



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**Análisis experimental de la respuesta de una pasarela a escala (sin y con TMD) ante cargas que simulan el tránsito peatonal.**

Autor: del Carmen Martínez, Pablo

Tutor: Lorenzana Ibán, Antolín

Cotutor: Magdaleno González, Álvaro

DPTO: Construcciones arquitectónicas, ingeniería del terreno, mecánica de los medios continuos y teoría de estructuras.

**Valladolid, Febrero de 2018.**



# ÍNDICE

1.	Introducción y objetivos .....	11
1.1.	Introducción .....	11
1.2.	Objetivos .....	11
2.	Modelo a escala .....	13
2.1.	LEGO Mindstorms .....	13
2.1.1.	Software .....	14
2.1.2.	Hardware .....	15
2.2.	Pasarela .....	17
2.3.	Medición de datos .....	18
2.3.1.	Células de carga .....	18
2.3.2.	Medidor láser .....	19
2.3.3.	Acelerómetro .....	20
2.3.4.	Tarjeta de adquisición de datos .....	21
2.3.5.	Software de adquisición de datos .....	22
2.4.	TMD .....	23
3.	Fundamentos teóricos .....	27
3.1.	Análisis estático .....	27
3.2.	Análisis modal .....	28
3.3.	Resonancia .....	29
3.4.	Análisis de fuerzas .....	30
3.5.	Normativa. ....	33
4.	Proceso experimental .....	39
4.1.	Ensayos estáticos .....	39
4.2.	Ensayos dinámicos .....	40
4.2.1.	Introducción .....	40
4.2.2.	Ensayos S-LD .....	44
4.2.3.	Ensayos S-LT .....	57
4.2.4.	Ensayos W-LD .....	70
4.2.5.	Ensayos W-LT .....	86
5.	Conclusiones y líneas de futuro .....	101
6.	Referencias .....	103

6.1. Bibliografía .....	103
6.2. Trabajos Fin de Grado .....	103
6.3. Ilustraciones y tablas .....	104
7. Anexos .....	105
Anexo A: Célula de Carga.....	105
Anexo B: Medidor Láser .....	109
Anexo C: Sirius HD-STG.....	111
Anexo D: Acelerómetro .....	112

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Bloque EV3 con sensores y actuadores. [1].....	13
Ilustración 2. Kit completo EV3 [2] .....	14
Ilustración 3. Software MINDSTORMS EV3 .....	14
Ilustración 4. Robot .....	15
Ilustración 5. Detalle brazo trasero. ....	16
Ilustración 6. Detalle brazo delantero. ....	16
Ilustración 7. Masa extra. ....	17
Ilustración 8. Detalle de las células de carga y viga. [3] .....	18
Ilustración 9. Células de carga y tabla de especificaciones. [3].....	19
Ilustración 10. Sensor Láser [3] .....	20
Ilustración 11. Acelerómetro [4] .....	20
Ilustración 12. SIRIUS HD-STG [4] .....	21
Ilustración 13. Conector D-SUB macho [4] .....	22
Ilustración 14. Conexión de la alimentación del láser [4] .....	22
Ilustración 15. Software Dewesoft X2 SP10 .....	23
Ilustración 16. Dos tipos de TMD [5] .....	24
Ilustración 17. TMD y acelerómetro.....	24
Ilustración 18. Recreación en CATIA del TMD. ....	25
Ilustración 19. Viga biapoyada. ....	27
Ilustración 20. Viga biapoyada con carga F genérica [6] .....	27
Ilustración 21. Modos de vibración de una viga biapoyada. [7] .....	28
Ilustración 22. Resonancia mecánica. [8]. ....	30
Ilustración 23. Fuerza provocada por un peatón [10].....	32
Ilustración 24. Patrones de fuerzas generados por un peatón. [6].....	33
Ilustración 25. Captura de datos en el software Dewesoft.....	39
Ilustración 26. Medida de diferentes elementos en la báscula. ....	40
Ilustración 27. Respuesta a impulso con TMD bloqueado. ....	41
Ilustración 28. Respuesta a impulso con TMD libre. ....	42
Ilustración 29. Respuesta a impulso con el robot sobre la viga. ....	42
Ilustración 30. Perfiles de leva delantero y trasero.....	43
Ilustración 31. Ensayo en DEWESOFT.....	45
Ilustración 32. S-LD-B-SP .....	46
Ilustración 33. S-LD-B-P. ....	48
Ilustración 34. S-LD-SB-SP.....	49
Ilustración 35. S-LD-SB-P .....	50
Ilustración 36. S-LD-SB comparación P-SP.....	54
Ilustración 37. S-LD-B comparación P-SP .....	54
Ilustración 38. S-LD-SP comparación B-SB.....	55
Ilustración 39. S-LD-P comparación B-SB .....	55
Ilustración 40. Mejora TMD S-LD-SP. ....	57
Ilustración 41. Mejora TMD S-LD-P .....	57

Ilustración 42. S-LT-B-SP .....	58
Ilustración 43. S-LT-B-P .....	59
Ilustración 44. S-LT-SB-SP .....	60
Ilustración 45. S-LT-SB-P .....	62
Ilustración 46. S-LT-SB comparación P-SP .....	65
Ilustración 47. S-LT-B comparación P-SP .....	65
Ilustración 48. S-LT-SP comparación B-SB .....	66
Ilustración 49. S-LT-P comparación B-SB .....	66
Ilustración 50. Mejora TMD S-LT-SP .....	69
Ilustración 51. Mejora TMD S-LT-P .....	69
Ilustración 52. Sigview .....	70
Ilustración 53. W-LD-B-SP Aceleración .....	71
Ilustración 54. W-LD-B-SP Desplazamiento .....	72
Ilustración 55. W-LD-B-SP Apoyo D .....	73
Ilustración 56. W-LD-B-SP Apoyo I .....	73
Ilustración 57. W-LD-B-P Aceleración .....	74
Ilustración 58. W-LD-B-P Desplazamiento .....	75
Ilustración 59. W-LD-B-P Apoyo D .....	76
Ilustración 60. W-LD-B-P Apoyo I .....	76
Ilustración 61. W-LD-SB-SP Aceleración .....	77
Ilustración 62. W-LD-SB-SP Desplazamiento .....	77
Ilustración 63. W-LD-SB-SP Apoyo D .....	78
Ilustración 64. W-LD-SB-SP Apoyo I .....	78
Ilustración 65. W-LD-SB-P Aceleración .....	79
Ilustración 66. W-LD-SB-P Desplazamiento .....	79
Ilustración 67. W-LD-SB-P Apoyo D .....	80
Ilustración 68. W-LD-SB-P Apoyo I .....	80
Ilustración 69. W-LD-SB comparación P-SP .....	82
Ilustración 70. W-LD-B comparación P-SP .....	83
Ilustración 71. W-LD-SP comparación B-SB .....	83
Ilustración 72. W-LD-P comparación B-SB .....	84
Ilustración 73. Mejora TMD W-LD-SP .....	85
Ilustración 74. Mejora TMD W-LD-P .....	85
Ilustración 75. W-LT-B-SP Aceleración .....	86
Ilustración 76. W-LT-B-SP Desplazamiento .....	86
Ilustración 77. W-LT-B-SP Apoyo D .....	87
Ilustración 78. W-LT-B-SP Apoyo I .....	88
Ilustración 79. W-LT-B-P Aceleración .....	88
Ilustración 80. W-LT-B-P Desplazamiento .....	89
Ilustración 81. W-LT-B-P Apoyo D .....	90
Ilustración 82. W-LT-B-P Apoyo I .....	90
Ilustración 83. W-LT-SB-SP Aceleración .....	91
Ilustración 84. W-LT-SB-SP Desplazamiento .....	91
Ilustración 85. W-LT-SB-SP Apoyo D .....	92

Ilustración 86. W-LT-SB-SP Apoyo I. ....	93
Ilustración 87. W-LT-SB-P Aceleración. ....	93
Ilustración 88. W-LT-SB-P Desplazamiento. ....	94
Ilustración 89. W-LT-SB-P Apoyo D.....	95
Ilustración 90. W-LT-SB-P Apoyo I. ....	95
Ilustración 91. W-LT-SB comparación P-SP. ....	97
Ilustración 92. W-LT-B comparación P-SP. ....	97
Ilustración 93. W-LT-SP comparación B-SB. ....	98
Ilustración 94. W-LT-P comparación B-SB. ....	98
Ilustración 95. Mejora TMD W-LT-SP. ....	99
Ilustración 96. Mejora TMD W-LT-P. ....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de la viga .....	17
Tabla 2. Tipos de acciones sobre una estructura.[9].....	31
Tabla 3. Valores de referencia de aceleraciones para confort de los peatones. ....	37
Tabla 4. Ensayos estáticos. ....	40
Tabla 5. Codificación de los ensayos. ....	44
Tabla 6. S-LD-B-SP.....	47
Tabla 7. S-LD-B-SP comparación.....	47
Tabla 8. S-LD-B-P resumen. ....	48
Tabla 9. S-LD-B-P-comparación. ....	49
Tabla 10. S-LD-SB-SP.....	49
Tabla 11. S-LD-SB-SP resumen.....	50
Tabla 12. S-LD-SB-P.....	51
Tabla 13. S-LD-SB-P-comparación. ....	51
Tabla 14. S-LD frecuencia menor.....	52
Tabla 15. S-LD mejora TMD frecuencia menor .....	52
Tabla 16. S-LD frecuencia de resonancia.....	53
Tabla 17. S-LD Mejora TMD frecuencia de resonancia. ....	53
Tabla 18. S-LD frecuencia mayor .....	56
Tabla 19. S-LD mejora TMD frecuencia mayor.....	56
Tabla 20. S-LT-B-SP. ....	58
Tabla 21. S-LT-B-SP comparación. ....	59
Tabla 22. S-LT-B-P.....	60
Tabla 23. S-LT-B-P resumen.....	60
Tabla 24. S-LT-SB-SP. ....	61
Tabla 25. S-LT-SB-SP comparación. ....	61
Tabla 26. S-LT-SB-P .....	62
Tabla 27. S-LT-SB-P resumen .....	62
Tabla 28. S-LT frecuencia menor .....	63
Tabla 29. S-LT mejora TMD frecuencia menor .....	63
Tabla 30. S-LT frecuencia de resonancia .....	64
Tabla 31. S-LT mejora TMD frecuencia de resonancia .....	64
Tabla 32. S-LT frecuencia mayor.....	67
Tabla 33. S-LT mejora TMD frecuencia mayor .....	67
Tabla 34. S-LT frecuencia mayor.....	68
Tabla 35. S-LT mejora TMD frecuencia mayor .....	68
Tabla 36. W-LD-B-SP. ....	72
Tabla 37. W-LD-B-P.....	75
Tabla 38. W-LD-SB-SP. ....	78
Tabla 39. W-LD-SB-P.....	80
Tabla 40. W-LD Frecuencia menor. ....	81
Tabla 41. W-LD mejora TMD frecuencia menor.....	81

Tabla 42. W-LD frecuencia de resonancia. ....	82
Tabla 43. W-LD mejora TMD frecuencia de resonancia. ....	82
Tabla 44. W-LD frecuencia mayor. ....	84
Tabla 45. W-LD mejora TMD frecuencia mayor. ....	84
Tabla 46. W-LT-B-SP. ....	87
Tabla 47. W-LT-B-P. ....	89
Tabla 48. W-LT-SB-SP. ....	92
Tabla 49. W-LT-SB-P. ....	94
Tabla 50. W-LT frecuencia menor. ....	96
Tabla 51. W-LT mejora TMD frecuencia menor. ....	96
Tabla 52. W-LT frecuencia de resonancia. ....	96
Tabla 53. W-LT mejora TMD frecuencia de resonancia. ....	96
Tabla 54. W-LT frecuencia mayor. ....	99
Tabla 55. W-LT mejora TMD frecuencia mayor. ....	99



## 1. Introducción y objetivos

### 1.1. Introducción

Este TFG se desarrolla como parte de un proyecto que se ha ido desarrollando en los últimos años en el departamento de Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno, Mecánica de los medios Continuos y Teoría de Estructuras. En cada fase del proyecto, mediante los mecanismos de mejora continua, se van ampliando conocimientos y llegando a resultados cada vez más interesantes.

Se va a trabajar con un modelo a escala de una pasarela peatonal ligera, una tendencia constructiva que ha ido imponiéndose en los últimos años debido a las nuevas necesidades de las ciudades en cuanto a movilidad. Además, los avances en el diseño y construcción de pasarelas han dado lugar a nuevos tipos de estructuras, más esbeltas y ligeras que las tradicionales y poco amortiguadas. Por ello, estas nuevas pasarelas presentan otro tipo de problemas respecto a las tradicionales. Al trabajar con factores de seguridad más reducidos y una menor rigidez estructural, las cargas inducidas por el tránsito de peatones son un factor dinámico que se debe tener en cuenta y analizar en la fase de diseño.

Una de las vías de diseño y una buena manera de analizar los posibles problemas y soluciones es el trabajo con modelos a escala. En el caso que se va a analizar se dispone de un montaje que simula una pasarela a una escala aproximada de 1:12. La viga con la que se trabaja tiene una longitud de 6 metros, que simularía una pasarela de 72 metros, con lo que podríamos cruzar el río Pisuerga a su paso por Valladolid.

Para simular las fuerzas que aplicaría un peatón sobre esta estructura se dispone de un robot realizado mediante el kit LEGO Mindstorms. Este kit de robótica es muy funcional y permite soluciones creativas para problemas que, de otro modo, sería muy costoso resolver.

El último elemento destacable de este montaje a escala es un TMD. Este dispositivo trata de minimizar los movimientos que el robot induce sobre la estructura. Se trata de un elemento amortiguador de vibraciones cuyo funcionamiento más detallado se explicará en próximos capítulos.

### 1.2. Objetivos

A la hora de desarrollar este TFG se han tenido varios objetivos en mente. Cabe destacar que al ser un TFG que forma parte de un proyecto mayor, algunas de las áreas que se tocan en este proyecto se pueden encontrar descritas con mayor profundidad en otros TFGs. Estos se encuentran en la bibliografía y han servido de base a la hora de plantear este proyecto.

Los campos en los que este TFG se va a centrar son:

- *Monitorizar el comportamiento de una estructura esbelta.*

Varios sensores permiten visualizar, a tiempo real u offline, el comportamiento de la estructura. Con ello se puede realizar un análisis exhaustivo de las distintas señales obtenidas.

- *Analizar el comportamiento de la estructura ante fuerzas dinámicas, con especial interés en el fenómeno de la resonancia.*

Mediante el robot se pueden aplicar diferentes cargas dinámicas que serán las que determinen el comportamiento de la estructura. Se modificarán estas cargas para producir resonancia con la frecuencia natural de la estructura y ver su comportamiento.

- *Verificar el funcionamiento de un dispositivo TMD.*

En la estructura se ha incorporado un TMD para mitigar el movimiento de la misma. Se comprobará si funciona según lo predicho y de qué manera afecta a la estructura.

## 2. Modelo a escala

En este apartado se presentarán las herramientas utilizadas para llevar a cabo la experimentación. Son varias y merecen una gran atención, ya que a partir de ellas se realiza el trabajo de este TFG.

### 2.1. LEGO Mindstorms

El robot que se utilizará para aplicar las cargas sobre nuestra estructura a escala será uno realizado con el kit Lego Mindstorms EV3. Se trata de un kit para la construcción de robots orientado a un primer contacto con la robótica y programación, pero que utilizado con ingenio resulta muy útil en el ámbito de la ingeniería y de la experimentación. Este equipo cumple las labores de otro tipo de equipos mucho más costosos y complicados.



*Ilustración 1. Bloque EV3 con sensores y actuadores. [1]*

El kit tiene varios componentes, siendo el más importante el bloque EV3: Este “ladrillo” dispone de 4 entradas para sensores y 4 salidas para actuadores, así como de conexión mini USB, un puerto de host USB y una ranura para tarjetas microSD. Dispone también de varios botones y una pequeña interfaz gráfica con pantalla LCD desde la cual se pueden lanzar los distintos programas y acceder a varias opciones de configuración.

Además de esto, el kit se compone de múltiples piezas con las que construir nuestro robot, varios servomotores y sensores, así como de los cables necesarios para conectarlos al bloque EV3.



Ilustración 2. Kit completo EV3 [2]

Para completar el kit se han fabricado mediante impresión 3D unas levas que se acoplan a los ejes de los servos. Estas al girar inducen fuerzas sobre la pasarela simulando las que realizaría un peatón transitando sobre ella. Estos diseños son parte del TFG: “Campillo de Blas, Gonzalo. «Diseño, prototipado y verificación experimental de levas para simular la locomoción humana mediante dispositivos robóticos a escala reducida», 2017. Universidad de Valladolid”.

#### 2.1.1. Software

Para la programación del robot se utilizará el software específico para el kit EV3. Se trata de un software de programación por bloques bastante sencillo de utilizar pero con gran funcionalidad.

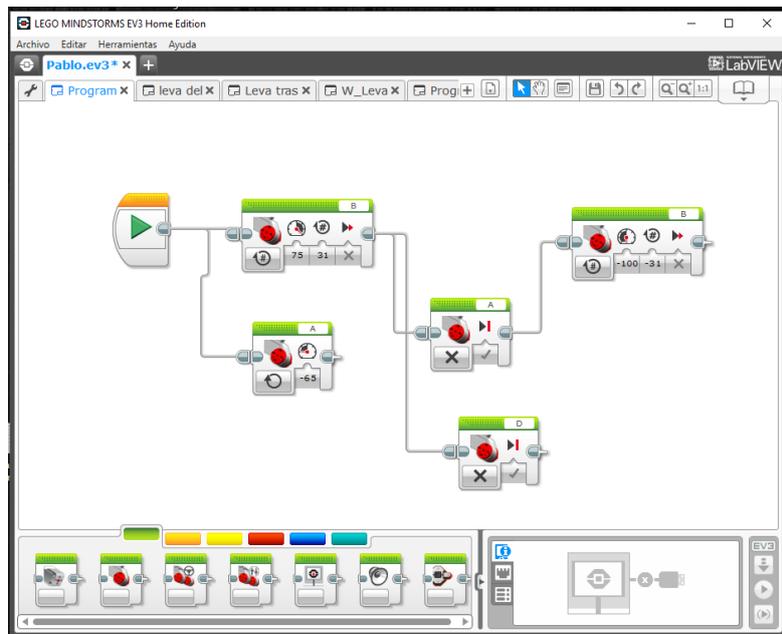


Ilustración 3. Software MINDSTORMS EV3

Utilizando este software se han realizado los distintos programas que regulan el movimiento de las levas y el motor de avance. En la Ilustración 3 se observa uno de los programas utilizados. No se explicarán con más profundidad ya que se trata de un trabajo muy sencillo de llevar a cabo y poco interesante para este proyecto.

#### 2.1.2. Hardware

El robot que se utilizará será el creado para el TFG: “Muñoz Alonso, Diego. «*Diseño y caracterización de un móvil robótico multiconfigurable para simular las cargas verticales sobre una maqueta de pasarela peatonal*»,2017. Universidad de Valladolid”. Se le han realizado unas mínimas modificaciones en las guías para mejorar su movimiento sobre la viga.

