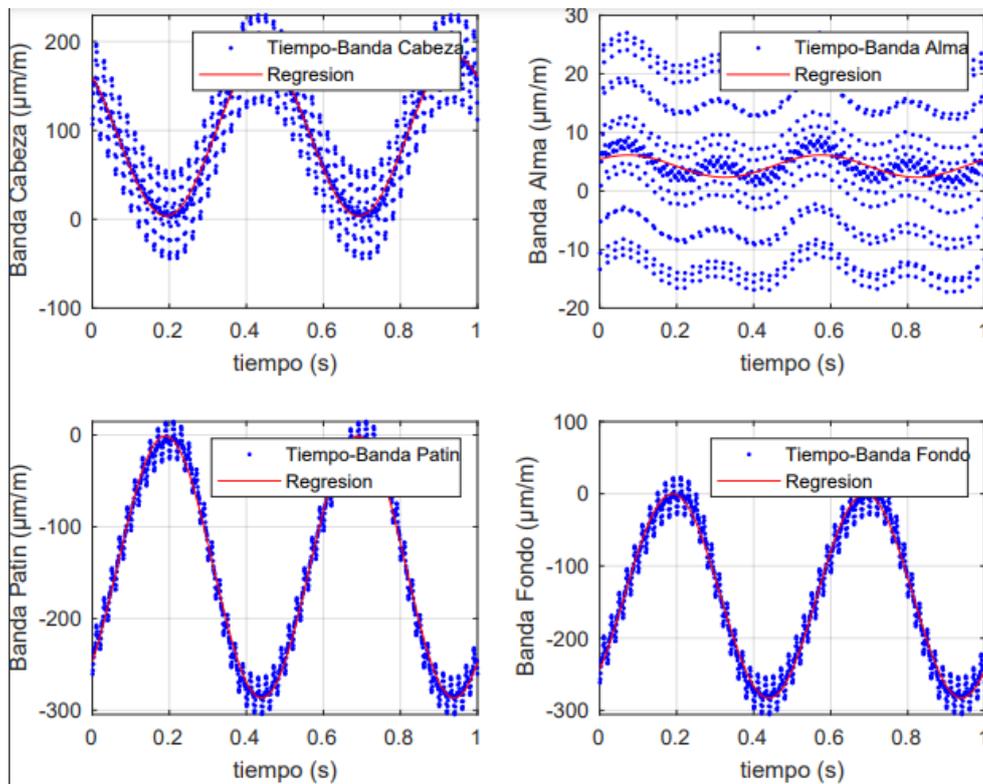
Gráfica 103. Banda 10Hz Manta 800mm.



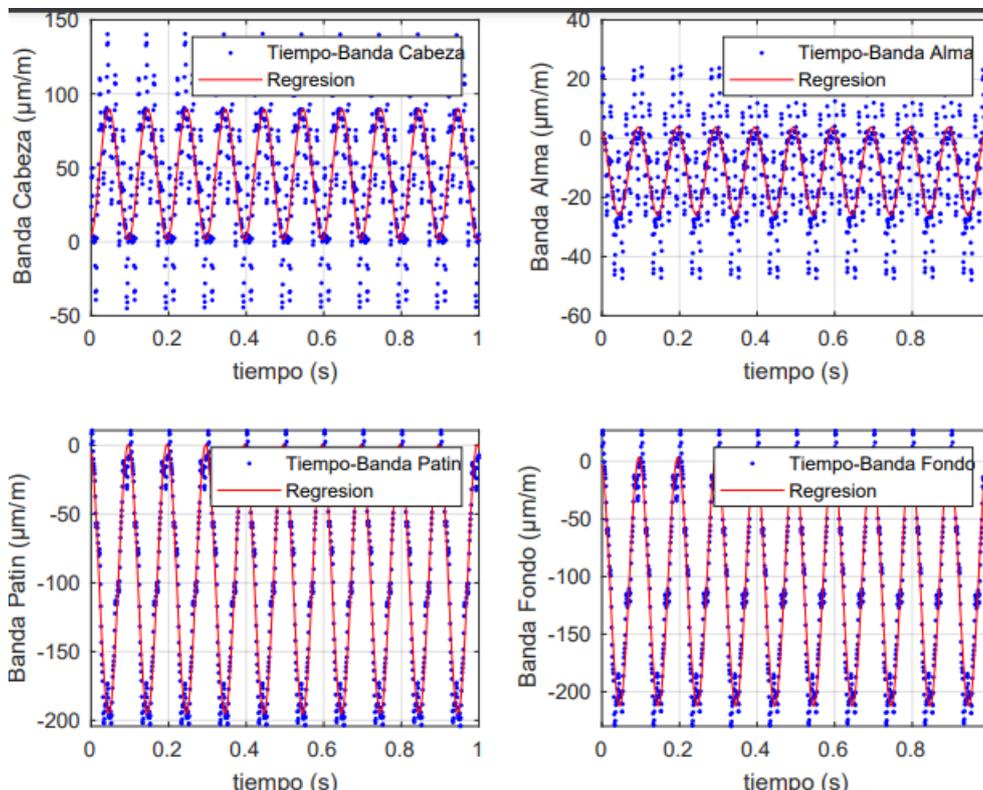
Gráfica 104. Banda 5Hz Manta 800mm.