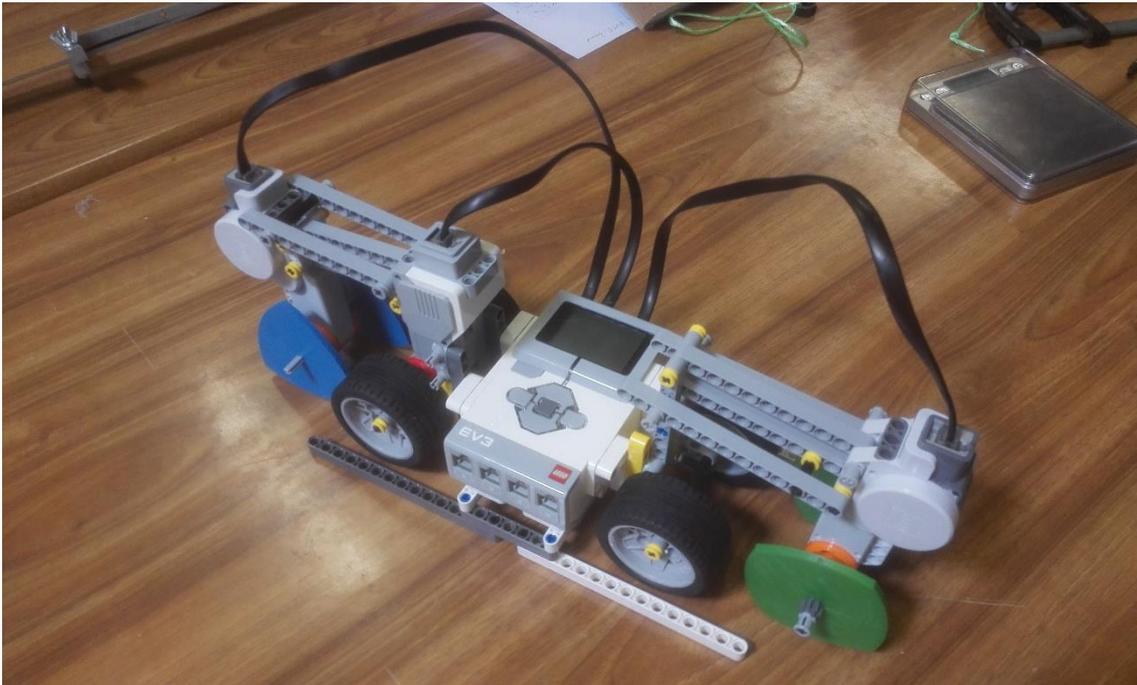
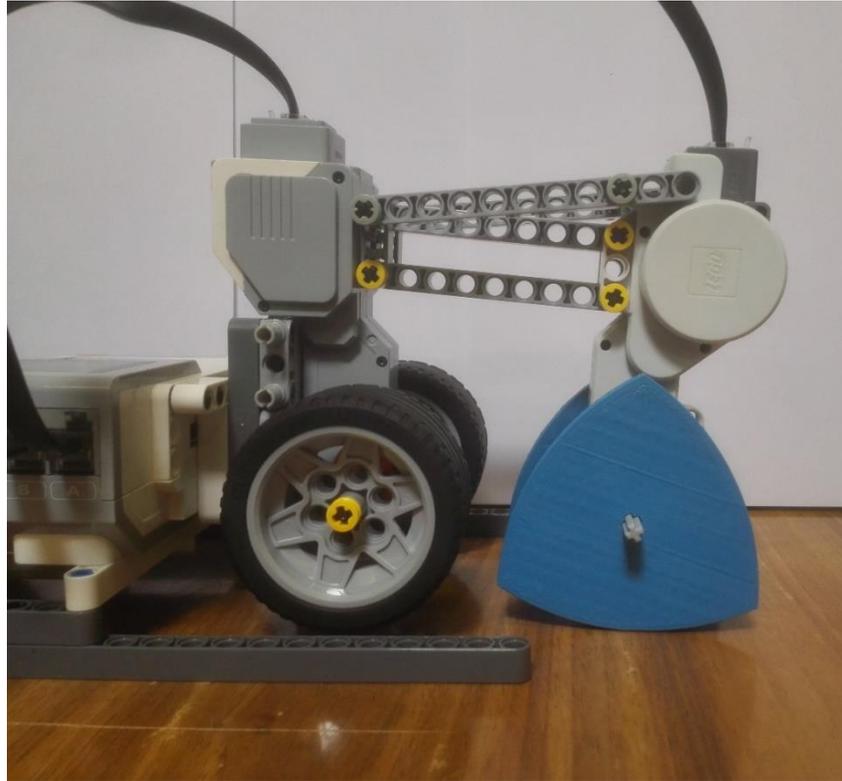


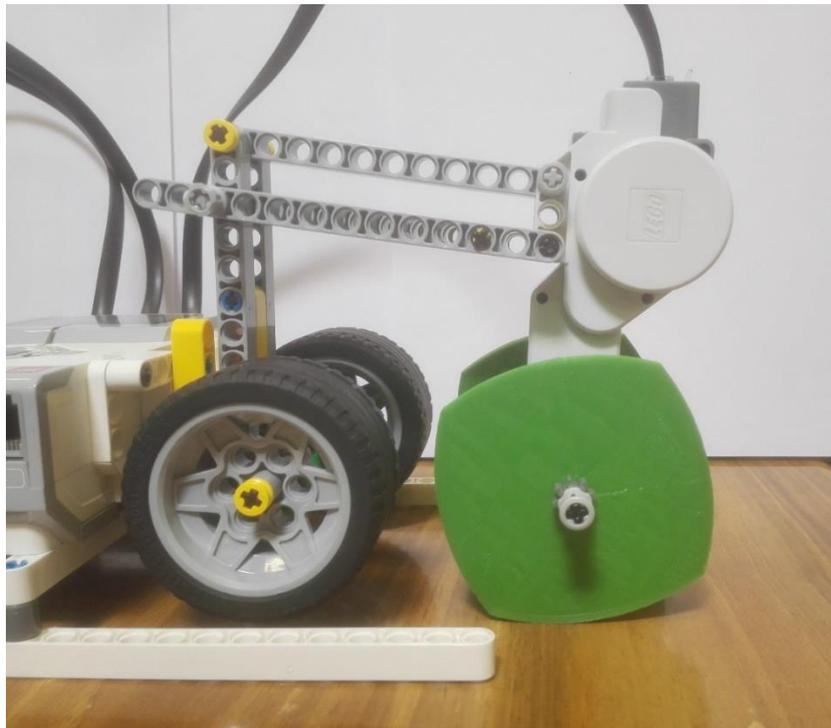
Ilustración 4. Robot

El robot se compone de tres partes principales: El bloque EV3, al que están fijadas las guías laterales que permiten el desplazamiento del mismo sobre la viga, y los dos brazos basculantes donde se sitúan las levas. El hecho de tener dos permitirá llevar cada uno de ellos a distinto ritmo, pudiendo suponer que son dos peatones que caminan a la misma velocidad pero a ritmos distintos. El diseño de cada brazo basculante permite también diferenciar entre pisada derecha e izquierda.

El brazo trasero dispone de dos motores: uno para el giro de las ruedas de tracción, que será el que desplace el robot sobre la viga, y otro que mueva el eje con las levas proporcionando la excitación para el movimiento vertical de la viga. El brazo delantero solamente dispone de un motor para el giro de la leva.

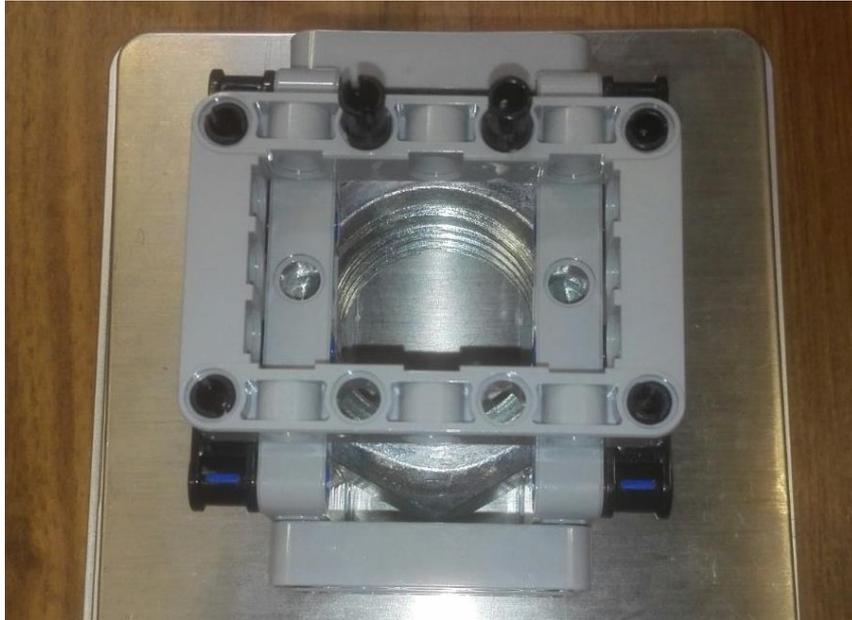


*Ilustración 5. Detalle brazo trasero.*



*Ilustración 6. Detalle brazo delantero.*

Como se puede observar en las ilustraciones 5 y 6 el perfil de las levas delanteras y traseras es distinto. Esto permite generar un patrón de fuerzas diferente, resultando en una mayor variedad de ensayos a analizar.



*Ilustración 7. Masa extra.*

Además, se ha creado un complemento que se puede colocar sobre el brazo para que añada una masa extra al brazo basculante. Se trata de una pequeña caja que encierra una tuerca metálica como se muestra en la ilustración 7.

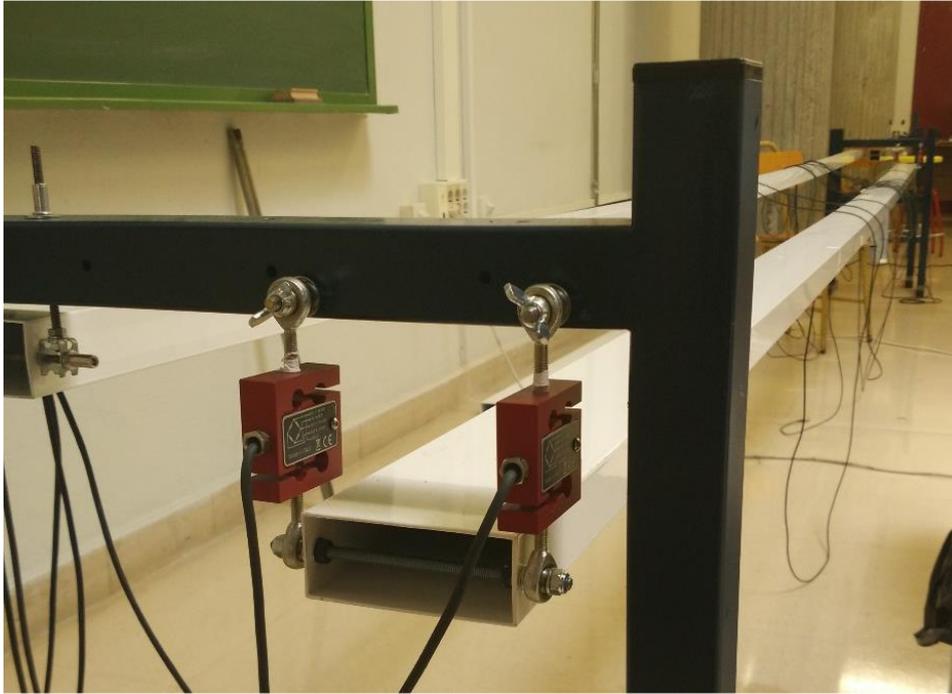
## 2.2. Pasarela

Para la pasarela se dispone de una viga de aluminio de perfil tubular rectangular cuyas características son;

Longitud	6000 mm.
Anchura	100 mm.
Altura	40 mm.
Espesor	1,5 mm.
Densidad	2700 Kg/m <sup>3</sup>
Límite elástico	110 MPa
Módulo de Young	7x10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup>

*Tabla 1. Propiedades de la viga*

Según los datos proporcionados por el fabricante esta viga tiene una tolerancia de  $\pm 10\%$  de espesor,  $\pm 0,3$  mm en altura y  $\pm 0,6$  mm en anchura.



*Ilustración 8. Detalle de las células de carga y viga. [3]*

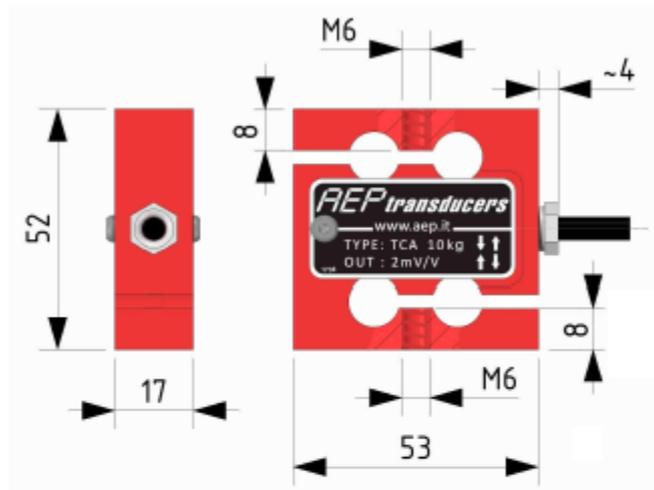
Esta viga se encuentra sujeta en sus extremos por cuatro células de carga (dos a cada extremo) colocadas sobre unos caballetes de la manera que se observa en la Ilustración 8. Las células con su configuración permiten el giro de la viga sobre los apoyos pero no el desplazamiento. A efectos prácticos se puede decir que se comporta como una viga biapoyada (Ver apartado 3.1).

### 2.3. Medición de datos

Para la toma de datos sobre la pasarela se dispone de varios sensores y de una tarjeta de adquisición de datos que servirá de intermediario entre estos y un ordenador.

#### 2.3.1. Células de carga

Las células que se han utilizado son las indicadas en la ilustración 9. Sus especificaciones completas se encuentran en el anexo A. Estas células de carga servirán para la medida de las reacciones en los apoyos.



CODICE CODE	Carico nominale Nominal load	Frequenza naturale Natural frequency
CTCA1K5	1 kg	~ 0.22 kHz
CTCA2K5	2 kg	~ 0.50 kHz
CTCA5K5	5 kg	~ 0.75 kHz
CTCA10K5	10 kg	~ 1.00 kHz
CTCA25K5	25 kg	~ 1.50 kHz
CTCA50K5	50 kg	~ 2.00 kHz

Ilustración 9. Células de carga y tabla de especificaciones. [3]

### 2.3.2. Medidor láser

Para la medida del desplazamiento de la viga se utiliza un sensor láser de alta precisión. Este láser se colocará en el punto medio de la viga para tener una medida de la flecha. Algunas de sus características son:

- Alta resolución: 8  $\mu\text{m}$  (modo-resolución)
- Función del zoom
- Linealidad: 0,1 % (modo-resolución)
- Tiempo de reacción: < 660  $\mu\text{s}$  (modo de velocidad)
- Valor de medida independiente de material, color y brillo.

Una diferencia con otros sensores es que el medidor láser necesita alimentación de corriente. Para proporcionarle corriente se utilizará la salida de la tarjeta de adquisición de datos (Ver ilustración 13).



Ilustración 10. Sensor Láser [3]

Los datos técnicos completos proporcionados por el fabricante de este sensor se encuentran en el anexo B.

### 2.3.3. Acelerómetro

Quizás este sea el sensor más importante en este TFG y del que más información se va a extraer. Este dispositivo mide aceleraciones en un solo eje, por lo que se colocará sobre la viga con ayuda de un imán que se fija a una rosca que posee el propio acelerómetro. De esta manera medirá la aceleración en el eje vertical del punto de la pasarela sobre el que esté colocado.

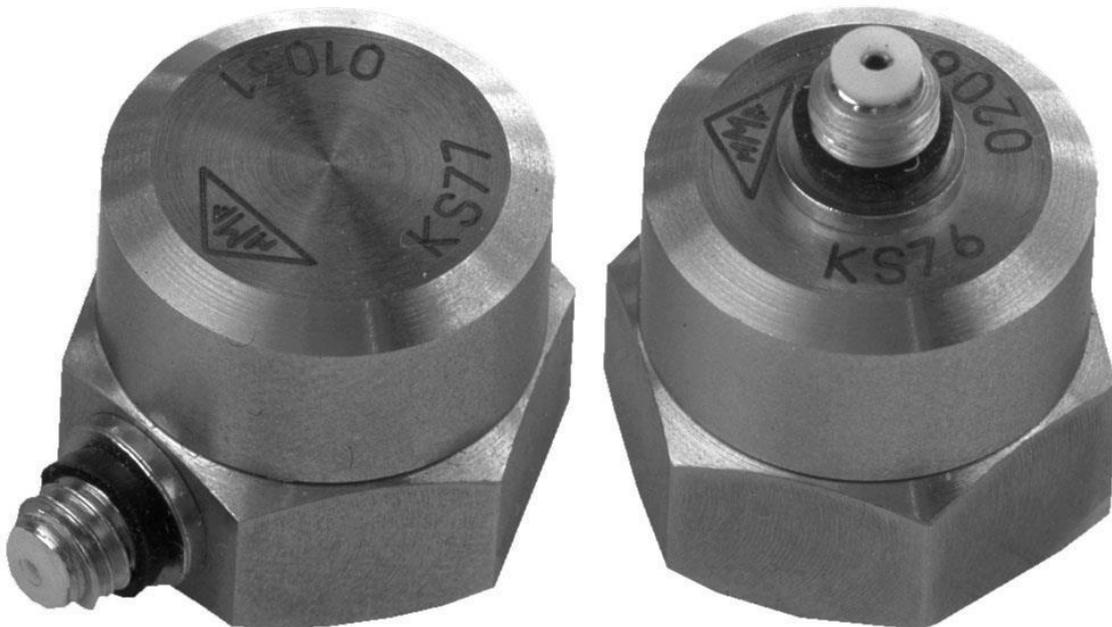


Ilustración 11. Acelerómetro [4]

El acelerómetro utilizado será de tipo piezoeléctrico, denominado por el fabricante como IEPE-ICP METRA MMF KS76C.10/.100. Las características de este se presentarán en el anexo D.

El acelerómetro se situará en el punto medio de la viga para medir la aceleración vertical. En ese punto la viga vibrando en su primer modo tendrá el mayor desplazamiento y la mayor aceleración.

#### 2.3.4. Tarjeta de adquisición de datos

Para llevar la información proporcionada por todos estos sensores a un ordenador donde poder registrarla y procesarla se dispone de una tarjeta de adquisición de datos SIRIUS HD-STG.



Ilustración 12. SIRIUS HD-STG [4]

Este aparato dispone de diferentes entradas y salidas, siendo las más importantes (para una descripción más detallada, ver Anexo C):

- 16 entradas tipo D-SUB para la conexión de sensores.
- Salida tipo USB para conexión con el PC.
- Salida de alimentación para sensores (utilizada para el láser)
- Entrada de alimentación de corriente.

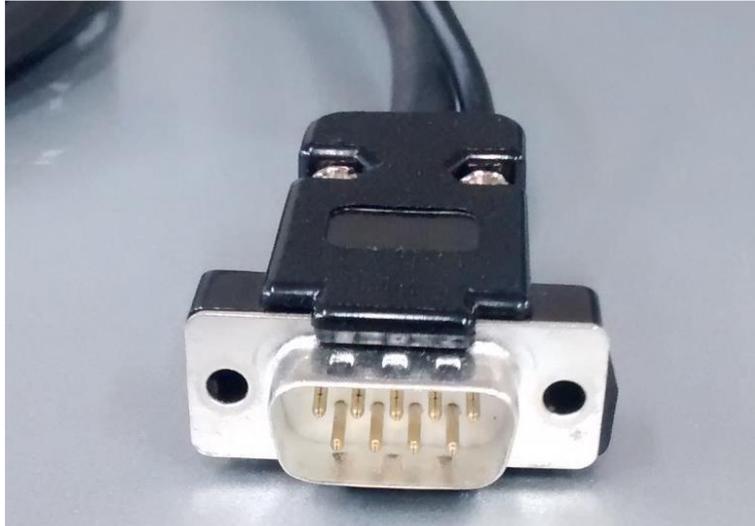


Ilustración 13. Conector D-SUB macho [4]

En la ilustración 12 se ve un conector D-Sub macho, perteneciente al sensor láser. Véase que tiene dos cables, uno de ellos será para la alimentación de corriente (como se comentó en el apartado 1.3.2.3.). En la ilustración 14 se ve de manera más detallada como se realiza dicha conexión.



Ilustración 14. Conexión de la alimentación del láser [4]

El resto de sensores no necesitan de alimentación externa. Solamente con el conector D-SUB acoplado a la tarjeta de adquisición estarán listos para la toma de medidas.

#### 2.3.5. Software de adquisición de datos

El propio fabricante del hardware proporciona el software necesario para medir y registrar los datos proporcionados por los sensores. En este caso se ha utilizado el software Dewesoft X2 versión SP10.