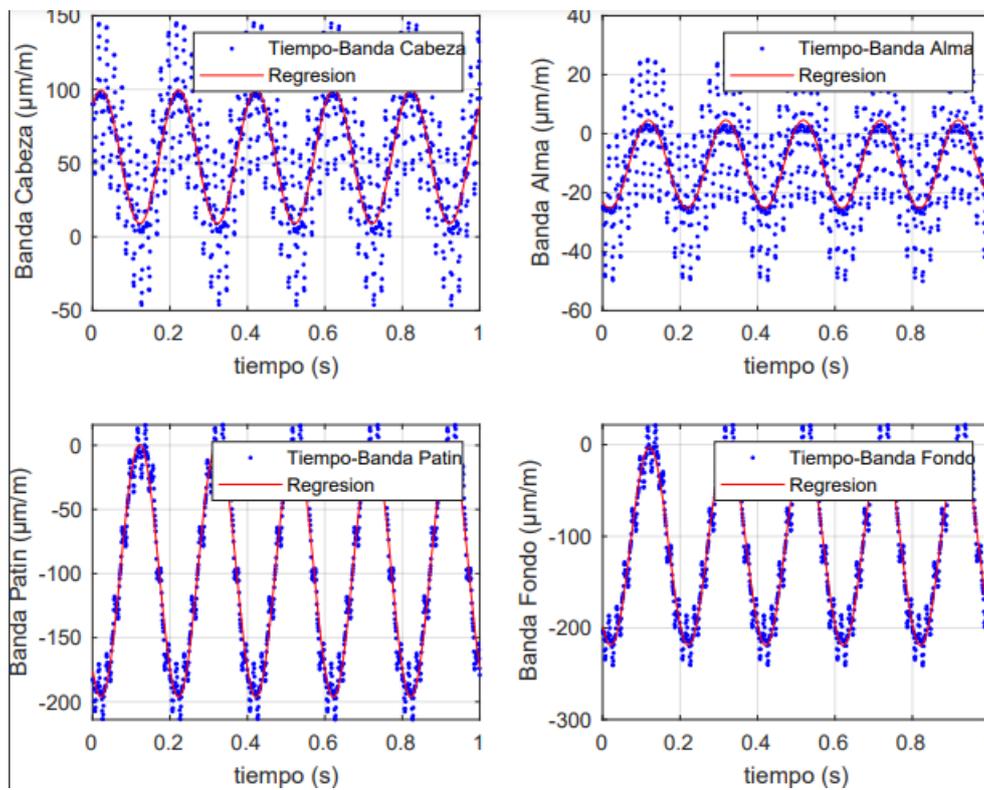
Gráfica 105. Banda 2Hz Manta 800mm.



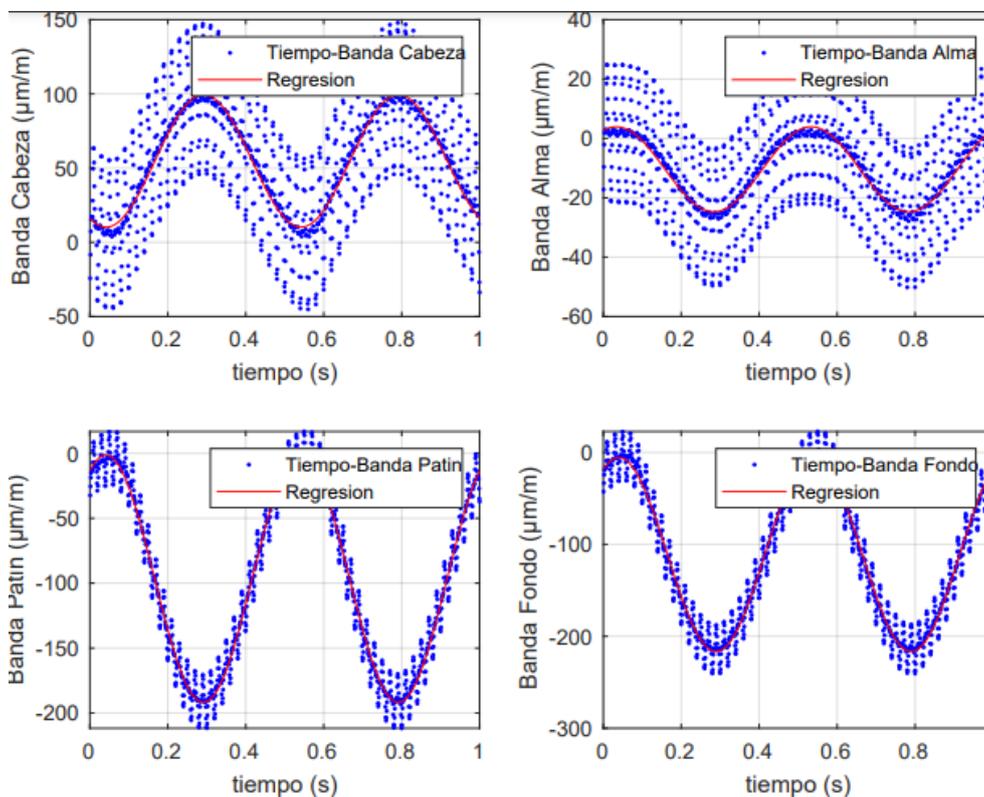
Gráfica 106. Banda 10Hz Madera 800mm.