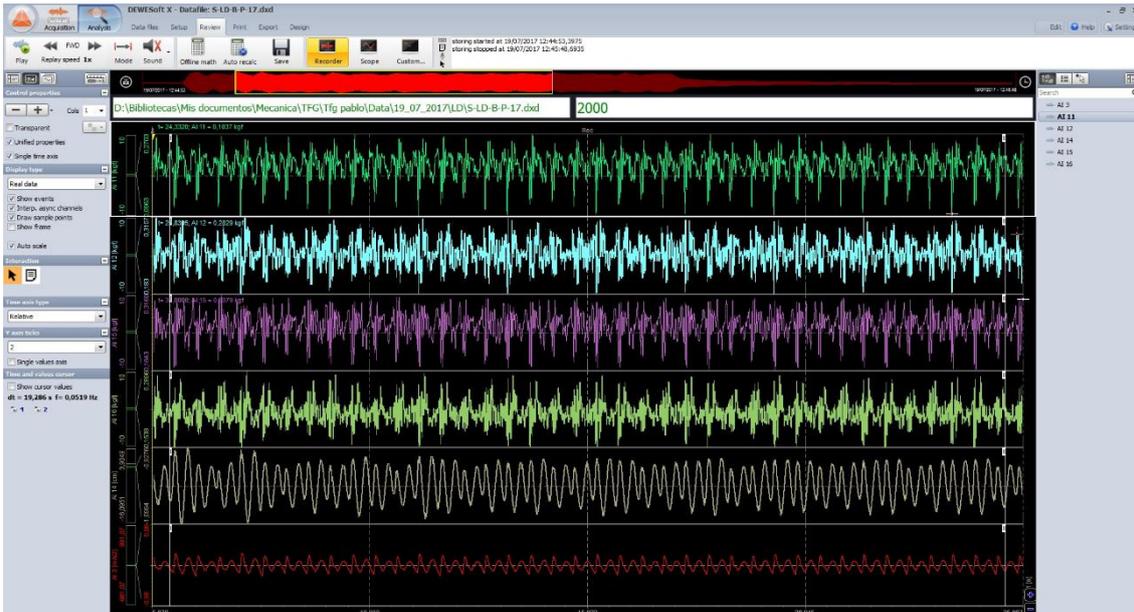


Ilustración 15. Software Dewesoft X2 SP10

Con este software se dispone de una interfaz que permite visualizar en tiempo real la información que recogen los sensores, así como guardarla para una posterior revisión, realizar operaciones con ella (como transformadas de Fourier en tiempo real, suma de sensores,...) o exportar los datos a otro formato reconocible por otro programa (MS Excel, Matlab...) para un tratamiento de dicha información. Su funcionamiento no presenta grandes complicaciones por lo que no se analizará de manera más profunda. En la web del fabricante existe un manual completo que junto a la ayuda del propio programa permite resolver las dudas que se generen al trabajar con él mucho mejor de lo que se podría explicar aquí.

#### 2.4. TMD

Un amortiguador de masa sintonizado o TMD (según sus siglas en inglés; Tuned Mass Damper) es un dispositivo de control de vibraciones. Consta básicamente de una masa móvil y un elemento que disipe la energía. La masa móvil suele ser un péndulo o una ménsula cuya frecuencia natural se sintoniza cercana a la frecuencia natural de la estructura (o aquella cuyos efectos se quieran mitigar). Esto hace que a dicha frecuencia el TMD vibre en resonancia, disipando la mayor cantidad de energía posible a través de su mecanismo de amortiguamiento.

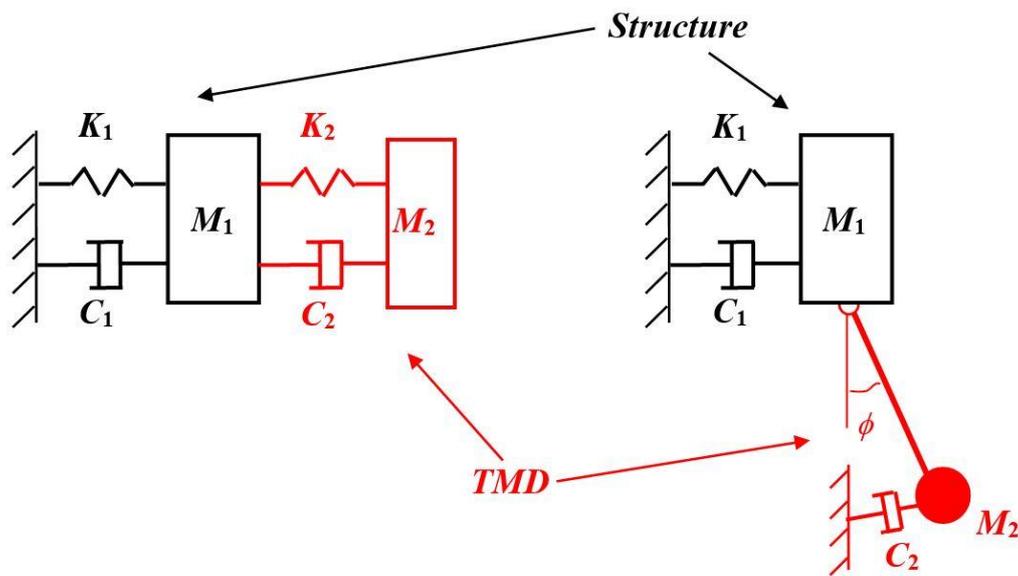


Ilustración 16. Dos tipos de TMD [5]

En este caso el TMD es una ménsula horizontal, uno de cuyos extremos se une a la estructura. En el otro extremo se sitúa la mayor parte de la masa a la que se añade un imán en el extremo. Se posiciona además en esta parte, de forma fija a la estructura, una placa de aluminio (ver ilustración 16). El imán al moverse cercano a la placa genera una serie de corrientes de Foucault que disipan la energía.

Como el TMD se encontrará en algunos ensayos bloqueado y en otros libre, hay que tener en cuenta los efectos que esto puede tener en la estructura. Cuando el TMD está bloqueado todo ello se comporta como parte de la estructura. Al liberarlo parte de la masa del TMD ya no se comporta como tal, por lo que se debe añadir una masa cuando se realicen los ensayos con él libre.

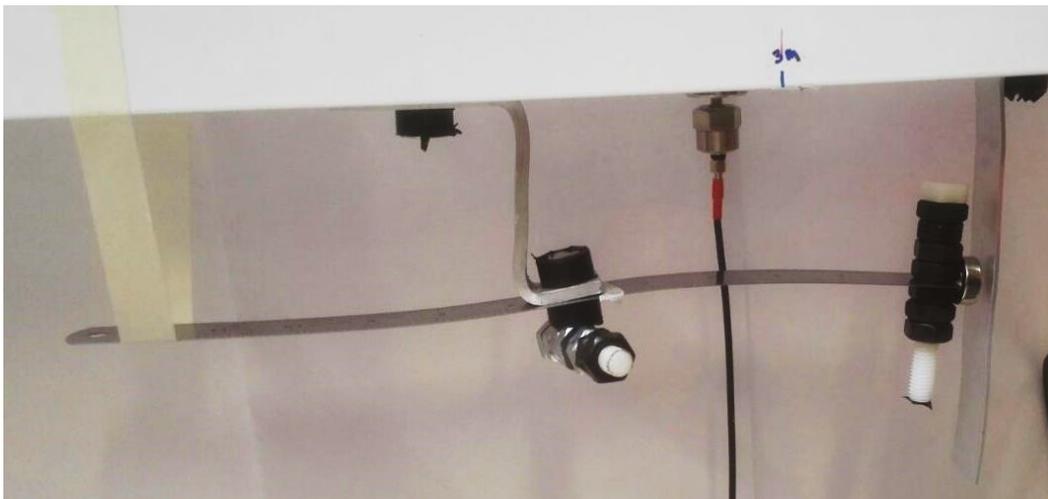
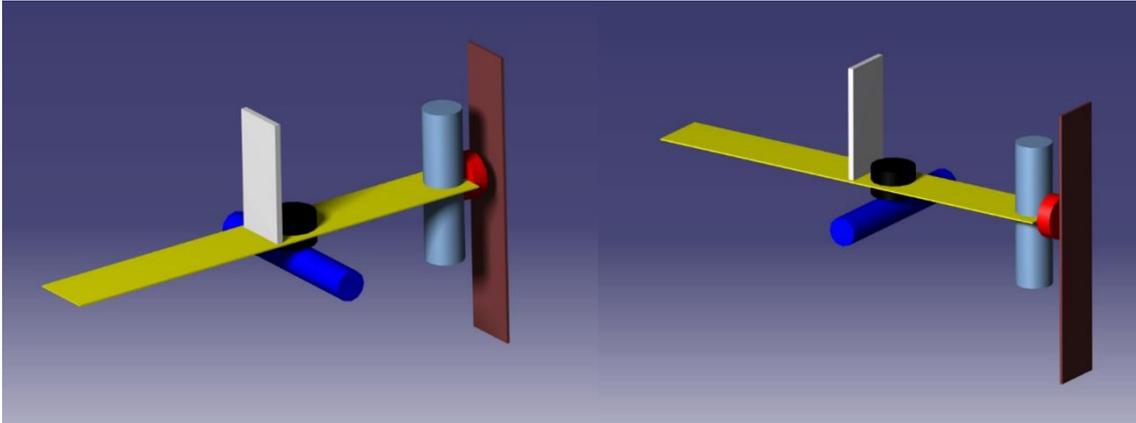


Ilustración 17. TMD y acelerómetro.



*Ilustración 18. Recreación en CATIA del TMD.*

En esta ilustración se observa el TMD tal y como está situado bajo la viga. Se ha realizado un modelo sencillo en CATIA para poder colorear sus partes y poder explicarlo más fácilmente. En el centro (en blanco) se encuentra la parte solidaria a la viga, a la cual unida mediante imanes (en negro) se coloca la ménsula (en amarillo). A la parte derecha se puede observar la placa de aluminio, metal no ferromagnético (en marrón) y el imán (en rojo), en el extremo de la ménsula. En el extremo más cercano a la placa vertical se sitúan una serie de masas (en gris) que regulan la frecuencia natural de movimiento del sistema. Es una de las partes más importantes del TMD, ya que esta masa debe calcularse para que la frecuencia natural del péndulo coincida con la frecuencia de la viga. A este proceso se llama sintonizado del TMD. No es objeto de este TFG el cálculo del TMD, por lo que se trabajará con él ya sintonizado.

Por último, bajo el TMD se sitúan las masas extra (azul), que como se comentó anteriormente, se colocan o retiran del TMD en función de si se encuentra libre o bloqueado, respectivamente.

El bloqueo o liberación del TMD se realiza colocando una sencilla cinta adhesiva en el extremo más cercano a la placa vertical. Se puede observar en la ilustración 17, otra cinta adhesiva colocada en el extremo opuesto de manera similar evita la vibración excesiva de éste.



### 3. Fundamentos teóricos

Como se ha comentado en el apartado anterior, el elemento principal del montaje a escala es una viga biapoyada. Se estudiará su comportamiento teórico estático y dinámico, ya que en el modelo a escala se van a realizar ambos tipos de ensayos.



Ilustración 19. Viga biapoyada.

#### 3.1. Análisis estático

Primero se realizará un análisis estático de este tipo de vigas. Este análisis es ampliamente conocido y sencillo de encontrar resuelto en prontuarios u otro tipo de documentos de consulta. En el montaje del que se dispone como solamente se dispone de sensores de fuerza y de desplazamiento, se presentarán las ecuaciones correspondientes a reacciones en los apoyos y flecha de la viga.

En el análisis estático es de gran importancia la flecha de la viga.  $F$  representará el peso del conjunto del robot, que puede estar en cualquier posición a lo largo de la viga. En este caso se tienen las siguientes expresiones:

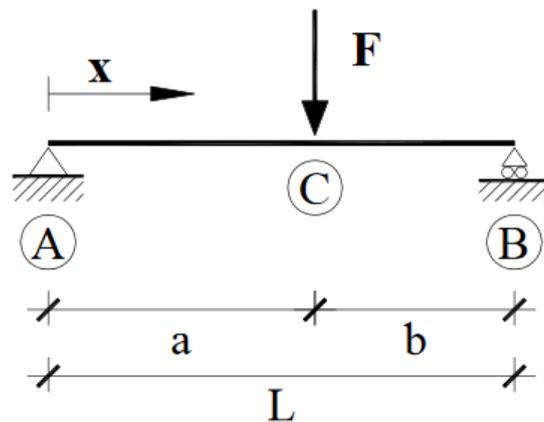


Ilustración 20. Viga biapoyada con carga  $F$  genérica [6]

Reacciones:  $R_A = \frac{Fb}{L}$        $R_B = \frac{Fa}{L}$

Flecha máxima ( $a > b$ ):  $y_{\text{máx}} = \frac{Fb}{9EIL\sqrt{3}} (L^2 - b^2)^{3/2}$       para  $x = \sqrt{\frac{L^2 - b^2}{3}}$

Ecuación 1. Reacciones y flecha en una viga biapoyada con carga puntual no centrada

Hay que tener en cuenta que la flecha máxima en el caso de que la carga no se encuentre centrada ( $a \neq b$ ) no se da en el punto medio, que es donde se sitúa el sensor láser de medición. Por tanto los resultados de la resolución de esta ecuación para los valores del

modelo a escala no se corresponderán con las mediciones obtenidas. Sin embargo el análisis de fuerzas es correcto ya que los sensores de fuerza sí que dan la medida de la reacción en el apoyo directamente. Es importante conocer este dato ya que los elementos estructurales en ocasiones se dimensionan de manera que las deformaciones máximas no superen unos ciertos valores, no solamente teniendo en cuenta su resistencia.

Se puede dar de esta manera una solución analítica al caso estático, que corresponde a colocar una masa puntual sobre la viga. Hay que tener en cuenta que la viga tiene su propio peso, que actuará como una carga distribuida. Un análisis más detenido de estos casos se puede encontrar en el TFG: “Guerra Pajares, Víctor. «Diseño de un sistema móvil a escala para simular las acciones verticales de los peatones sobre las estructuras», 2016. Universidad de Valladolid”.

### 3.2. Análisis modal

Este análisis resulta más interesante para los ensayos que se van a realizar en este trabajo. La viga, por ser un sólido elástico, al verse alterada su posición de reposo tiene una tendencia a vibrar en torno a su posición de reposo a una determinada frecuencia, llamada frecuencia natural. Los valores de esta frecuencia son únicos para cada estructura, dependiendo de sus características y de las condiciones de contorno, pero no de las fuerzas que actúen sobre ella.

Cada estructura presenta diferentes modos de vibración, que son los posibles movimientos armónicos que se pueden dar cuando la excitación sobre la estructura es nula. En la siguiente ilustración se observan los tres primeros modos de vibración de una viga biapoyada.

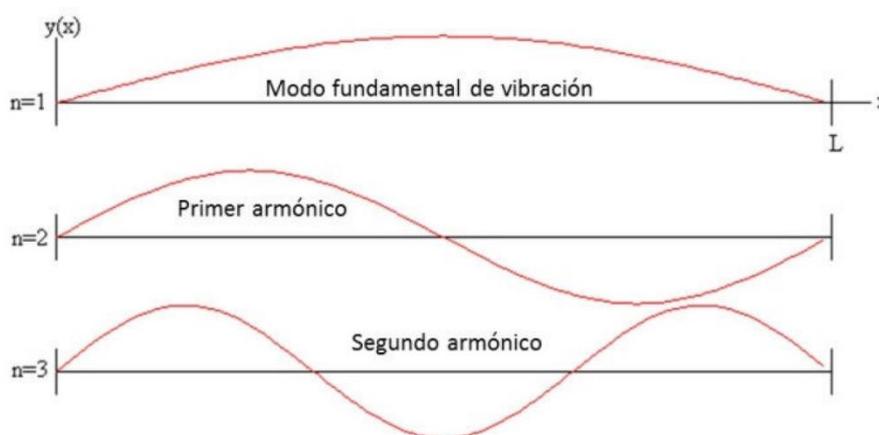


Ilustración 21. Modos de vibración de una viga biapoyada. [7]

Para cada sistema, existe un modo propio por cada grado de libertad. Al tratarse de un sistema continuo, teóricamente presenta infinitos modos de vibración. En la práctica,

solamente los primeros son detectables ya que los demás se ven demasiado amortiguados. Generalmente, el que más preocupa es el primero, ya que es el que se produce a una frecuencia menor. La frecuencia natural es distinta para cada modo. Se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\omega_i(\text{Hz}) = \frac{\lambda_i^2}{2 * \pi * L^2} * \left(\frac{E * I_z}{\rho}\right)^{1/2}$$

*Ecuación 2. Cálculo de frecuencia natural.*

Siendo;

$\lambda_i = i * \pi$        $i = 1, 2, 3 \dots$  (Modo que se va a calcular).

Resto de valores; correspondientes al material y estructura a analizar. En este caso, los valores se encuentran en la tabla 1.

Calculando la ecuación 2, el resultado para los tres primeros modos es:

$\omega_1 = 3,93 \text{ Hz}$                        $\omega_2 = 15,74 \text{ Hz}$                        $\omega_3 = 35,39 \text{ Hz}$

Estas frecuencias son las teóricas de la viga biapoyada. En el caso de estudio, ya que esta soporta además el TMD, los sensores, este valor varía, como se estudiará en el apartado 4.1. Una aproximación teórica se puede realizar con la siguiente ecuación, que considera el caso de viga biapoyada con un peso colocado en el centro de ella.

$$\omega(\text{Hz}) = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{3 E I_z}{L^3 (M_i + 0,4857 m_b)} \right]^{1/2}$$

*Ecuación 3. Frecuencia natural con peso.*

Donde  $M_i$  indica la masa concentrada en el punto central de la viga y  $m_b$  la masa de la propia viga. Como se puede ver, cuanto mayor sea la masa concentrada, menor será la frecuencia natural. Cabe destacar que esta ecuación solamente vale para el caso del primer modo de vibración. Para tener una aproximación con la que poder comparar, se tomará que la masa del robot junto a los sensores es de 850 g, colocados en el punto central. En este caso, la frecuencia natural resulta ser de 3.46 Hz.

### 3.3. Resonancia

La resonancia en una estructura es un fenómeno físico que se produce cuando se aplica al sistema una fuerza periódica cuyo periodo se acerca al periodo natural del sistema. Cuando esto ocurre, la amplitud de las oscilaciones de la estructura se eleva en gran medida, pudiendo llegar a provocar incluso el colapso.

En el caso de pasarelas peatonales, es un fenómeno peligroso cuando la frecuencia natural de la estructura es cercana a la frecuencia de la fuerza generada por un peatón.

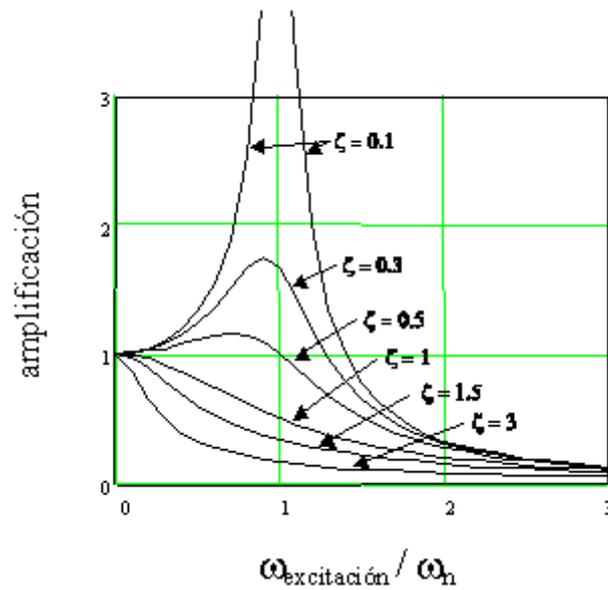


Ilustración 22. Resonancia mecánica. [8].

Como se puede observar en la ilustración 22, cuando la relación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia natural del sistema es igual a 1, la amplificación llegaría a un máximo teórico infinito (si no hubiese amortiguación estructural). Cuanto mayor es el coeficiente de amortiguación, menor es el efecto de la resonancia. Dado que en el caso de estudio el coeficiente de amortiguación es pequeño hay que tener en cuenta que puede manifestarse la resonancia.