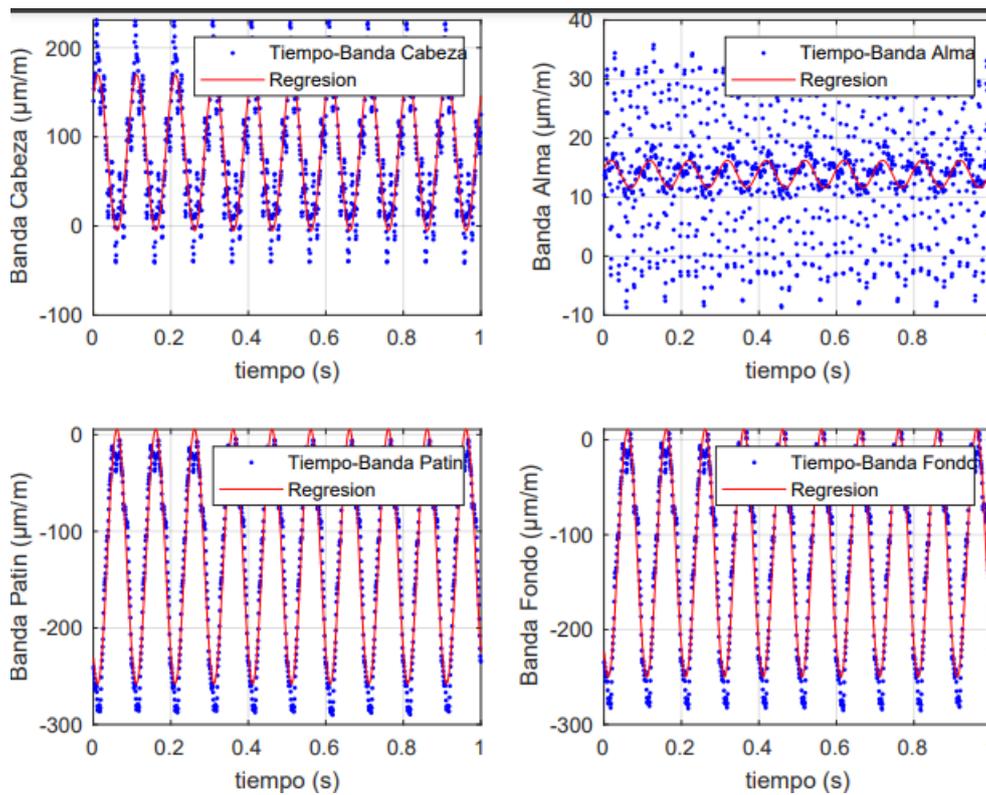
Gráfica 107. Banda 5Hz Madera 800mm.



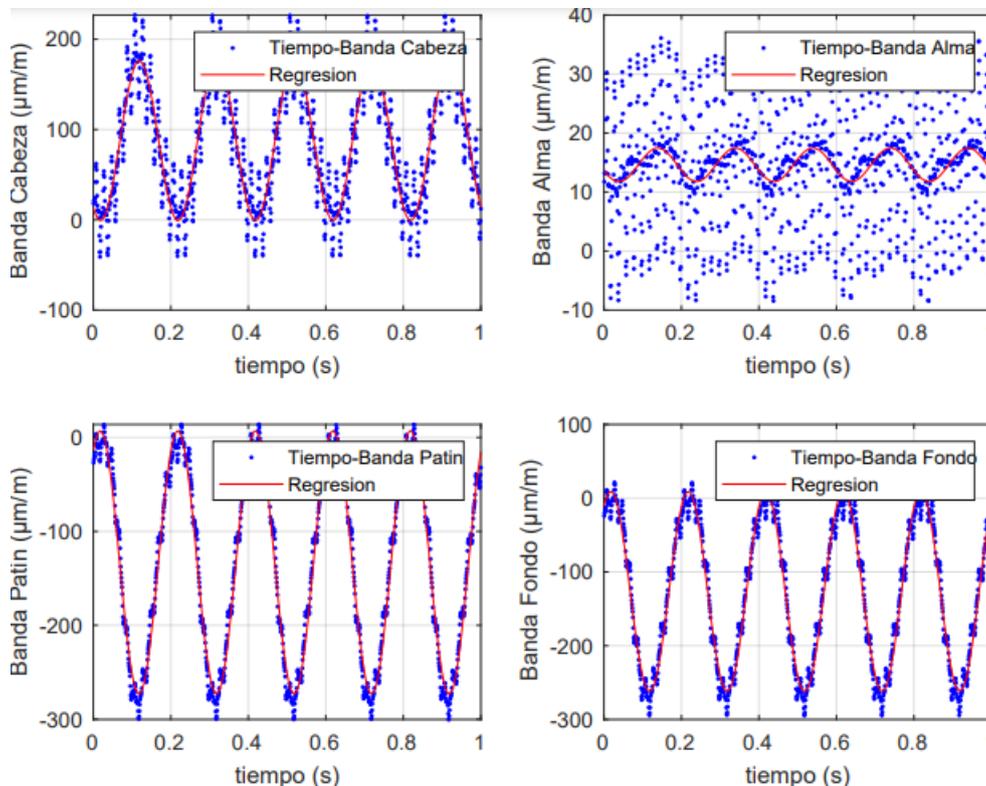
Gráfica 108. Banda 5Hz Madera 800mm.



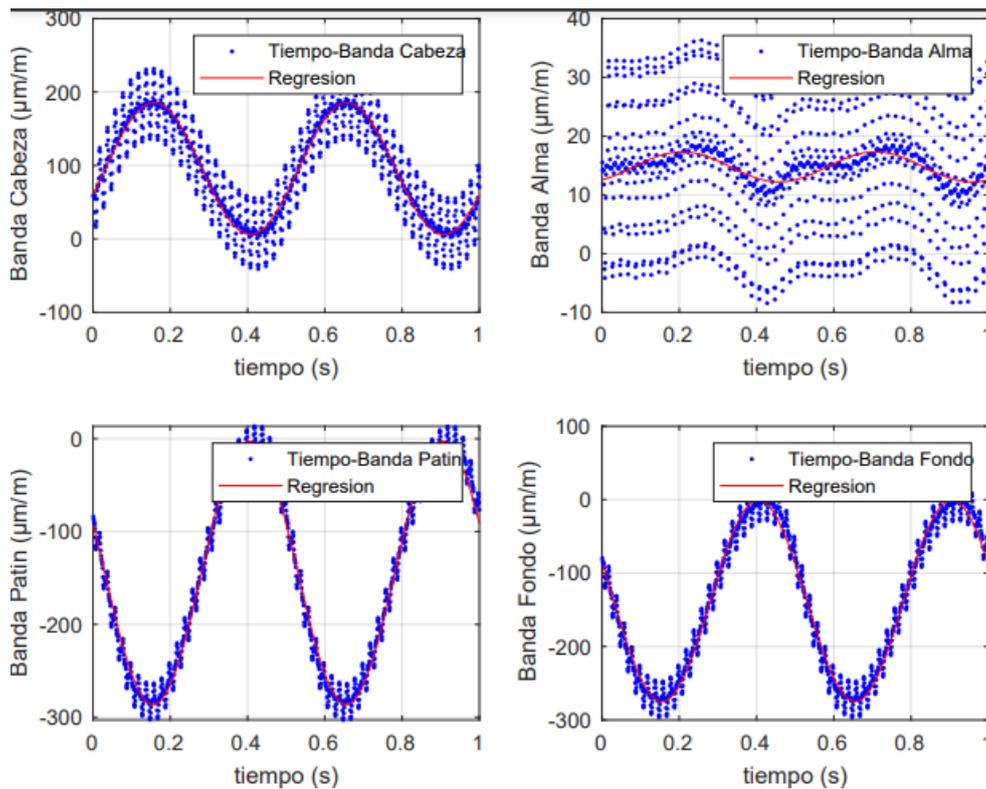
Gráfica 109. Banda 10Hz Manta 700mm.



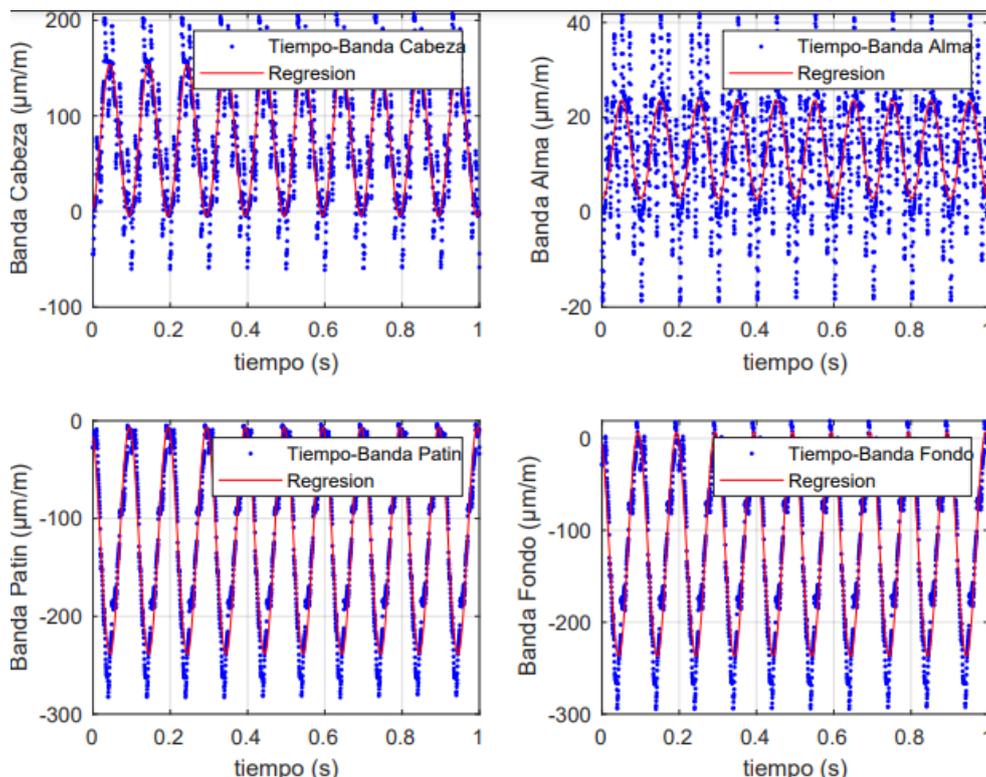
Gráfica 110. Banda 5Hz Manta 700mm.