### 3.4. Análisis de fuerzas

Ya que el propósito de este TFG es el del análisis de estructuras diseñadas principalmente para el tránsito de peatones, se analizarán las cargas que soportan dichas estructuras y cómo están reflejadas en la normativa. Para comenzar a centrar el estudio de dichas cargas, se puede hacer una clasificación de las fuerzas que actúan sobre una estructura. Una buena clasificación es la siguiente, como se indica en “Acciones, L. Bañón Vázquez. Universidad de Alicante, 2011”:

<b>CRITERIO</b>	<b>TIPO DE ACCIÓN</b>	<b>DEFINICIÓN</b>	<b>EJEMPLOS</b>
<b>Naturaleza</b>	Directas	Se aplican <b>directamente</b> sobre la estructura	Peso propio, viento sobrecargas de uso
	Indirectas	Deformaciones o aceleraciones que <b>inducen esfuerzos</b> en la estructura	Temperatura, asientos, sismo, reológicas
<b>Variación en el tiempo</b>	Permanentes (G)	Actúan <b>en todo momento</b> , constantes en magnitud	Peso propio, cargas muertas, equipamiento
	PVNC (G*)	Actúan en todo momento, pero <b>su magnitud no es constante</b>	Acciones reológicas, acción del pretensado
	Variables (Q)	<b>Pueden actuar o no</b> sobre la estructura en cada momento	Sobrecargas de uso, acciones climáticas
	Accidentales (A)	Su posibilidad de actuación es pequeña pero de gran importancia	Sismo, explosiones, impactos
<b>Variación en el espacio</b>	Fijas	Se aplican siempre en la <b>misma posición</b>	Peso propio y cargas muertas
	Libres	Su <b>posición</b> es <b>variable</b> en la estructura	Sobrecargas de uso

Tabla 2. Tipos de acciones sobre una estructura.[9]

De este modo, las acciones que un peatón provoca sobre una estructura son clasificadas como directas, variables y libres.

La fuerza que el peatón genera al caminar sobre la estructura tiene tres componentes: en dirección vertical, longitudinal y transversal. De estas, la que más importancia tiene es la vertical, ya que es la de mayor magnitud y la que puede provocar más problemas a la estructura, como se puede observar en la siguiente ilustración.

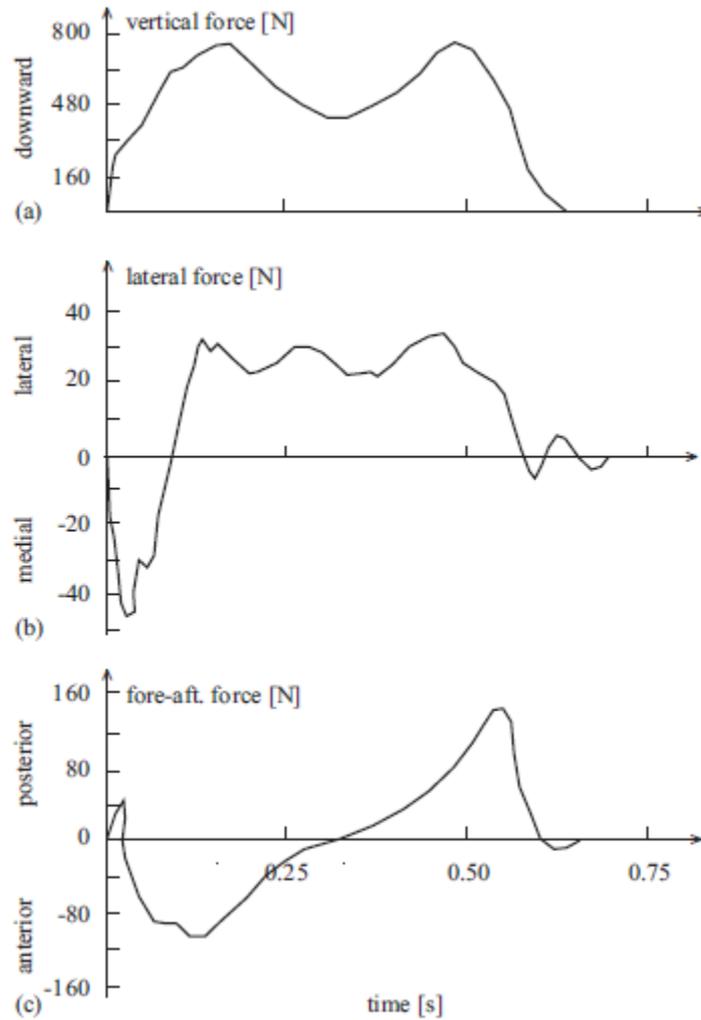


Ilustración 23. Fuerza provocada por un peatón [10]

Además, el modelo a escala se ha realizado pensando en analizar el comportamiento ante cargas verticales; la disposición tanto de los acelerómetros como del sensor láser y las células de carga es la adecuada para ello.

El patrón de fuerzas que genera un peatón es muy variable, ya que depende de varios factores. Los dos más importantes son el peso de la persona y el tipo de movimiento que esté realizando (andar, correr, marchar...), como se puede ver en esta ilustración;

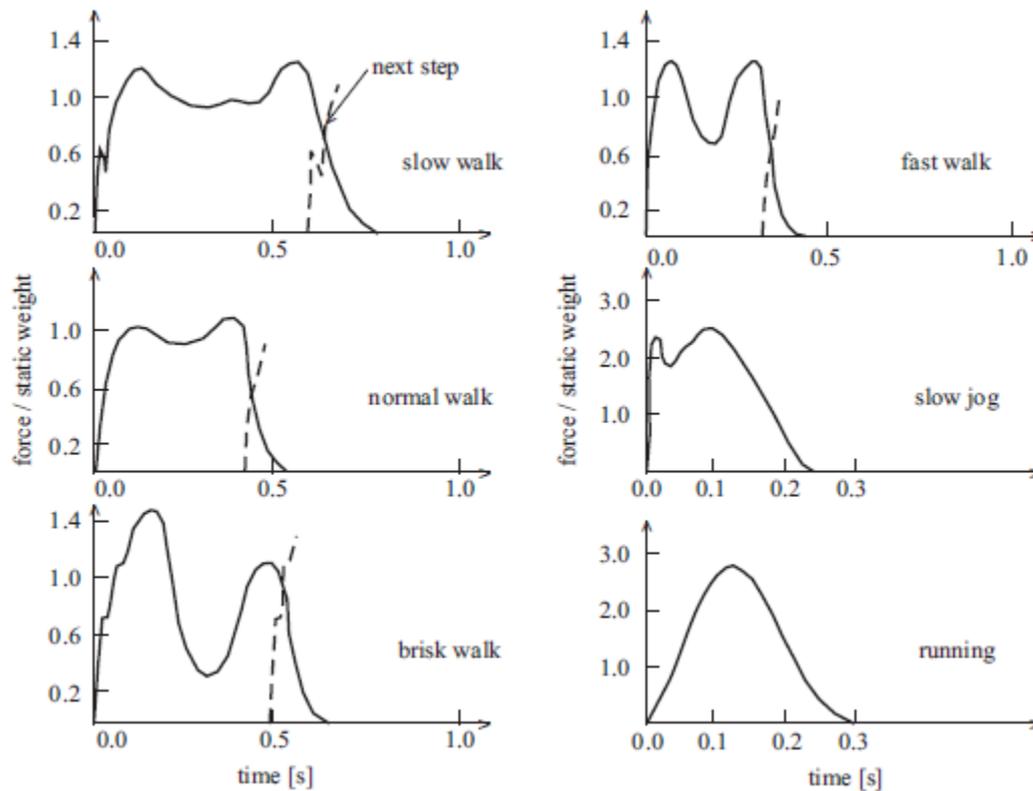


Ilustración 24. Patrones de fuerzas generados por un peatón. [6]

Este patrón de fuerzas es el que se pretende simular mediante las levas del robot. Este desarrollo se encuentra en el TFG: “Muñoz Alonso, Diego. «Diseño y caracterización de un móvil robótico multiconfigurable para simular las cargas verticales sobre una maqueta de pasarela peatonal», 2017. Universidad de Valladolid”. Aquí se utilizará el robot después del estudio y caracterización que allí se ha realizado.

Según investigaciones, la frecuencia al caminar se sitúa entre 1,7 Hz y 2,4 Hz, pudiendo aumentar hasta 3,5 Hz cuando el peatón va corriendo. Cuando esta frecuencia se sitúa en el rango de la frecuencia natural de la estructura puede provocar resonancia. Para el caso bajo estudio en este trabajo, con el robot se puede conseguir fácilmente la frecuencia del primer modo de vibración (en torno a 3,5 Hz) y además se está en los valores habituales de las acciones humanas indicados anteriormente.

### 3.5. Normativa.

Todas las estructuras, según su tipo y función, se encuentran bajo una normativa específica generada por la Administración. En este caso se revisarán las normativas EAE, IAP e ISO referentes a estructuras de acero y pasarelas peatonales.

La normativa EAE (Instrucción del Acero Estructural) es una normativa del Ministerio de Fomento del Gobierno de España. En ella se tratan los Estados Límite que deben cumplir las pasarelas en cuanto a vibraciones y deformaciones. De esta extensa normativa, los artículos que más pueden afectar a este proyecto son los siguientes:

**Artículo 37.3. Estados límite de deformaciones en puentes y pasarelas;**

*El control de deformaciones (desplazamientos y giros) en puentes y pasarelas debe garantizar la adecuada apariencia y funcionalidad de la obra evitando:*

- *Efectos dinámicos amplificados, o no deseados, debidos a impactos del tráfico circulante.*
- *Alteraciones en el correcto funcionamiento del sistema de drenaje.*
- *Impresiones visuales no adecuadas de la geometría final de la estructura.*
- *Sensaciones que afectan al confort de los usuarios.*
- *Alteraciones en las condiciones finales de la rasante (planta, alzado, peraltes) respecto de las alineaciones previstas en el proyecto.*
- *Afecciones al funcionamiento y durabilidad de juntas, apoyos, barandillas, instalaciones, etc., muy sensibles a quiebros o cambios bruscos de pendiente en la deformada.*

*El proyecto deberá definir unas contraflechas teóricas de ejecución tales que, para la totalidad de la carga permanente, y la mitad de los efectos reológicos y de la parte de sobrecargas de la combinación cuasipermanente, la rasante final de la estructura corresponda a la geometría prevista.*

*Los criterios específicos para la comprobación de las deformaciones en servicio de puentes de carretera y pasarelas se podrán ajustar, de conformidad con lo indicado, a lo establecido en la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP).*

### **Artículo 38.3. Estados límite de vibraciones en puentes y pasarelas;**

*Los puentes y pasarelas deben cumplir los requisitos de los estados límite de servicio bajo los efectos dinámicos debidos a las cargas de tráfico, ferrocarril, peatones, bicicletas y viento.*

*Las vibraciones en puentes y pasarelas no deben causar inquietud en los pasajeros de vehículos, circulando o detenidos sobre el tablero, ni en los peatones. También resulta conveniente limitar el nivel de emisión de ruidos a causa de las vibraciones, especialmente en puentes y pasarelas ubicados en entornos urbanos.*

*Tales condiciones se cumplen generalmente cuando la máxima aceleración vertical que pueda producirse, en cualquier zona o elemento transitable por peatones, no supere ciertos valores límite, función del grado de confort exigido. Este requisito afecta únicamente al caso de pasarelas y puentes con aceras transitables.*

*En general, aceleraciones verticales entre 0,50 y 1,00 m/s<sup>2</sup> corresponden a medias de confort, mientras que aceleraciones verticales superiores a 2,50 m/s<sup>2</sup> suelen considerarse inaceptables.*

*Resulta aconsejable que, por razones de confort, las aceleraciones horizontales máximas se sitúen entre 0,1 y 0,3 m/s<sup>2</sup>, en condiciones de uso normal. Valores superiores a 0,8 m/s<sup>2</sup> suelen resultar inaceptables.*

*Para cálculos dinámicos en servicio de puentes de acero se adoptará, salvo justificación específica, un factor de amortiguamiento crítico del 0,2% al 0,4%, que podría llegar a incrementarse hasta un 50% en el caso de puentes mixtos.*

*Las verificaciones de las limitaciones de vibraciones en pasarelas se podrán regir, de conformidad con lo indicado, por los requisitos específicos establecidos en la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP).*

*En general, resultan susceptibles de fenómenos vibratorios que pueden afectar al confort de los peatones las pasarelas cuyas frecuencias fundamentales estén comprendidas en los siguientes rangos críticos.*

*- Para oscilaciones en el plano vertical: entre 1,25 y 4,60 Hz.*

*- Para oscilaciones en el plano horizontal o de torsión: entre 0,50 y 1,20 Hz.*

*En pasarelas cuyas frecuencias fundamentales se sitúen fuera de dichos rangos críticos no suele resultar necesario efectuar ningún análisis dinámico de vibraciones.*

*El rango inferior, entre 1,25 y 2,4 Hz, corresponde a acciones dinámicas debidas a la excitación de peatones andando o corriendo suavemente sobre la plataforma.*

*El rango superior, entre 2,5 y 4,6 Hz corresponde a la influencia del segundo armónico de la excitación generada por la acción de peatones, que puede afectar a pasarelas de acero con bajo amortiguamiento. Las fuerzas dinámicas ejercidas en este segundo rango son, en cualquier caso, inferiores a las del rango anterior citado y, por tanto, el riesgo de excitación no tolerable será menor.*

*La acción debida a peatones corriendo a cierta velocidad corresponde aproximadamente a una excitación de frecuencia entre 2 y 3,5 Hz, aunque resulta poco susceptible de sincronizarse para grupos de  $d$  peatones corriendo.*

*Resulta difícil establecer de forma estricta los valores límite para las condiciones de confort del servicio. La dificultad para definir las hipótesis pésimas de las sollicitaciones (número de peatones, frecuencia y velocidad de paso sobre la estructura), así como los criterios, muy subjetivos, de aceptación de los niveles de percepción por los usuarios, explican las divergencias y ausencias de concreción de la mayoría de las reglamentaciones.*

*Si los análisis dinámicos efectuados no resultan satisfactorios, podrá recurrirse a ciertas regulaciones del uso de la pasarela o, alternativamente, a proyectar dispositivos específicos de amortiguación (amortiguadores de masas sintonizadas, por ejemplo) que, adecuadamente calibrados, puedan resultar muy eficaces.*

Como se puede ver, en este artículo ya se habla de la posibilidad de utilizar TMD's para el control de vibraciones. Como se ha visto en apartados anteriores, la frecuencia del peatón está en el rango susceptible de provocar resonancia en nuestra estructura.

Otra normativa a observar es la IAP-11 (Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera) de la Dirección General de Carreteras, perteneciente al Ministerio de Fomento. Aunque esta normativa trata fundamentalmente sobre

puentes de carretera, en alguno de sus apartados hace referencia a pasarelas peatonales, presentando una pauta a seguir en cuanto a acciones variables y estados límite de vibraciones.

**Artículo 4.1.8. Acciones variables. Sobrecarga de uso en pasarelas.**

*Para la determinación de los efectos estáticos de la sobrecarga de uso debida al tráfico de peatones, se considerará la acción simultánea de las cargas siguientes:*

*a) Una carga vertical uniformemente distribuida  $q^{\rightarrow}$  de valor igual a 5 kN/m<sup>2</sup>.*

*b) Una fuerza horizontal longitudinal Q de valor igual al 10% del total de la carga vertical uniformemente distribuida, actuando en el eje del tablero al nivel de la superficie del pavimento.*

*Ambas cargas se consideran como una acción única, cuyo valor constituye el valor característico de la sobrecarga de uso cuando se combina con el resto de las acciones (cargas permanentes, viento, etc.).*

*La fuerza horizontal Q será en general suficiente para asegurar la estabilidad horizontal longitudinal de la pasarela; no así la estabilidad horizontal transversal, que deberá asegurarse mediante la consideración de las acciones correspondientes.*

*A efectos de las comprobaciones locales, se considerará una carga vertical puntual Q de valor igual a 10 kN, actuando sobre una superficie cuadrada de 0,10 m de lado.*

**Artículo 7.2.2. Estado Límite de vibraciones en pasarelas peatonales.**

*En general, con las salvedades indicadas en este apartado, se considerará verificado el estado límite de servicio de vibraciones en pasarelas peatonales si sus frecuencias naturales se sitúan fuera de los dos rangos que figuran a continuación.*

*- Rango crítico para vibraciones verticales y longitudinales: 1,25 a 4,60 Hz.*

*- Rango crítico para vibraciones laterales: 0,50 a 1,20 Hz.*

*En aquellas pasarelas cuyas frecuencias naturales se encuentren dentro de estos rangos, será necesario efectuar estudios dinámicos específicos para asegurar los requisitos de confort de los peatones.*

*Los requisitos de confort se establecerán en el proyecto de forma razonada en función de la categoría de la pasarela (zona urbana con tráfico peatonal intenso, uso medio, baja utilización en zona rural, etc.) y de la situación de proyecto considerada (tipo de tráfico peatonal asociado a su probabilidad de ocurrencia). Como referencia, podrán adoptarse los valores límite de aceleraciones que figuran en la tabla siguiente:*

GRADO DE CONFORT	RANGOS DE ACELERACIONES	
	VERTICALES	LATERALES
Máximo	< 0,50 m/s <sup>2</sup>	< 0,10 m/s <sup>2</sup>
Medio	0,50 a 1,00 m/s <sup>2</sup>	0,10 a 0,30 m/s <sup>2</sup>
Mínimo	1,00 a 2,50 m/s <sup>2</sup>	0,30 a 0,80 m/s <sup>2</sup>
No aceptable	>2,50 m/s <sup>2</sup>	> 0,80 m/s <sup>2</sup>

Tabla 3. Valores de referencia de aceleraciones para confort de los peatones.

Los modelos de carga dinámica considerados deberán ser representativos de las condiciones de tráfico previstas para las situaciones de proyecto analizadas, contemplando la densidad de los flujos peatonales, el ritmo de sus movimientos, la sincronización entre peatones, etc.

Estos valores son fácilmente medibles en la estructura bajo estudio. El acelerómetro se encuentra en la posición idónea para ello. Una extrapolación de los resultados de un modelo a escala hacia esta normativa es complicada, por lo que no se tendrá en cuenta en los ensayos del modelo a escala.

Otras normativas a que recogen el comportamiento de este tipo de estructuras son la norma UNE-ISO 2631 y la ISO 10137-2009. La primera evalúa la exposición humana a las vibraciones de cuerpo completo, y la segunda trata sobre los estados límite de servicio en cuanto a vibraciones de edificios y pasarelas.



## 4. Proceso experimental

Este TFG se basa en la experimentación, por lo que en este apartado se procederá a explicar en qué consisten y qué se busca con cada uno de los ensayos. Se diferenciarán primero los ensayos en dos tipos: estáticos y dinámicos. Los primeros se utilizarán para la calibración y comprobaciones y los dinámicos para un análisis del TMD y sus efectos.

### 4.1. Ensayos estáticos

Estos ensayos se realizarán con masas conocidas. Primero se utilizará una báscula para medir la masa de un elemento, y posteriormente se colocará éste en la viga. Se analiza la masa obtenida en ambos casos y se puede ver la exactitud de la medida de las células de carga.

Para ello se pesarán distintos objetos. Primero, una bola metálica con una cara plana, que permite su apoyo sobre la estructura. También se pesará el robot, el acople con la masa complementaria para la leva y el conjunto de tuercas que se colocan o retiran del TMD en función de si se encuentra bloqueado o libre. Cada una de las mediciones se repetirá tres veces.

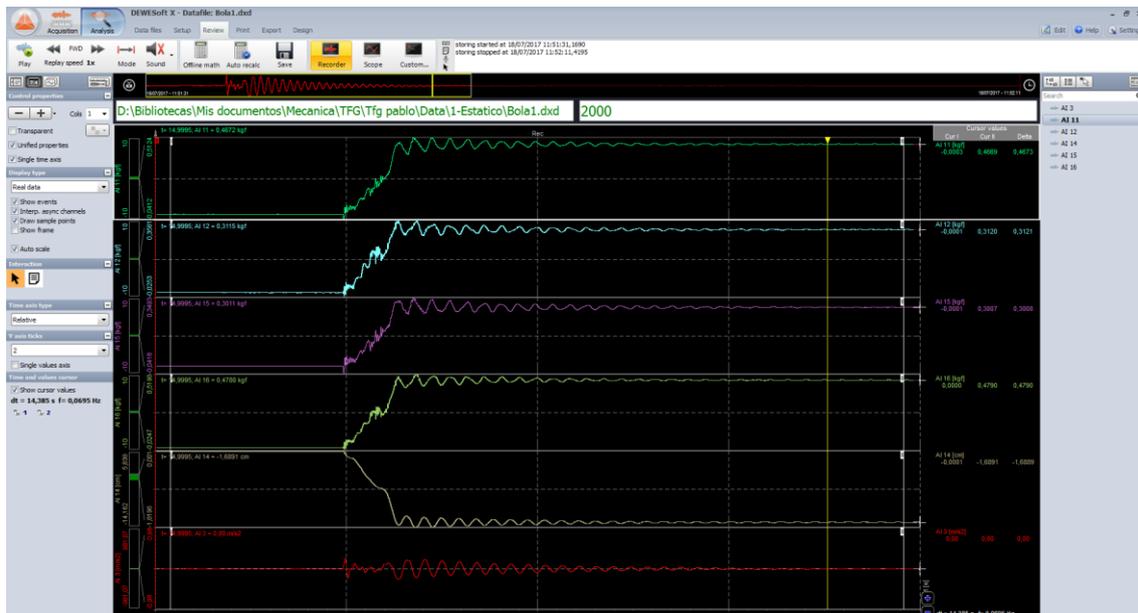


Ilustración 25. Captura de datos en el software Dewesoft

En este caso el TMD se encontrará libre, para facilitar la vuelta al estado estático después de colocar la masa en la viga. El elemento a medir se colocará en el centro de la viga. Como el software DEWESOFT da la información de cada sensor por separado, para obtener la medida total habrá que sumar la de los cuatro sensores. Esto se puede hacer “online”, es decir, en tiempo real dando el orden al programa de que muestre la suma de varios sensores, y también “offline”, una vez registrada la información

Bola 1		Tuercas 1		Tuerca robot 1		Robot 1	
Masa balanza	1566,8	Masa balanza	657,1	Masa balanza	222,1	Masa balanza	792,7
Masa viga	1557,2	Masa viga	644,7	Masa viga	215,3	Masa viga	784
Error	9,6	Error	12,4	Error	6,8	Error	8,7
Error %	0,61	Error %	1,89	Error %	3,06	Error %	1,10

Bola 2		Tuercas 2		Tuerca robot 2		Robot 2	
Masa balanza	1566,8	Masa balanza	657,1	Masa balanza	222,1	Masa balanza	792,7
Masa viga	1556,2	Masa viga	652,3	Masa viga	217,5	Masa viga	785,7
Error	10,6	Error	4,8	Error	4,6	Error	7
Error %	0,68	Error %	0,73	Error %	2,07	Error %	0,88

Bola 3		Tuercas 3		Tuerca robot 3		Robot 3	
Masa balanza	1566,8	Masa balanza	657,1	Masa balanza	222,1	Masa balanza	792,7
Masa viga	1555,5	Masa viga	646,8	Masa viga	215,1	Masa viga	788,8
Error	11,3	Error	10,3	Error	7	Error	3,9
Error %	0,72	Error %	1,57	Error %	3,15	Error %	0,49

Tabla 4. Ensayos estáticos.

Se observa una ligera tendencia a la disminución porcentual del error cuanto mayor es la masa que se mide. Sin embargo, el error solamente supera el 3% en dos casos, pesando la tuerca que se usa como peso extra en la leva, por lo que se puede admitir la calibración de las células de carga como válida para las mediciones que se van a realizar.



Ilustración 26. Medida de diferentes elementos en la báscula.

## 4.2. Ensayos dinámicos

### 4.2.1. Introducción

Estos ensayos se separarán en dos grandes grupos; con el robot estático en el centro de la viga, sobre el TMD, y con el robot en tránsito circulando sobre la viga. Se van a estudiar diversos casos para realizar una comparación entre ellos, teniendo en cuenta diversas variables que se van a controlar.

La primera de esas variables será la leva que se utilice. Como se observa en las ilustraciones 5 y 6, el robot dispone de dos levas con diferentes perfiles; una leva triangular y otra cuadrada. Cada una de estas levas nos dará un perfil de fuerzas distinto.

La siguiente variable será la velocidad de rotación de la leva. En el software LEGO Mindstorms se ha realizado la programación del robot, controlando desde él la velocidad de los motores. Este software ofrece la posibilidad de decidir la velocidad de giro en función del tanto por ciento de potencia que se suministre al motor. Para cada caso se trabajará con tres programas diferentes; uno en el que el movimiento de la leva coincida con la frecuencia natural de la estructura, otro en el que la potencia sea un 10% mayor y otro un 10% menor.

Como se ha comentado anteriormente, a cada una de las levas del robot se le puede colocar un peso extra sobre ella. Esto hace que la fuerza que genera la leva sea mayor.

La última variable a controlar será el estado del TMD; bloqueado o desbloqueado. Cuando se encuentra bloqueado es solidario a la estructura, no teniendo efecto dinámico sobre ella. Cuando se libera mitiga el movimiento de la viga, como se comprobará en los próximos apartados.

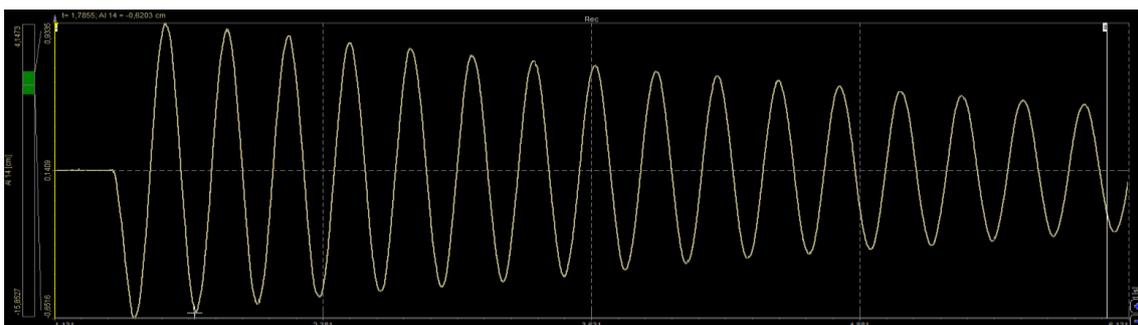
Se dispone por tanto de numerosos ensayos en distintas condiciones. Para cada uno de ellos se ha realizado la toma de datos con el software DEWESOFT x2, almacenando los registros de las cuatro células de carga, el sensor láser de posición y el acelerómetro situado en el centro de la viga. Por tanto, la cantidad de datos a analizar es muy grande. Se tratará de comprimir en tablas y gráficas dónde se muestren los resultados de manera sencilla y concreta.

Para comenzar estos ensayos se calculará la frecuencia natural de la viga. Esta se calculará a partir de los datos recogidos en DEWESOFT. Con la viga en estado de reposo, se le aplicará un impulso y se dejará mover libremente, registrando los valores. De los múltiples registros tomados, el que ofrece una gráfica más limpia y con menos ruido es el del sensor láser de distancia, que se utilizará para este sencillo cálculo. Midiendo el tiempo entre dos picos consecutivos se sabrá el periodo natural de la viga, según la fórmula:

$$f = \frac{1}{T}$$

*Ecuación 4. Frecuencia y periodo*

Se medirá el intervalo de tiempo entre los 10 primeros picos positivos y se realizará una media.



*Ilustración 27. Respuesta a impulso con TMD bloqueado.*

El tiempo medio entre picos es de 0.286s. Por tanto, la frecuencia natural del sistema es de 3.49 Hz. Este ensayo se ha realizado con el TMD bloqueado para que los picos sean más notables y tengamos más datos para realizar la medida.

Ahora se realizará este ensayo con el TMD liberado, para tener una primera idea de cómo afecta al movimiento de la estructura.

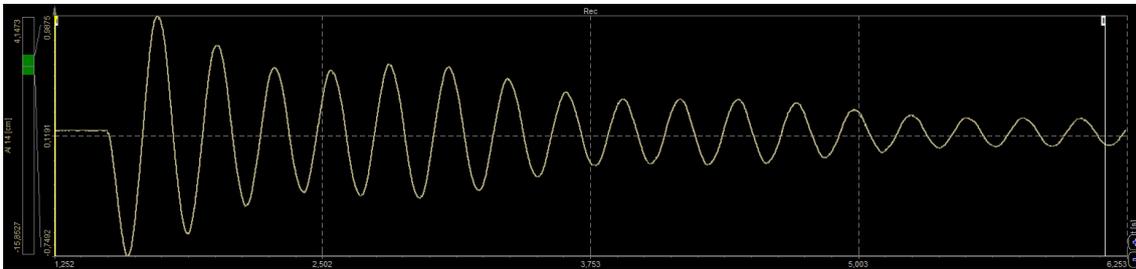


Ilustración 28. Respuesta a impulso con TMD libre.

Se observa ya una gran diferencia entre las dos ilustraciones. En ilustración 27 se puede ver cómo el amortiguamiento es pequeño y constante, mientras que en la ilustración 28 es mayor y con irregularidades. Sin embargo, al no ser una respuesta a una misma acción, ya que el impulso se ha realizado mediante un golpe que no se ha medido, no sirve este ensayo para sacar conclusiones de mayor relevancia.

Operando del mismo modo que para el primer ensayo, se ha obtenido que la frecuencia natural en este caso es de 3.69 HZ. Esta ha variado pero no en un grado significativo. Esto puede ser debido a que la masa extra que se coloca en el TMD cuando se libera no sea exactamente la que se necesita para que el hecho de liberarlo no afecte a la estructura. No se tomarán medidas ya que no es un hecho que afecte en gran medida al resultado.

Como el robot que se va a utilizar tiene una masa considerable (unos 790g) se verá el efecto que esto tiene sobre la frecuencia natural de la estructura. Se realizará el mismo ensayo, pero esta vez colocando el robot sobre la estructura en su parte central, la ubicación para realizar los ensayos con las levas.

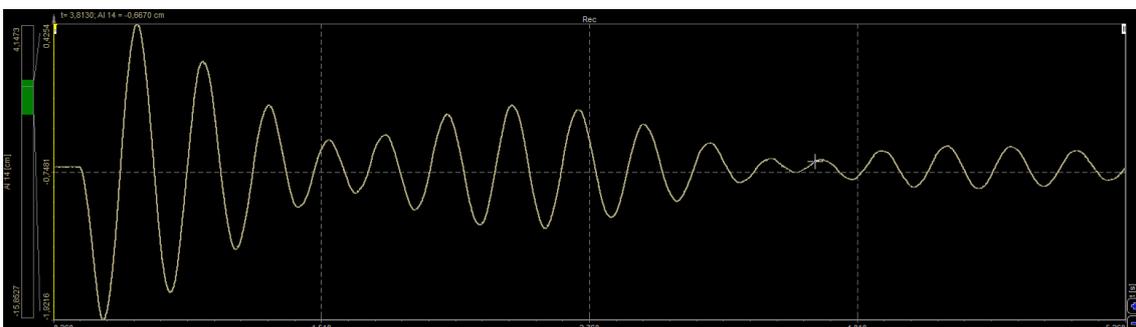


Ilustración 29. Respuesta a impulso con el robot sobre la viga.

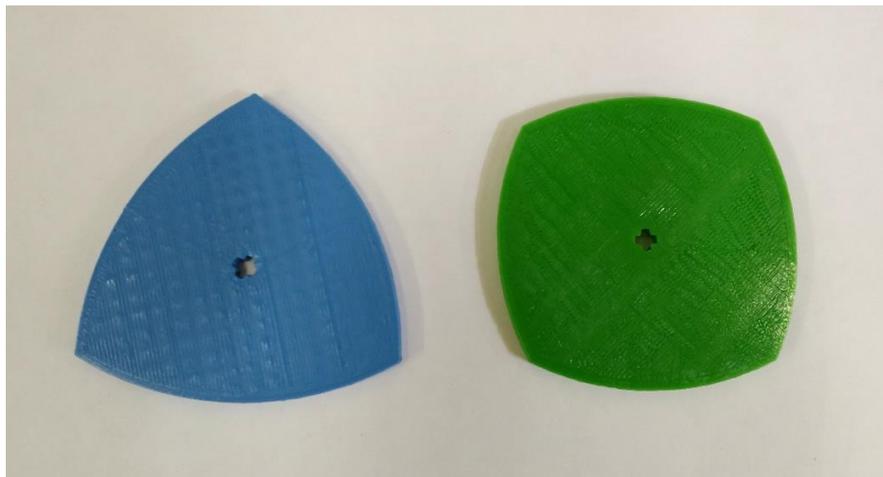
Se puede observar en la ilustración 29 un amortiguamiento desigual y elevado. En este caso la frecuencia natural se sitúa en 3.35 HZ. Se observa que al añadir masa a la viga la frecuencia natural se reduce. Estas tres frecuencias varían de lo predicho en la teoría (Ver apartado 3.2), pero no afectan al desarrollo de los ensayos.

Una vez realizado este cálculo, se procederá a los ensayos con el robot. Para separar los ensayos en dos grandes bloques, se tratarán por separado los ensayos con el robot estático sobre el centro de la viga y en tránsito. Esto permite una mejor comparación entre ellos, ya que dentro de cada bloque los ensayos tienen muchas características comunes.

Dentro de este gran bloque de ensayos, se van a separar los realizados con el perfil de leva delantero (triangular, azul) y el trasero (cuadrado, verde) que se observan en la ilustración 30.

Para los ensayos el robot se situará, una vez puestos a cero los sensores, sobre el centro de la viga. Como la viga se encuentra marcada a lo largo de su lateral, como se ve en la ilustración 17, se utilizará la marca de los 3 metros como posición central del robot sobre la pasarela.

Mediante el software Mindstorms se controlará el robot, dando la orden al motor que mueve la leva delantera para que comience a girar. Como la señal que regula la velocidad de giro de la leva se manda desde el ordenador en forma de tanto por ciento de potencia, calcular una potencia para que los impulsos de la leva generados sobre la estructura coincidan con la frecuencia natural de esta es muy complicado. Además, se tiene que la leva va a tener en ocasiones un peso añadido sobre ella, por lo que a igual tanto por ciento de potencia la velocidad de giro será distinta. Visto esto, el cálculo de la velocidad necesaria para que el giro de la leva coincida con la frecuencia de resonancia del sistema se realizará por prueba-error. El cálculo de este valor numéricamente llevaría un trabajo teórico costoso y de escaso interés. Por tanto se ha optado por un método más práctico.



*Ilustración 30. Perfiles de leva delantero y trasero.*

Las diversas variables que se van a analizar se han codificado mediante ciertas letras, para poder organizar de una mejor manera los ensayos y conocer en todo momento

sobre qué ensayo se está trabajando de un vistazo. De aquí en adelante se utilizará esta nomenclatura para referirse a los diversos ensayos;

Estado del robot	
S	Estático
W	Tránsito
Leva utilizada	
LD	Leva delantera
LT	Leva trasera
Estado del TMD	
B	Bloqueado
SB	Sin bloquear
Peso extra	
P	Con peso
SP	Sin peso

*Tabla 5. Codificación de los ensayos.*

Además de estas siglas, cada ensayo tiene un número representativo del tanto por ciento de potencia aplicada al motor.

#### 4.2.2. Ensayos S-LD

El proceso experimental comenzará utilizando las siguientes condiciones:

Robot estático → S

Leva delantera → LD

TMD bloqueado → B

Sin peso extra → SP

Se llamará a este bloque de ensayos S-LD-B-SP. Según se ha comentado antes, los tres ensayos en estas condiciones se realizarán a un 18%, 28% y 38% de la potencia del motor.

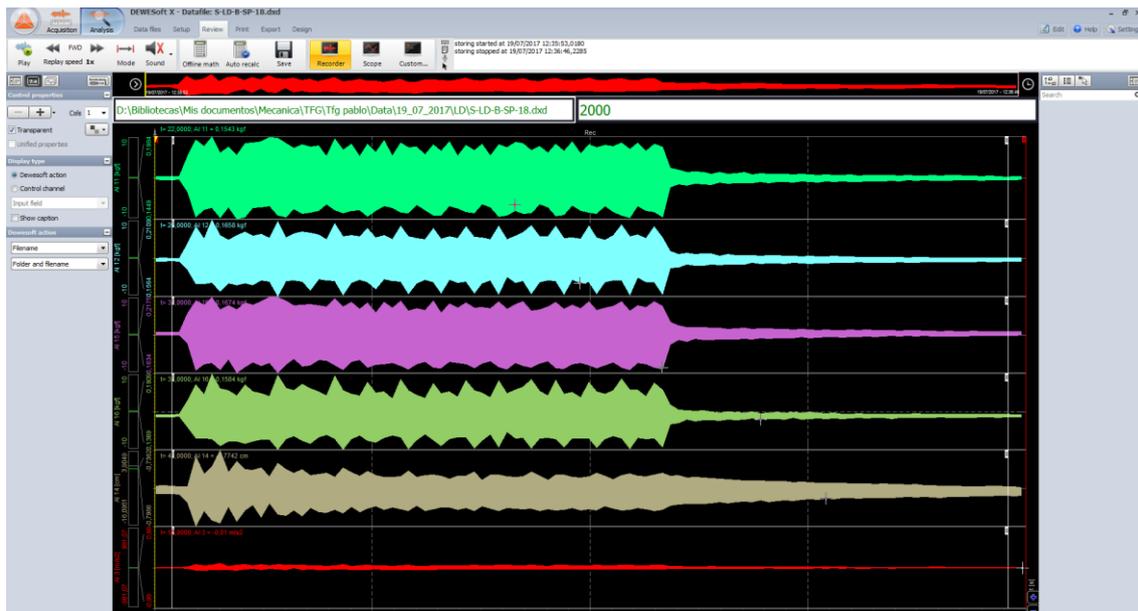


Ilustración 31. Ensayo en DEWESOFT

En la ilustración 31 se observa el registro del software “en bruto” del primer ensayo (S-LD-B-SP-18), una vez grabado el ensayo y sin ningún tipo de procesamiento. Como es lógico, de esta manera no se puede obtener ninguna conclusión fiable ni ninguna medida interesante. Para ello, se utilizará una herramienta del programa que permite el volcado de los datos a un fichero Excel.

Para poder comparar los datos de manera objetiva, para cada ensayo se ha tomado un intervalo de 10 segundos. Siempre partiendo del reposo y midiendo desde 0.5 segundos antes del primer impulso. Después de diversas pruebas se ha comprobado que la señal con menos ruido y que permite una mejor manipulación es la captada por el acelerómetro. Por tanto las gráficas para las comparaciones entre los diversos ensayos se van a realizar sobre esa señal.

Una vez trasladados los datos a la hoja de cálculo, se graficarán los tres ensayos para poder tener una comparación directa. Siempre se va a utilizar el mismo código de colores para que a primera vista los resultados sean más visibles. En azul se encontrará la gráfica correspondiente a la velocidad de giro de la leva que provoca la resonancia en la estructura, en verde la velocidad menor y en naranja la mayor.

#### 4.2.2.1. Ensayos S-LD-B-SP

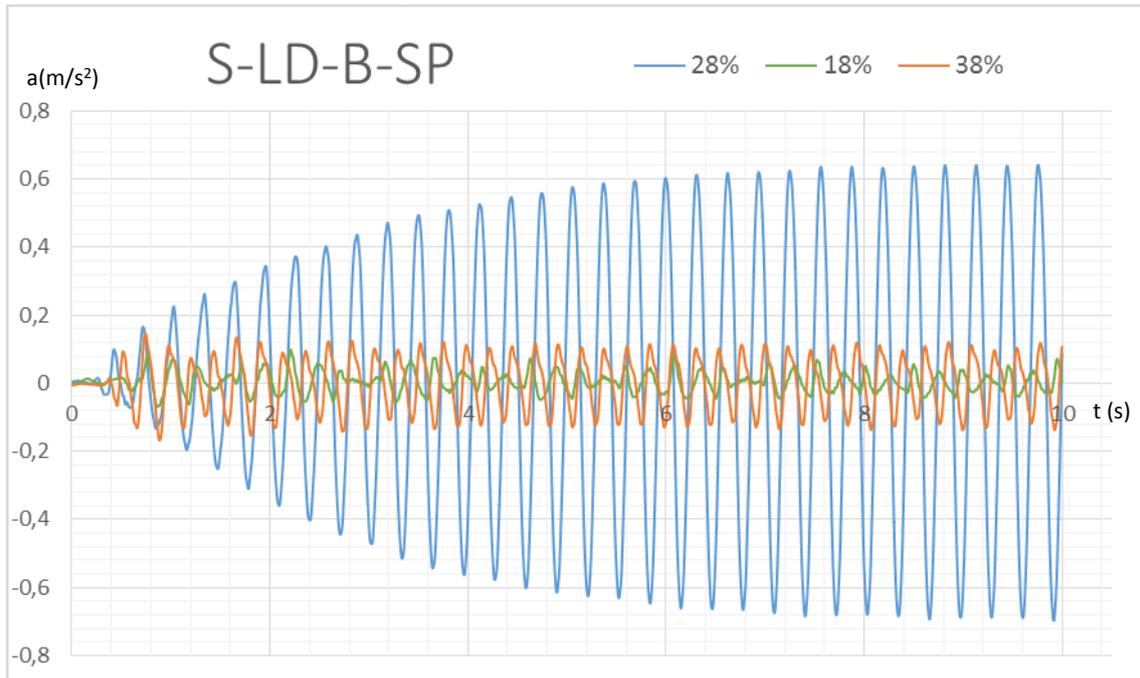


Ilustración 32. S-LD-B-SP

Se observa el fenómeno de la resonancia. Para una determinada velocidad de giro de la leva, la aceleración va aumentando, así como el desplazamiento y las cargas soportadas por los apoyos sin que la fuerza que la produce aumente. Para una velocidad menor o mayor, la aceleración sufrida por el punto medio de la viga es mucho menor.