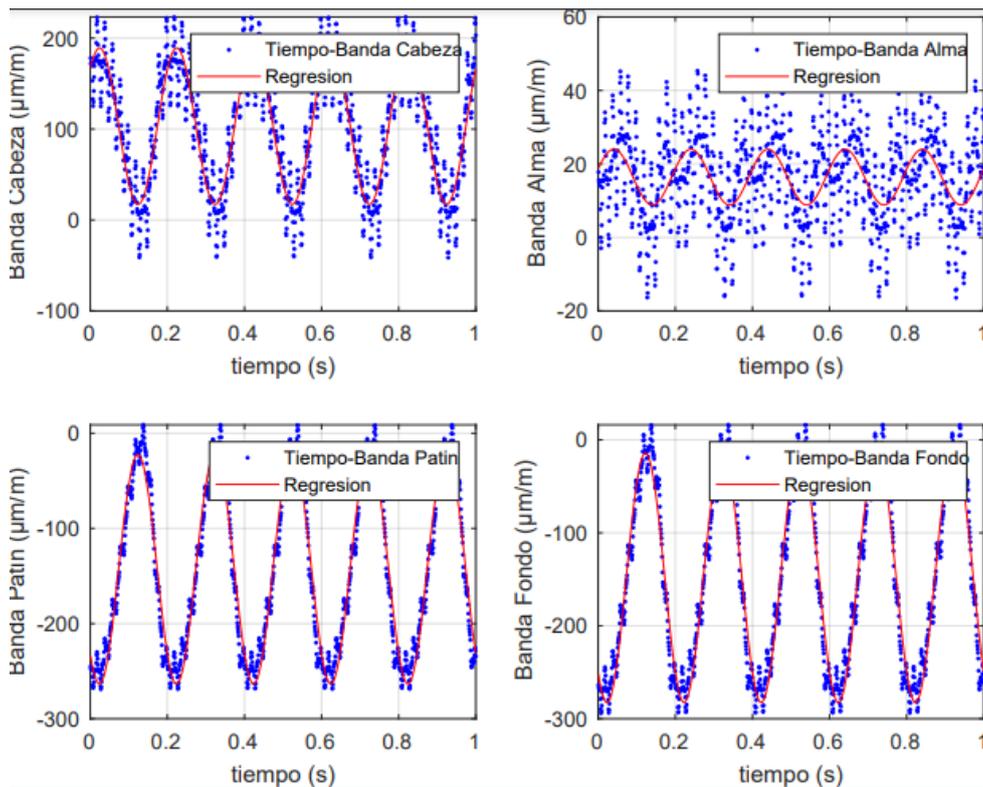
Gráfica 111. Banda 2Hz Manta 700mm.