Se ha escogido la gráfica de aceleraciones ya en ella se puede observar fácilmente el comportamiento de la viga ya que ofrece resultados con poco ruido. El resto de los datos se han analizado numéricamente y se presentan los resultados en una tabla, de la siguiente manera:

18	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,031	0,048	0,045
MIN	-0,029	-0,043	-0,043
DIF	0,060	0,092	0,088
RMS	0,131		
28	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,328	0,202	0,201
MIN	-0,333	-0,202	-0,198
DIF	0,661	0,403	0,400
RMS	0,433		
38	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,044	0,077	0,084
MIN	-0,048	-0,051	-0,058
DIF	0,093	0,128	0,142
RMS	0,279		

Tabla 6. S-LD-B-SP

Esta tabla contiene muchos datos interesantes. En primer lugar se tiene como cabecera el ensayo que se ha realizado, según el tanto por ciento de potencia del motor. La columna “DESPL CORREGIDO” nos da el valor del desplazamiento, máximo y mínimo, una vez restando la media de todos los desplazamientos del ensayo. Estos valores se dan en centímetros. Se ha realizado esta operación para poder tener un valor objetivo con el que poder comparar los distintos casos. La columna “PD CORREGIDO” indica el valor de la suma de las células de carga del extremo derecho pero corregido restando su media, de igual manera que con el desplazamiento. La columna “PI CORREGIDO” da la misma información que la anterior, pero de las células de carga del extremo opuesto. Estas dos columnas están expresadas en kgf. En cada una de estas tres columnas se ha obtenido el valor máximo, mínimo y la diferencia entre ambos. Por último, se ha calculado el RMS o valor eficaz de la aceleración. De este modo, se tiene un indicador para comparar ensayos de manera rápida. En la siguiente tabla se presentará un pequeño resumen de esta, comparando cada caso con el de resonancia expresando sus diferencias en tanto por ciento.

	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO	RMS
18	9,13	22,7	22,04	30,15
38	14,03	31,72	35,44	64,53

Tabla 7. S-LD-B-SP comparación.

#### 4.2.2.2. Ensayos S-LD-B-P

A continuación, se presentan los resultados del mismo caso pero con el peso extra colocado sobre la leva;

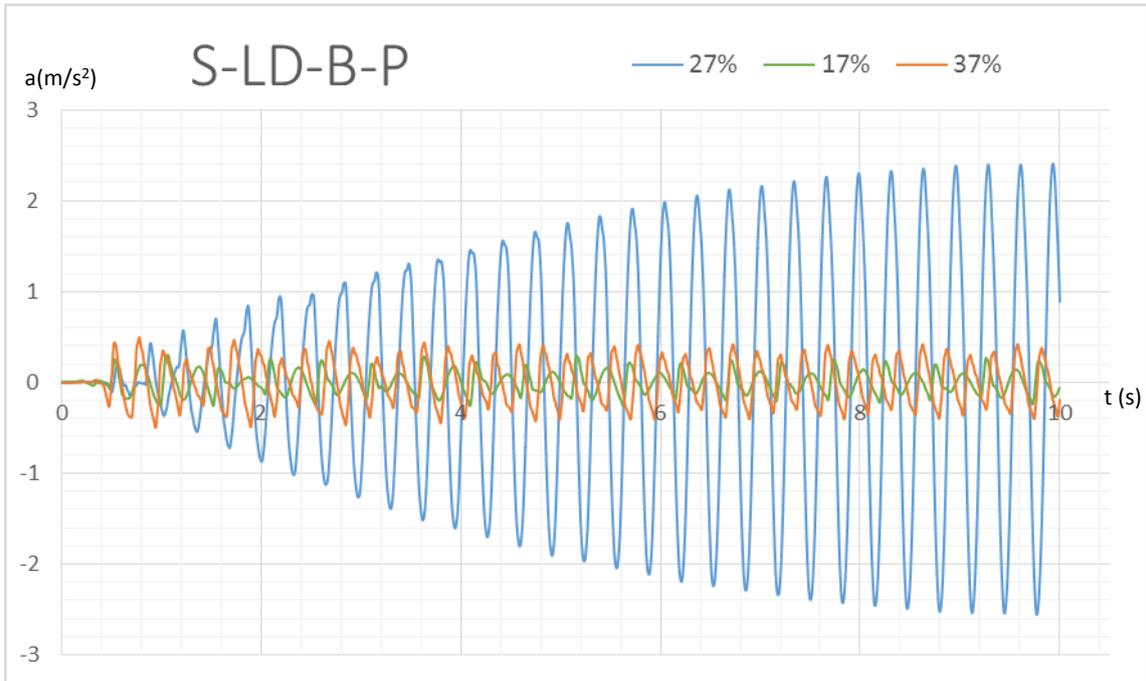


Ilustración 33. S-LD-B-P.

A primera vista las gráficas parecen muy similares, pero si se fija la atención en el eje vertical, se observa cómo en este caso la aceleración alcanza valores mucho mayores. Posteriormente se presentarán gráficas comparativas solamente de los casos en que se produce resonancia, que son los de mayor interés. Se puede ver cómo el valor de potencia aplicada al motor con el cual se obtiene la resonancia no es el mismo que en el ensayo anterior. Esto es debido a la modificación de la frecuencia natural del sistema al variar la masa puntual situada sobre la viga.

17	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,091	0,128	0,116
MIN	-0,096	-0,170	-0,181
DIF	0,187	0,298	0,297
RMS	0,168		
27	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	1,276	0,749	0,770
MIN	-1,313	-0,737	-0,760
DIF	2,589	1,486	1,530
RMS	1,296		
37	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,158	0,1398	0,151
MIN	-0,152	-0,197	-0,233
DIF	0,310	0,337	0,385
RMS	0,355		

Tabla 8. S-LD-B-P resumen.

	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO	RMS
18	7,24	20,09	19,39	12,95
38	11,97	40,17	40,75	27,36

Tabla 9. S-LD-B-P-comparación.

Para el siguiente ensayo se procede a liberar el TMD y retirar el peso extra de nuestro robot. Una vez más, se realizan tres ensayos y se llevan a una gráfica en Excel.

#### 4.2.2.3. Ensayos S-LD-SB-SP

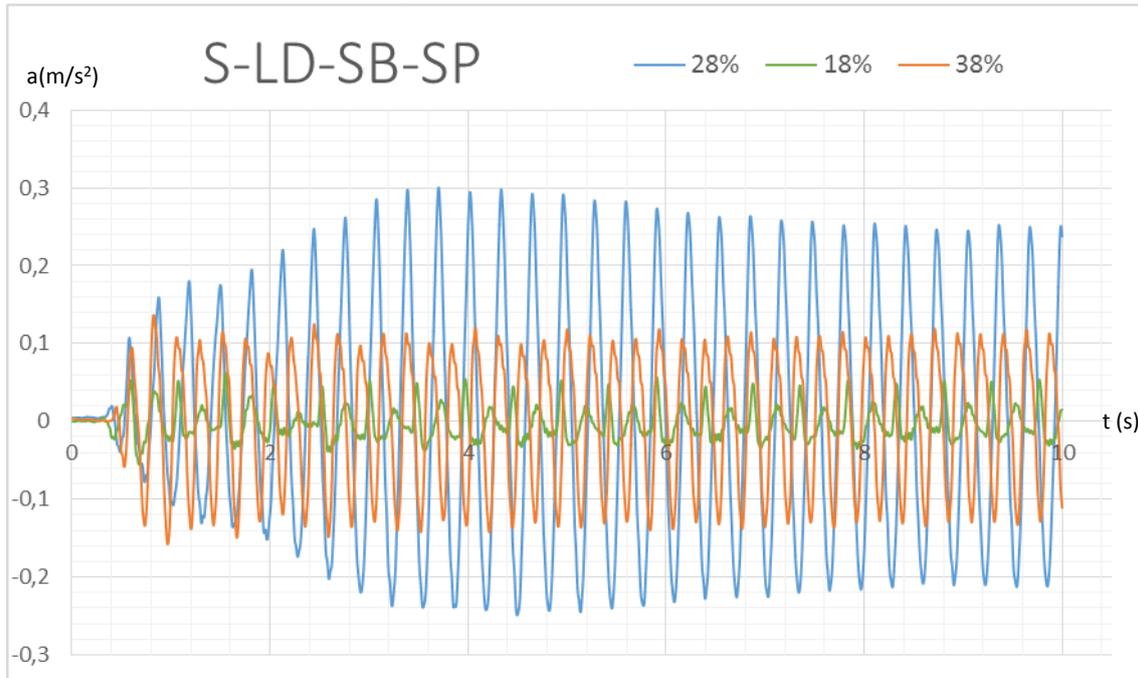


Ilustración 34. S-LD-SB-SP

18	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,020	0,038	0,043
MIN	-0,025	-0,033	-0,0230
DIF	0,045	0,071	0,073
RMS	0,021		
28	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,132	0,118	0,113
MIN	-0,132	-0,094	-0,090
DIF	0,265	0,212	0,203
RMS	0,154		
38	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,038	0,051	0,054
MIN	-0,042	-0,059	-0,062
DIF	0,079	0,109	0,116
RMS	0,082		

Tabla 10. S-LD-SB-SP

	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO	RMS
18	17,12	33,45	35,91	13,38
38	30	51,55	57,16	53,7

Tabla 11. S-LD-SB-SP resumen

En la ilustración 34 se observa un comportamiento más interesante. En los dos casos fuera de resonancia, el comportamiento es similar a cuando se encontraba el TMD bloqueado. Sin embargo, si se analiza la gráfica azul, la que muestra el caso de resonancia, se puede ver cómo alcanza un pico muy pronto, antes de los 4 segundos, y a partir de ahí disminuye su valor hasta alcanzar un estado prácticamente estacionario, sobre los 8 segundos. Además, la diferencia entre la amplitud máxima que se alcanza en resonancia y los otros dos casos es mucho menor que cuando se encontraba el TMD bloqueado.

#### 4.2.2.4. Ensayos S-LD-SB-P

El último caso de estudio en este apartado se da cuando se coloca el peso extra sobre la leva;

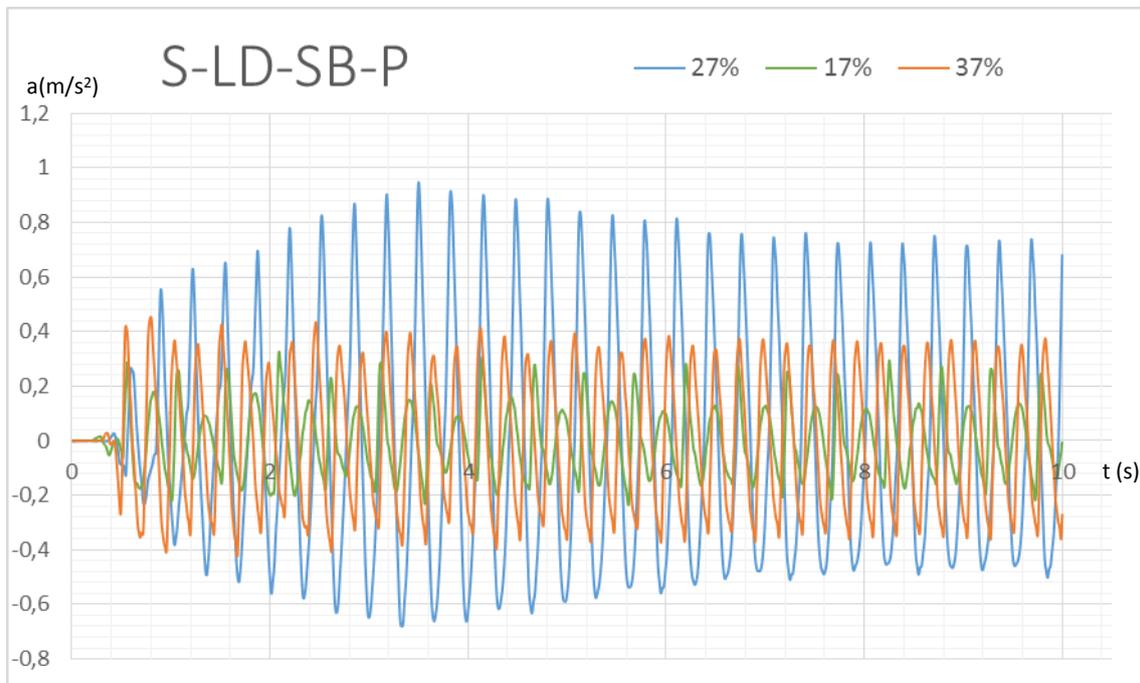


Ilustración 35. S-LD-SB-P

La gráfica que se muestra en la ilustración 35 es muy similar a la anterior, pero con una amplitud mayor. Otra vez se observa como la gráfica correspondiente a la resonancia tiene cierta modulación. Esta modulación en amplitud se da cuando una señal es la suma de dos cuya frecuencia es muy cercana. En este caso, las dos señales que se superponen son la del propio movimiento de la estructura provocada por la leva y la que provoca el TMD.

17	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,084	0,134	0,125
MIN	-0,097	-0,187	-0,164
DIF	0,181	0,320	0,290
RMS	0,121		
27	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,409	0,292	0,258
MIN	-0,371	-0,370	-0,323
DIF	0,780	0,663	0,581
RMS	0,420		
37	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,136	0,142	0,128
MIN	-0,125	-0,268	-0,205
DIF	0,261	0,411	0,333
RMS	0,240		

Tabla 12. S-LD-SB-P.

	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO	RMS
18	23,19	48,35	49,83	28,89
38	33,45	61,96	57,26	57,17

Tabla 13. S-LD-SB-P-comparación.

#### 4.2.2.5. Resumen S-LD

Se han presentado ya todos los casos de estudio con el robot estático y la leva delantera actuando (S-LD). En las ilustraciones y tablas previas se ha visto cómo el efecto de la resonancia amplía en gran medida las fuerzas y desplazamientos sobre la viga. En las siguientes tablas se presentan todos los casos correspondientes a la frecuencia menor, la de resonancia, y a la mayor, respectivamente. De este modo se podrá comparar de manera directa el efecto del TMD y del peso extra

S-LD-B-SP	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,031	0,048	0,0452
MIN	-0,029	-0,043	-0,043
DIF	0,060	0,092	0,088
RMS	0,131		
S-LD-B-P	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,091	0,128	0,116
MIN	-0,096	-0,170	-0,181
DIF	0,187	0,298	0,297
RMS	0,168		
S-LD-SB-SP	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,020	0,038	0,043
MIN	-0,025	-0,033	-0,030
DIF	0,045	0,071	0,073
RMS	0,021		
S-LD-SB-P	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,084	0,134	0,125
MIN	-0,097	-0,187	-0,164
DIF	0,181	0,32	0,290
RMS	0,121		

Tabla 14. S-LD frecuencia menor.

En la tabla 14 se puede ver el resumen de los cuatro casos donde la fuerza inducida por el robot tiene una frecuencia menor que la de resonancia. Como se puede observar, al liberar el TMD en el caso de que no se encuentre el peso extra, si se observa una reducción en la RMS significativa, pero no en el desplazamiento o el peso soportado por los apoyos. En el caso de tener el peso colocado sobre la viga, la reducción en la RMS es mucho menor, y el desplazamiento apenas se reduce. La reacción en los apoyos, de hecho, en uno de los extremos es incluso mayor. Esto es así ya que el TMD no está sintonizado para trabajar a estas frecuencias. Por tanto, su efecto no es tan acusado como cuando trabaja en su frecuencia de resonancia.

Mejora TMD(%)	SP	P
Despl	24,85	3,42
PD	22,43	-7,38
PI	17,3	2,39
RMS	84,28	27,67

Tabla 15. S-LD mejora TMD frecuencia menor

La tabla 15 presenta el porcentaje de mejora entre los casos donde se tiene el TMD libre o bloqueado. Para una mejor comparación, se han enfrentado directamente los dos casos donde la única variable es esta; es decir, con el TMD libre o bloqueado, pero siempre con el robot en el mismo punto y con el mismo estado (con/sin peso extra). De esta manera solamente es el efecto del TMD lo que se está analizando. En el caso de que el robot no tenga el peso sobre él, la RMS se reduce notablemente. Esto es debido a que la fuerza que genera el robot es pequeña, por lo que la fuerza que el TMD genera

oponiéndose al movimiento, si bien no es tan grande como en el caso de que trabaje en sus condiciones de diseño, es suficiente para reducir enormemente el valor eficaz de la aceleración. Sin embargo, en el caso de trabajar con el peso extra, la reducción es mucho menor. De hecho, como se comentó antes, la reacción en uno de los apoyos incluso se incrementa.

S-LD-B-SP	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,3285	0,202	0,201
MIN	-0,333	-0,202	-0,198
DIF	0,661	0,403	0,3997
RMS	0,433		
S-LD-B-P	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	1,276	1,194	1,229
MIN	-1,313	-0,292	-0,301
DIF	2,589	1,486	1,530
RMS	1,296		
S-LD-SB-SP	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,133	0,118	0,113
MIN	-0,132	-0,094	-0,090
DIF	0,2648	0,212	0,203
RMS	0,154		
S-LD-SB-P	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,409	0,292	0,258
MIN	-0,371	-0,370	-0,323
DIF	0,780	0,663	0,581
RMS	0,4203		

Tabla 16. S-LD frecuencia de resonancia

En la tabla 16 se presentan los cuatro ensayos realizados sintonizando la velocidad de giro del robot para que la fuerza que genera coincida con la frecuencia de resonancia de la estructura. Los resultados saltan a la vista. Al liberar el TMD se reducen en gran medida los desplazamientos, como se resume en la siguiente tabla.

Mejora TMD (%)	SP	P
Despl	59,94	69,86
PD	47,37	55,39
PI	49,24	62,01
RMS	64,59	67,58

Tabla 17. S-LD Mejora TMD frecuencia de resonancia.

Se observa una gran mejora en todos los apartados de esta tabla. Tanto en el caso en que se coloca el peso extra sobre la leva como en el caso de que no esté, tanto los desplazamientos como las reacciones en los apoyos se ven reducidas notablemente. Se puede constatar el buen funcionamiento correcto del TMD cuando la viga trabaja en condiciones de resonancia provocada por la fuerza generada por el robot. Para los casos

de resonancia se han graficado los datos del acelerómetro, para verificar estos resultados de manera más visual.