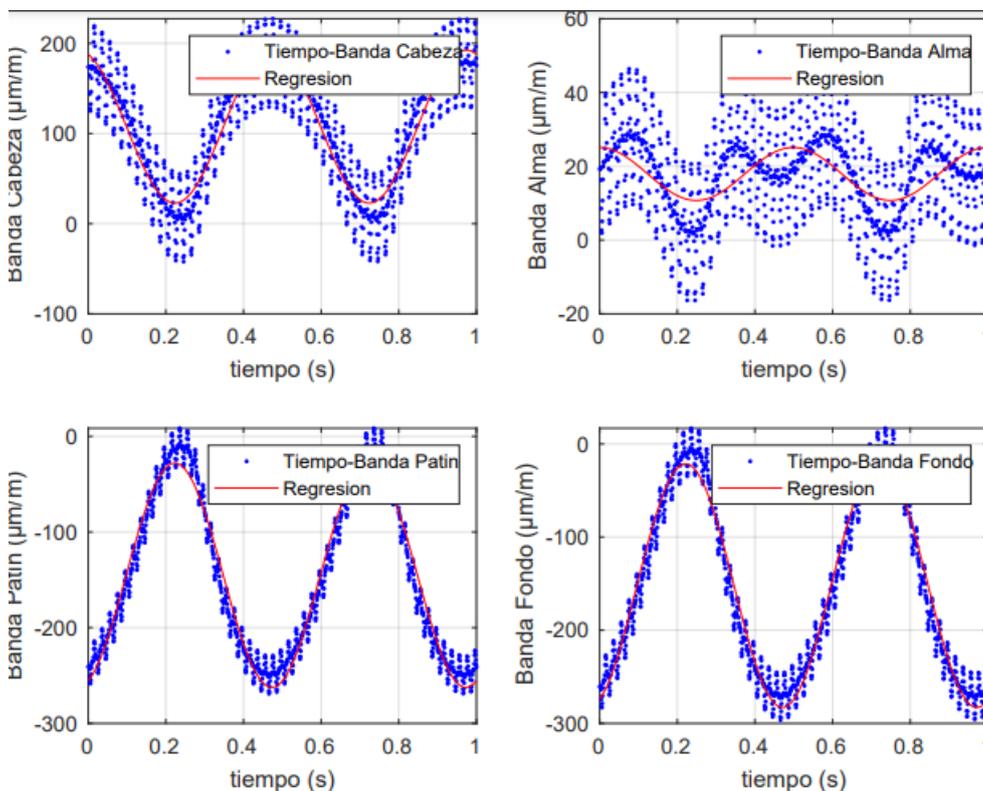
Gráfica 112. Banda 10Hz Madera 700mm.



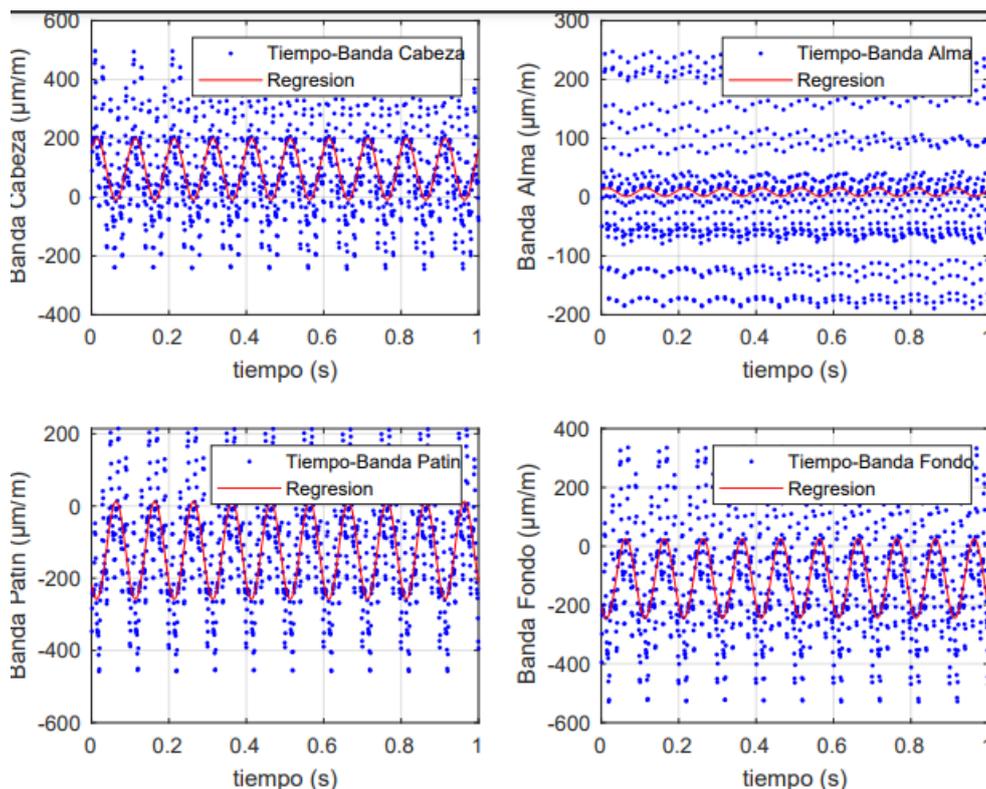
**Gráfica 113.** Banda 5Hz Madera 700mm.