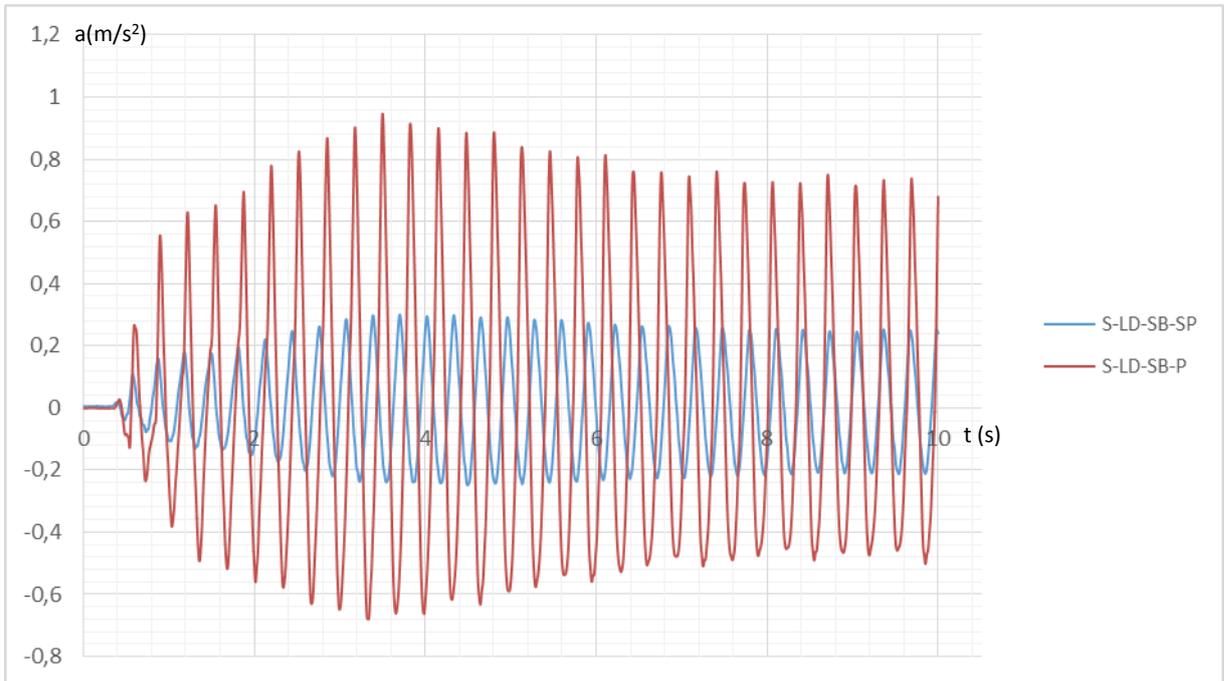


Ilustración 36. S-LD-SB comparación P-SP

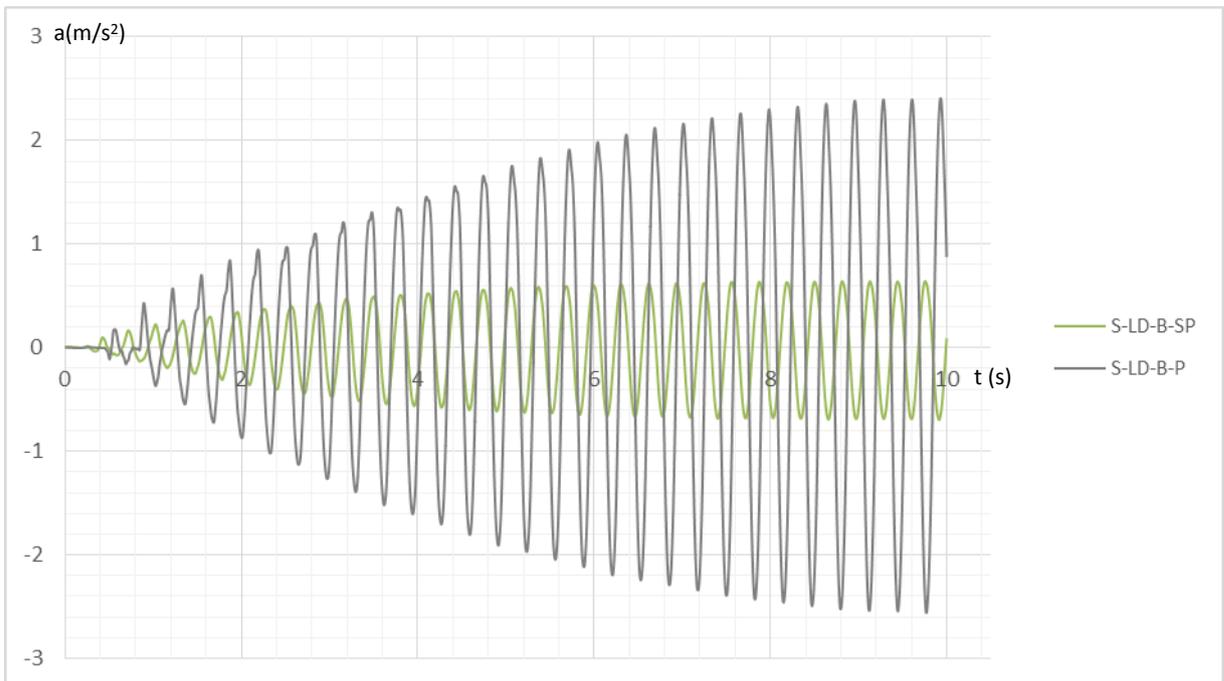


Ilustración 37. S-LD-B comparación P-SP

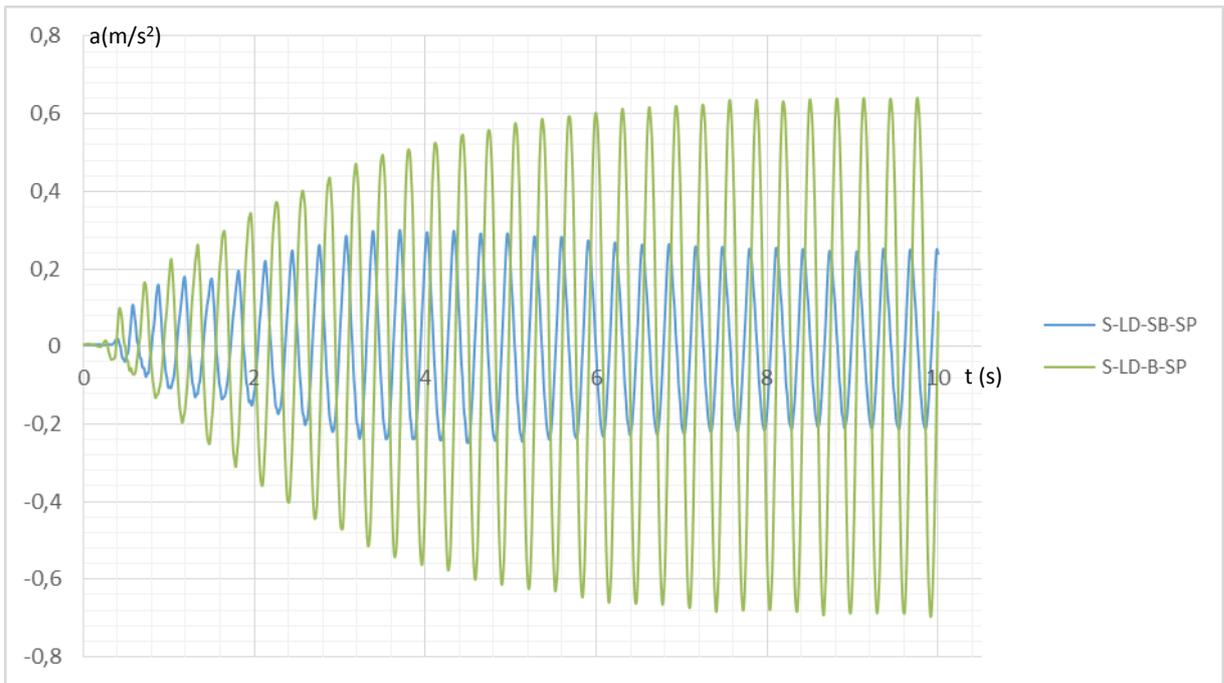


Ilustración 38. S-LD-SP comparación B-SB

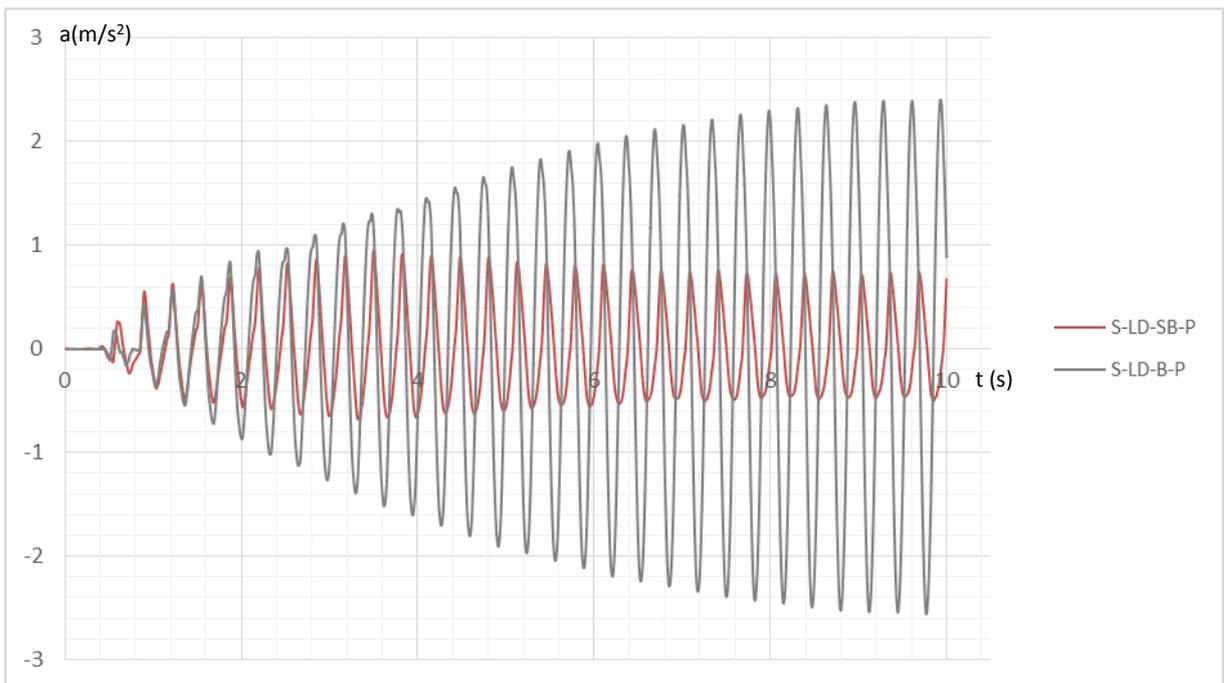


Ilustración 39. S-LD-P comparación B-SB

En las ilustraciones 36 y 37 se observa la gran diferencia que supone el colocar el peso extra a la leva, ya que provoca una fuerza mucho mayor y por tanto mayores desplazamientos y aceleraciones. En las ilustraciones 38 y 39 se observa claramente la mejora que supone el TMD.

S-LD-B-SP	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,044	0,077	0,084
MIN	-0,048	-0,051	-0,058
DIF	0,093	0,128	0,142
RMS	0,280		
S-LD-B-P	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,158	0,588	0,614
MIN	-0,152	-0,009	-0,009
DIF	0,310	0,597	0,623
RMS	0,355		
S-LD-SB-SP	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,038	0,051	0,054
MIN	-0,042	-0,059	-0,061
DIF	0,0794	0,109	0,116
RMS	0,0824		
S-LD-SB-P	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,136	0,142	0,128
MIN	-0,125	-0,268	-0,205
DIF	0,261	0,411	0,333
RMS	0,240		

Tabla 18. S-LD frecuencia mayor

Mejora TMD(%)	SP	P
Despl	14,32	15,82
PD	14,48	31,19
PI	18,14	46,62
RMS	70,53	32,26

Tabla 19. S-LD mejora TMD frecuencia mayor

En las tablas 18 y 19 se presenta el resumen de los casos en que se ha trabajado a una frecuencia mayor. El TMD sigue actuando en este caso, pero de manera mucho menos acusada que en el caso de la resonancia.

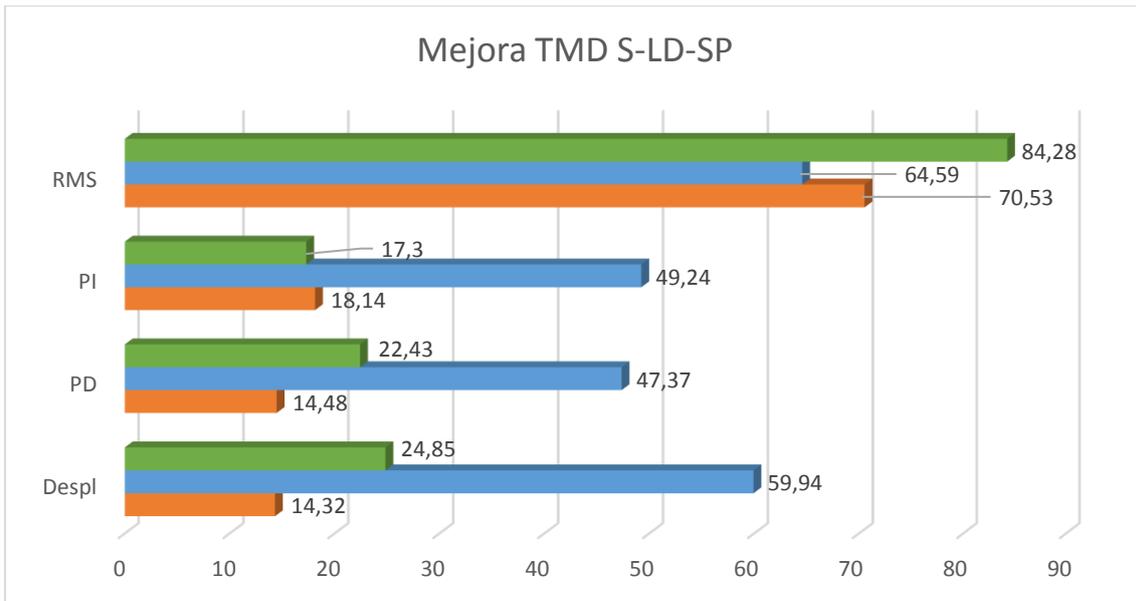


Ilustración 40. Mejora TMD S-LD-SP.

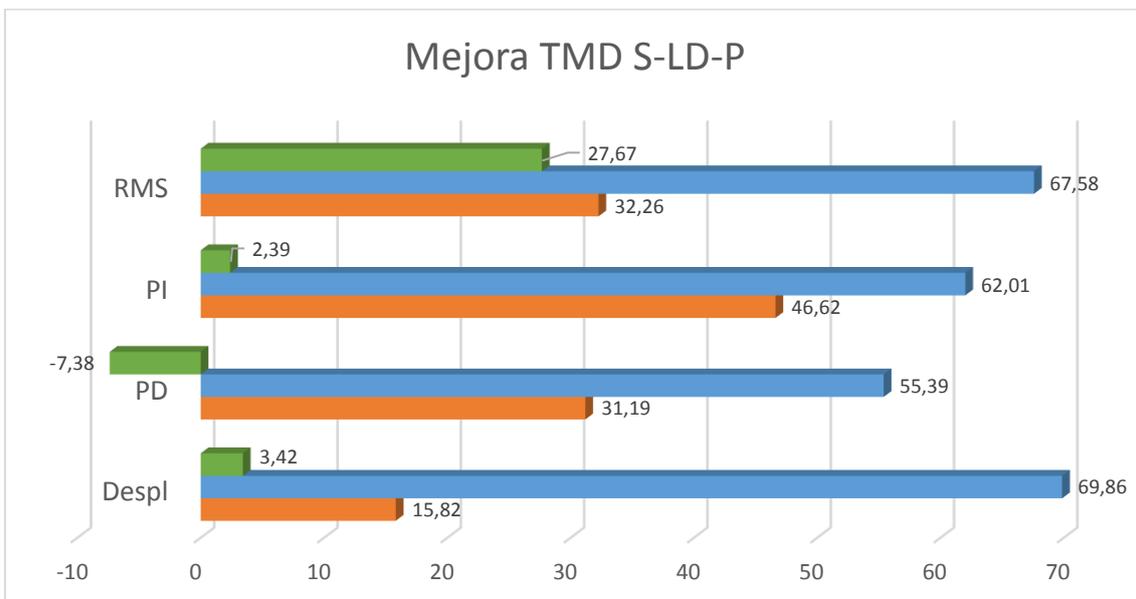


Ilustración 41. Mejora TMD S-LD-P

En las ilustraciones 40 y 41 se han resumido todos los ensayos S-LD. Trabajando con el mismo código de colores, se representa la mejora que consigue el TMD en cada uno de los apartados analizados. El TMD consigue mejorar todas las variables, para los casos sin peso extra. Al colocar este peso, excepto la reacción en uno de los apoyos en un ensayo, sigue mejorando el comportamiento. El empeoramiento de la reacción de este apoyo es pequeño, por lo que se puede despreciar frente a la gran mejora que consigue en los demás casos.

#### 4.2.3. Ensayos S-LT

Una vez realizado este análisis, se procederá de igual manera a trabajar con la leva trasera, la de perfil triangular. Los ensayos a realizar son exactamente los mismos, analizando los diferentes casos y con el mismo procedimiento.

#### 4.2.3.1. Ensayos S-LT-B-SP

Se comenzará con el TMD bloqueado, el robot estático en el centro de la viga y sin peso;

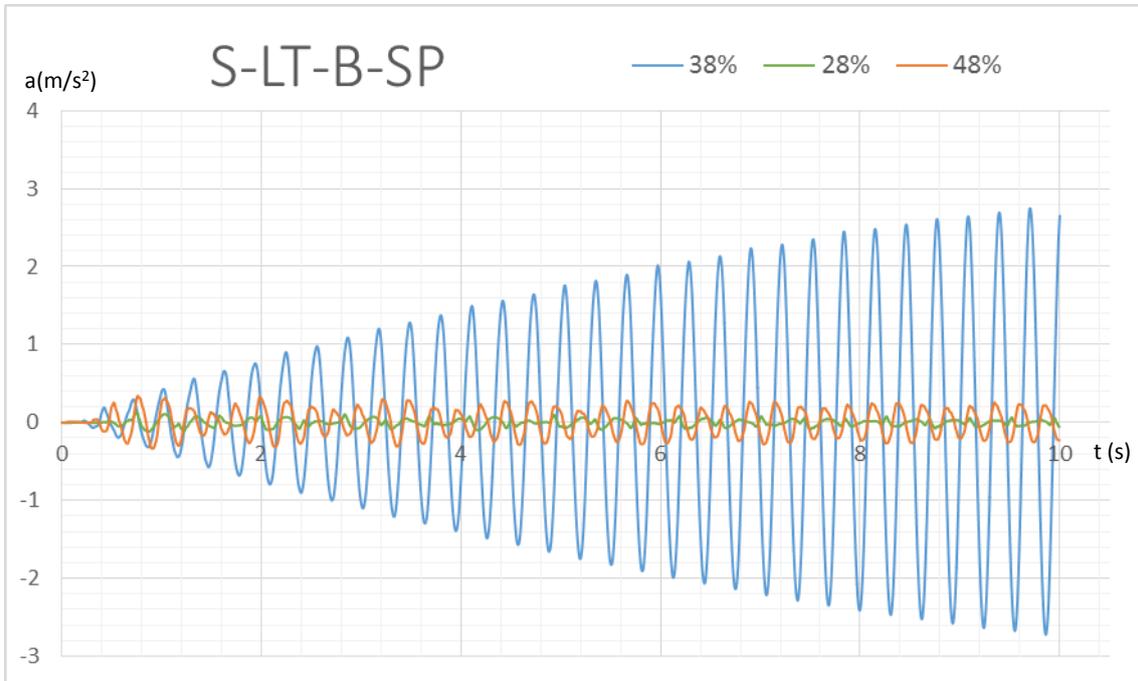


Ilustración 42. S-LT-B-SP

En este caso, con el TMD bloqueado y sin peso, se observa a simple vista como la aceleración es mucho mayor que en el caso de la leva delantera. El perfil triangular de la leva hace que la fuerza transmitida a la estructura sea mayor.

28	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,059	0,087	0,096
MIN	-0,061	-0,063	-0,064
DIF	0,121	0,150	0,161
RMS	0,042		
38	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	1,321	0,776	0,760
MIN	-1,31	-0,783	-0,754
DIF	2,632	1,559	1,515
RMS	1,260		
48	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,113	0,102	0,118
MIN	-0,121	-0,159	-0,136
DIF	0,234	0,261	0,253
RMS	0,170		

Tabla 20. S-LT-B-SP.

	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO	RMS
28	4,58	9,64	10,61	3,33
48	8,9	16,75	16,74	13,5

Tabla 21. S-LT-B-SP comparación.