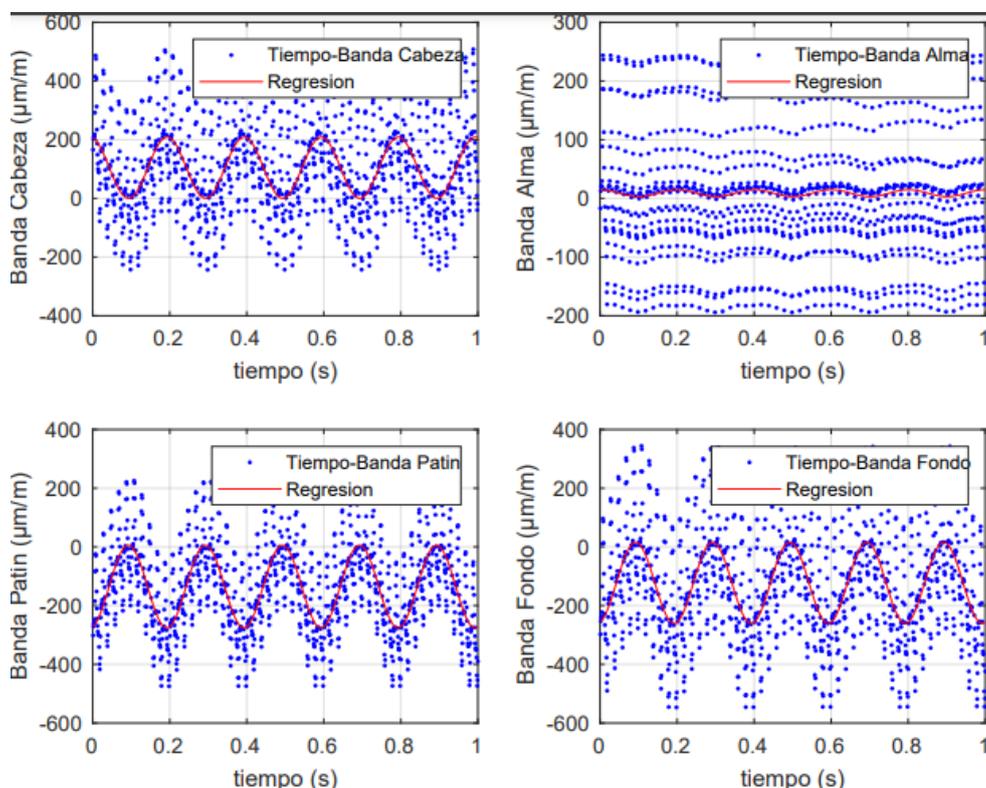
**Gráfica 114.** Banda 2Hz Madera 700mm.



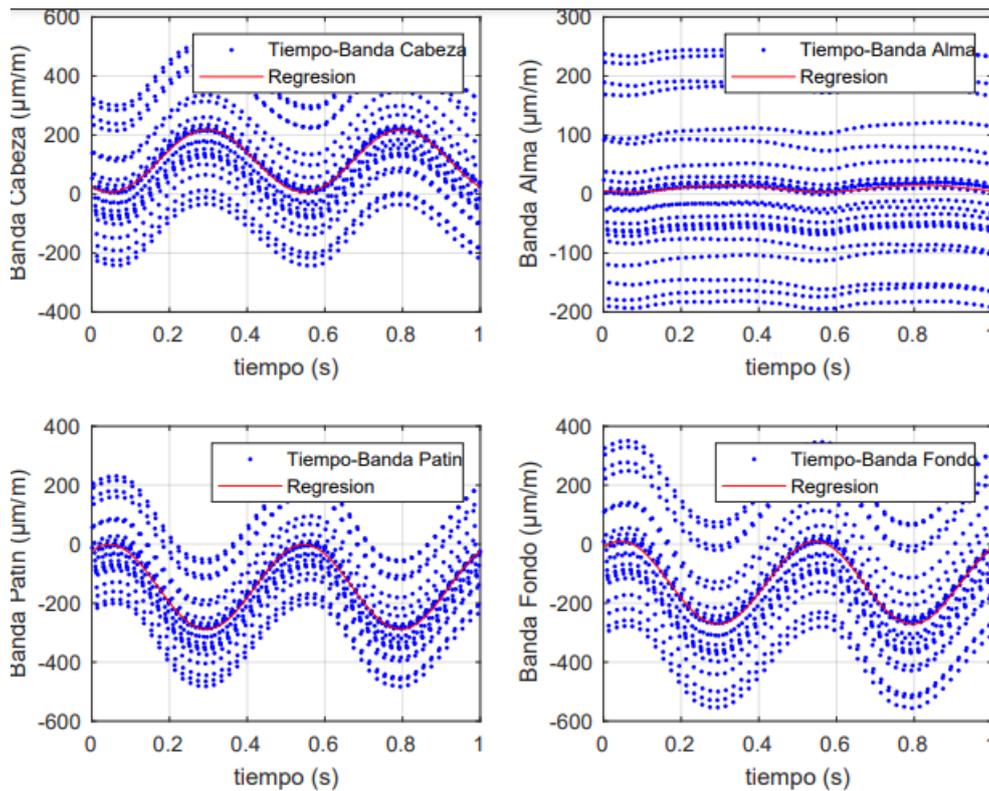
**Gráfica 115.** Banda 10Hz Manta 600mm.



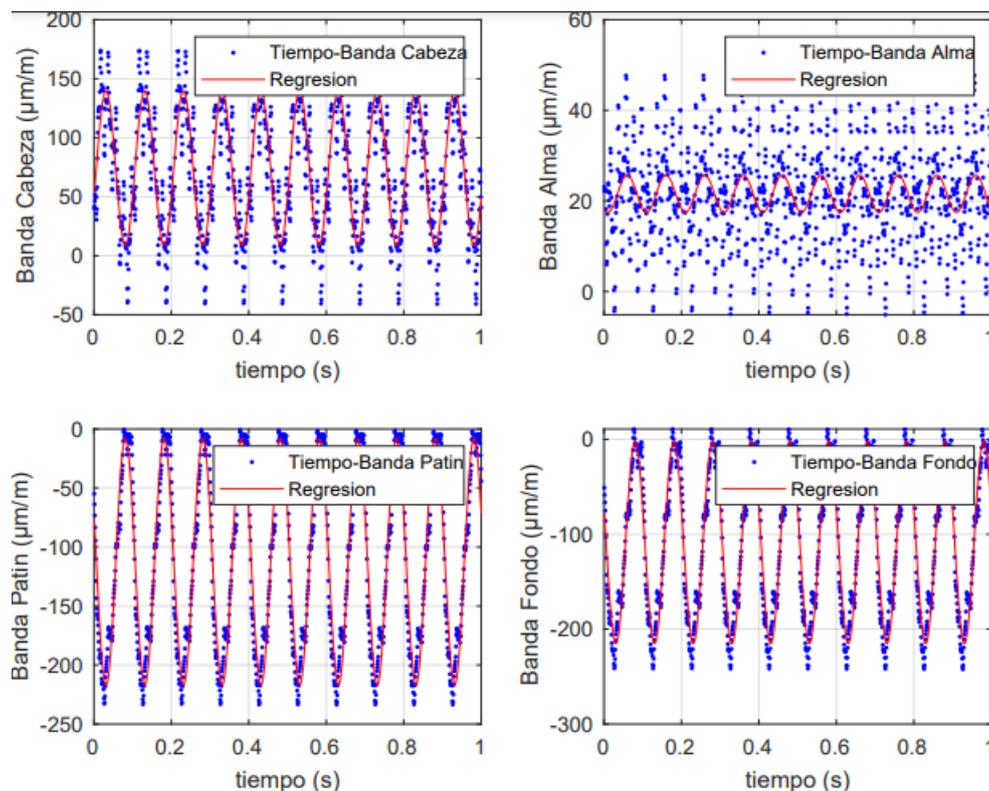
**Gráfica 116.** Banda 5Hz Manta 600mm.



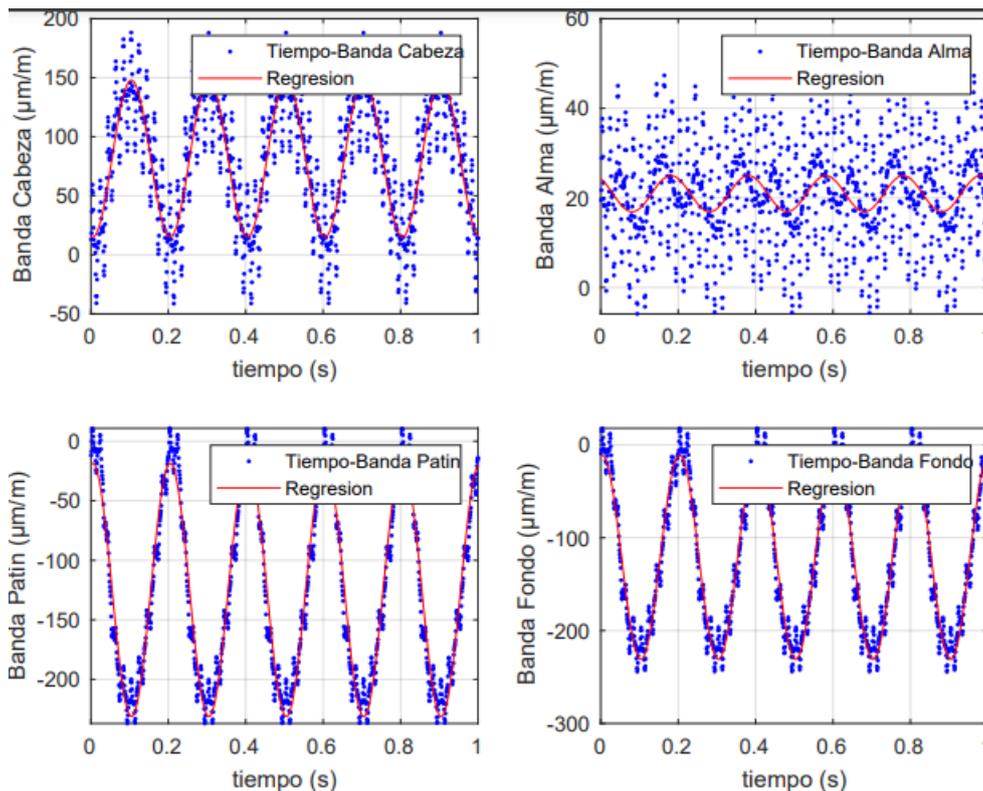
Gráfica 117. Banda 2Hz Manta 600mm.



Gráfica 118. Banda 10Hz Madera 600mm.



**Gráfica 119.** Banda 5Hz Madera 600mm.



**Gráfica 120.** Banda 2Hz Madera 600mm.