Como en los casos anteriores, en la primera tabla están representados los 3 casos de diferente velocidad de giro de la leva, y en la segunda queda reflejado el porcentaje de variación respecto al mismo dato en el caso de resonancia.

#### 4.2.3.2. Ensayos S-LT-B-P

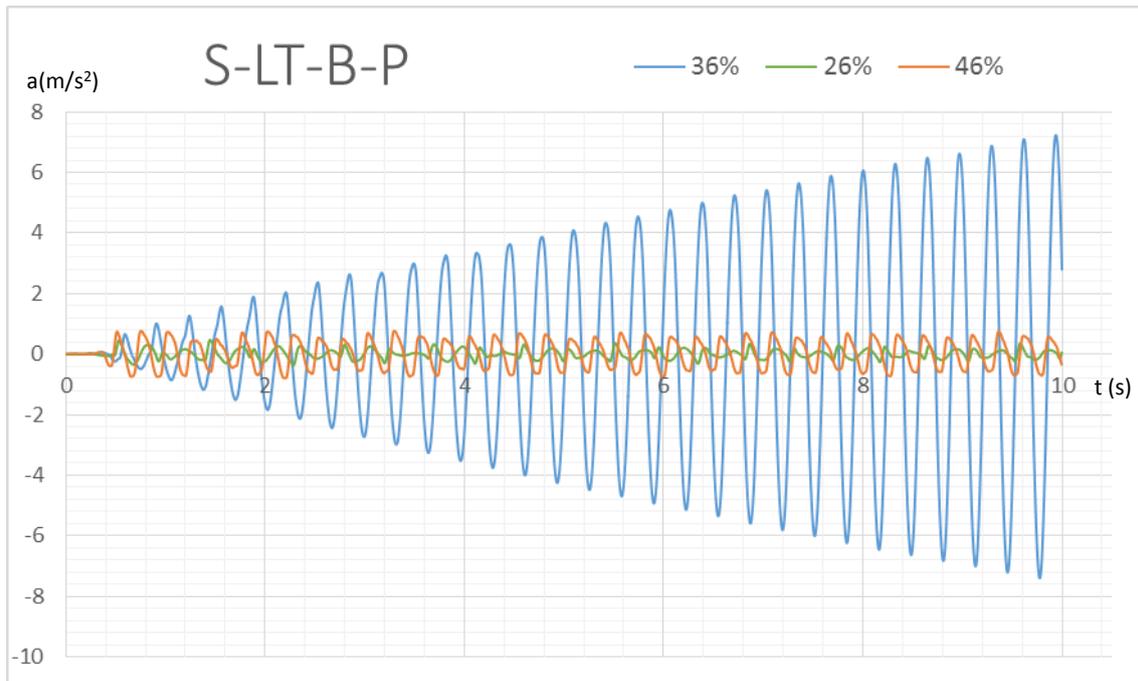


Ilustración 43. S-LT-B-P

El comportamiento cuando se añade el peso a la leva es similar al caso anterior. Las frecuencias alejadas de la resonancia alcanzan un valor estacionario rápidamente, mientras que en la resonancia se observa como la amplitud aumenta en todo momento. A modo de curiosidad, este ensayo era el que mayores desplazamientos presentaba. Debido a ello, si el ensayo se prolongaba mucho, el movimiento de la viga era tan elevado que saturaba la señal del sensor láser, dejando de registrar medida. Según la tendencia que se observa en la ilustración 43 si se hubiese registrado el ensayo durante más tiempo la amplitud de la aceleración hubiese seguido creciendo cuando se produce resonancia.

26	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,162	0,177	0,183
MIN	-0,188	-0,204	-0,208
DIF	0,349	0,380	0,391
RMS	0,147		
36	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	3,835	2,143	2,240
MIN	-3,828	-2,098	-2,197
DIF	7,663	4,241	4,436
RMS	3,242		
46	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,279	0,237	0,228
MIN	-0,291	-0,305	-0,286
DIF	0,571	0,542	0,514
RMS	0,452		

Tabla 22. S-LT-B-P

	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO	RMS
26	4,56	8,97	8,82	4,54
46	7,45	12,79	11,58	13,95

Tabla 23. S-LT-B-P resumen.

Los resultados pertenecientes a la leva trasera son más vistosos que en la delantera. Aquí la resonancia es mucho más acusada, como se ve en la tabla 22.

#### 4.2.3.3. Ensayos S-LT-SB-SP

Ahora se procederá a liberar el TMD y retirar el peso del robot, para visualizar su comportamiento antes un perfil de fuerzas distinto al estudiado en el anterior apartado.

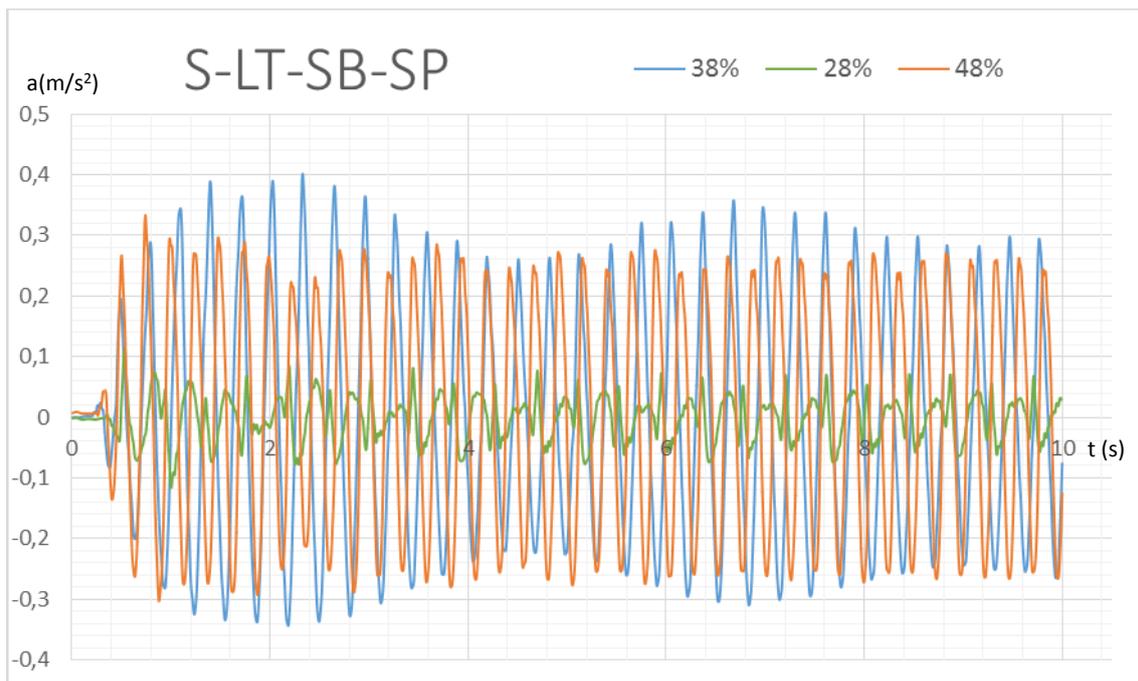


Ilustración 44. S-LT-SB-SP

Queda reflejado en la ilustración 44 que el comportamiento en resonancia no se diferencia apenas entre el que produce resonancia y el de frecuencia mayor. El TMD ha mitigado en gran medida el movimiento de la viga en esas condiciones, pero no ha afectado tanto a los otros casos. También se ve como la señal del caso de resonancia (azul) está modulada en amplitud.

28	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,047	0,090	0,092
MIN	-0,054	-0,062	-0,061
DIF	0,101	0,152	0,153
RMS	0,036		
38	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,181	0,142	0,136
MIN	-0,174	-0,153	-0,141
DIF	0,354	0,295	0,276
RMS	0,194		
48	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,103	0,104	0,116
MIN	-0,101	-0,155	-0,150
DIF	0,205	0,259	0,266
RMS	0,188		

Tabla 24. S-LT-SB-SP.

	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO	RMS
18	28,5	51,67	55,48	18,61
38	57,79	87,72	96,29	96,7

Tabla 25. S-LT-SB-SP comparación.

Con este perfil de leva se observa mucho mejor el trabajo del TMD. Comparando las gráficas, que se presentarán en el apartado 4.2.3.5, se ve cómo las aceleraciones son reducidas por este dispositivo, y cómo las acciones fuera del rango de trabajo del TMD apenas se ven afectadas.

#### 4.2.3.4. Ensayos S-LT-SB-P

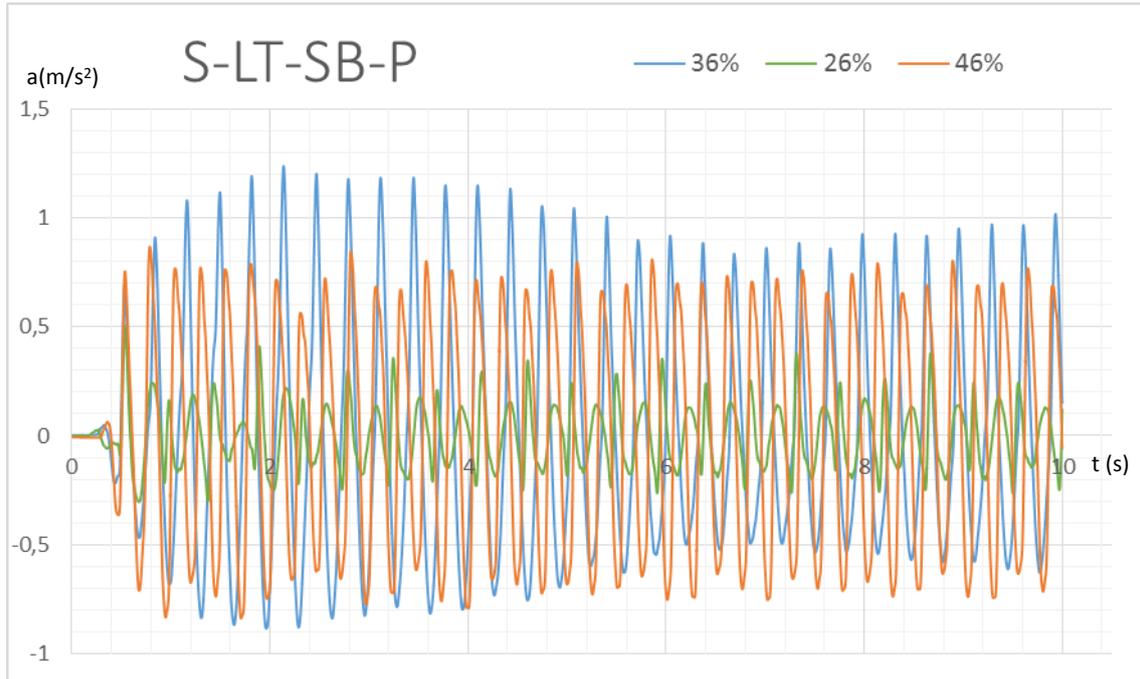


Ilustración 45. S-LT-SB-P

Cuando se añade el peso al robot, la tendencia se mantiene. De hecho, en algunos tramos de la gráfica, incluso la amplitud de la frecuencia mayor es mayor que la de resonancia.

26	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,144	0,159	0,171
MIN	-0,174	-0,203	-0,209
DIF	0,318	0,362	0,380
RMS	0,142		
36	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,538	0,352	0,337
MIN	-0,498	-0,479	-0,459
DIF	1,035	0,830	0,796
RMS	0,534		
46	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,281	0,226	0,225
MIN	-0,293	-0,313	-0,317
DIF	0,574	0,539	0,541
RMS	0,514		

Tabla 26. S-LT-SB-P

	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO	RMS
18	30,71	43,59	47,77	26,57
38	55,44	64,95	67,97	96,28

Tabla 27. S-LT-SB-P resumen

El TMD sigue funcionando mitigando el movimiento de la viga, sobre todo en el caso de una frecuencia menor.

#### 4.2.3.5. Resumen S-LT

Se presentan ahora los resultados comparativos entre los ensayos a menor frecuencia;

S-LT-B-SP	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,059	0,087	0,096
MIN	-0,061	-0,063	-0,064
DIF	0,121	0,150	0,161
RMS	0,042		
S-LT-B-P	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,162	0,177	0,183
MIN	-0,188	-0,204	-0,208
DIF	0,349	0,380	0,391
RMS	0,147		
S-LT-SB-SP	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,047	0,090	0,092
MIN	-0,054	-0,062	-0,061
DIF	0,101	0,152	0,153
RMS	0,036		
S-LT-SB-P	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,1442	0,159	0,171
MIN	-0,174	-0,203	-0,209
DIF	0,318	0,362	0,380
RMS	0,142		

Tabla 28. S-LT frecuencia menor

Mejora TMD(%)	SP	P
Despl	16,25	8,98
PD	-1,4	4,85
PI	4,56	2,8
RMS	13,84	3,76

Tabla 29. S-LT mejora TMD frecuencia menor

El comportamiento del TMD no tiene apenas efecto en este caso. Incluso, para el caso sin peso, aumenta la reacción en uno de los apoyos. La RMS se ve reducida pero en un porcentaje muy pequeño.

Para el caso en que se produce resonancia en la viga, los datos son los siguientes;

S-LT-B-SP	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	1,321	0,776	0,760
MIN	-1,311	-0,783	-0,754
DIF	2,633	1,559	1,515
RMS	1,260		
S-LT-B-P	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	3,835	2,143	2,240
MIN	-3,828	-2,098	-2,196
DIF	7,663	4,241	4,436
RMS	3,242		
S-LT-SB-SP	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,181	0,142	0,136
MIN	-0,174	-0,153	-0,141
DIF	0,354	0,295	0,276
RMS	0,194		
S-LT-SB-P	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,538	0,352	0,337
MIN	-0,498	-0,479	-0,459
DIF	1,035	0,830	0,796
RMS	0,534		

Tabla 30. S-LT frecuencia de resonancia

Mejora TMD(%)	SP	P
Despl	86,54	86,49
PD	81,07	80,42
PI	81,75	82,05
RMS	84,59	83,54

Tabla 31. S-LT mejora TMD frecuencia de resonancia

Si este caso se recrease en una estructura real, el efecto de la resonancia sería peligroso. Con una pequeña masa móvil de unos pocos gramos (recordar que la masa total del robot ronda los 800g, pero la masa del brazo móvil es solamente una fracción, unos 110g sin masa extra y 330g con ella) se han conseguido unas fuerzas del orden de 10 veces mayores, y unos desplazamientos mayores del 1% de la longitud de la pasarela. Con la escala aproximada de 1:12 con la que se trabaja, el desplazamiento del punto medio de la pasarela se movería unos 90cm en el plano vertical, un valor inaceptable tanto para confort como para seguridad de la estructura. El TMD reduciría este desplazamiento a unos 12cm. Este efecto se puede observar en las siguientes gráficas:

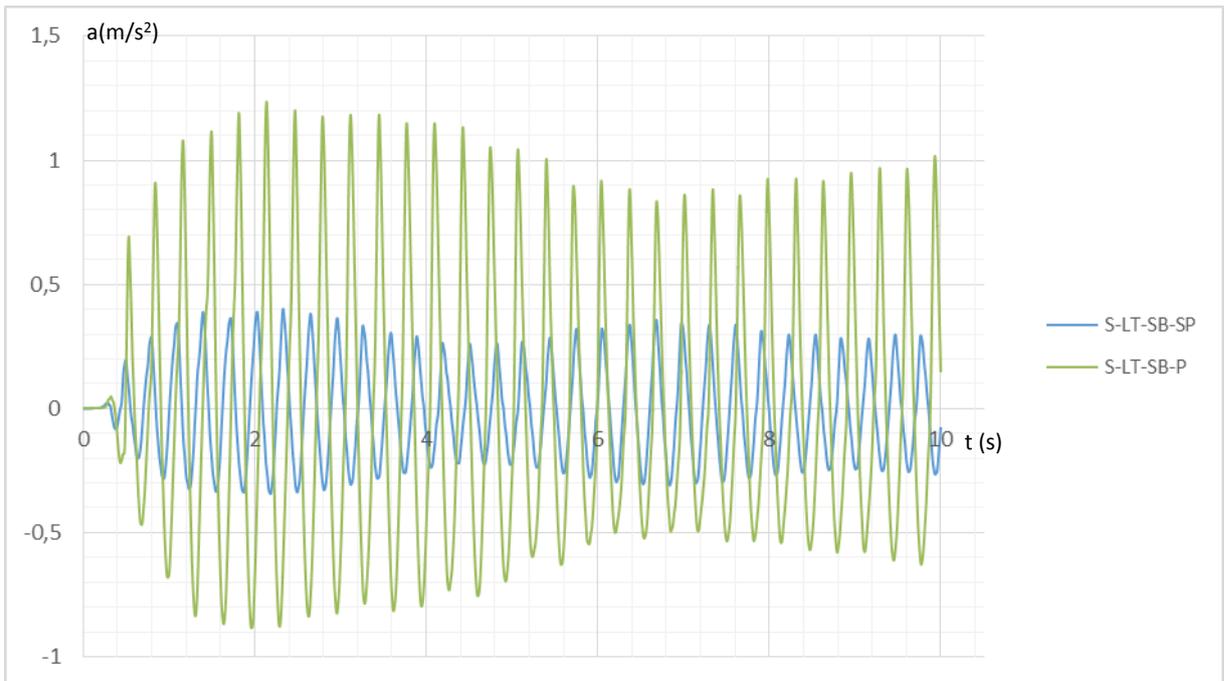


Ilustración 46. S-LT-SB comparación P-SP

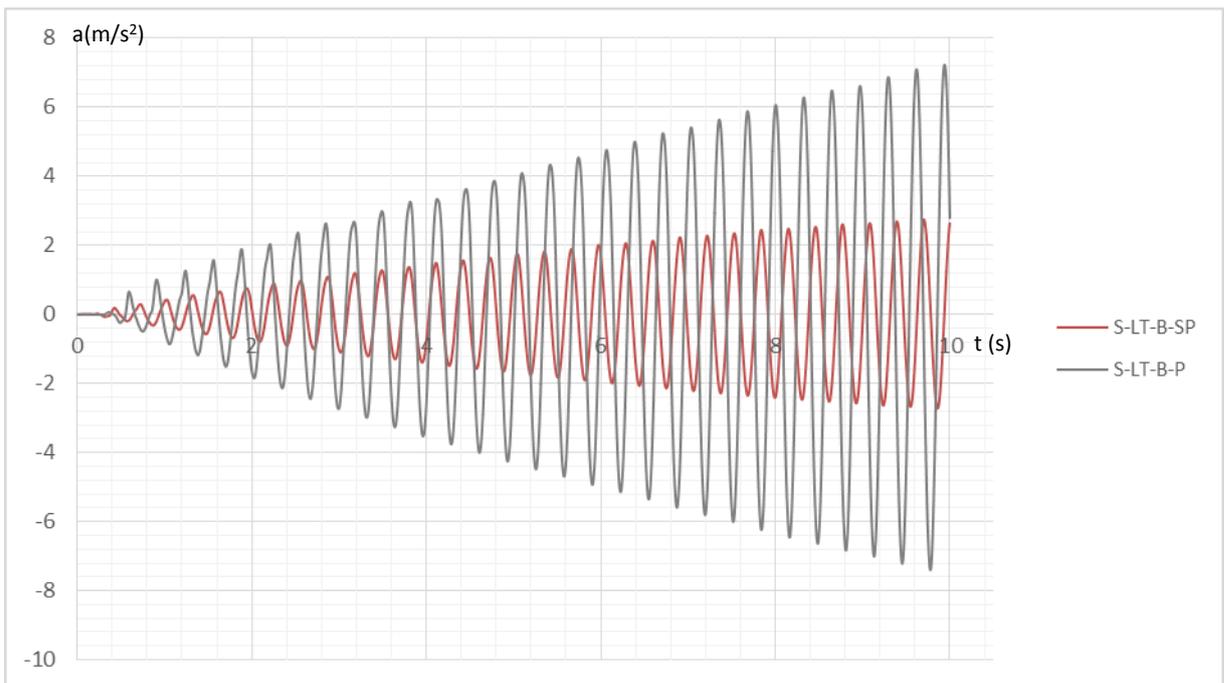


Ilustración 47. S-LT-B comparación P-SP

El comportamiento en los dos casos comparando con/sin peso extra es similar, pero con amplitudes mayores. Se observa la modulación de la onda con el TMD liberado. Con él bloqueado, se ve perfectamente como ambas frecuencias de resonancia no son exactamente iguales.

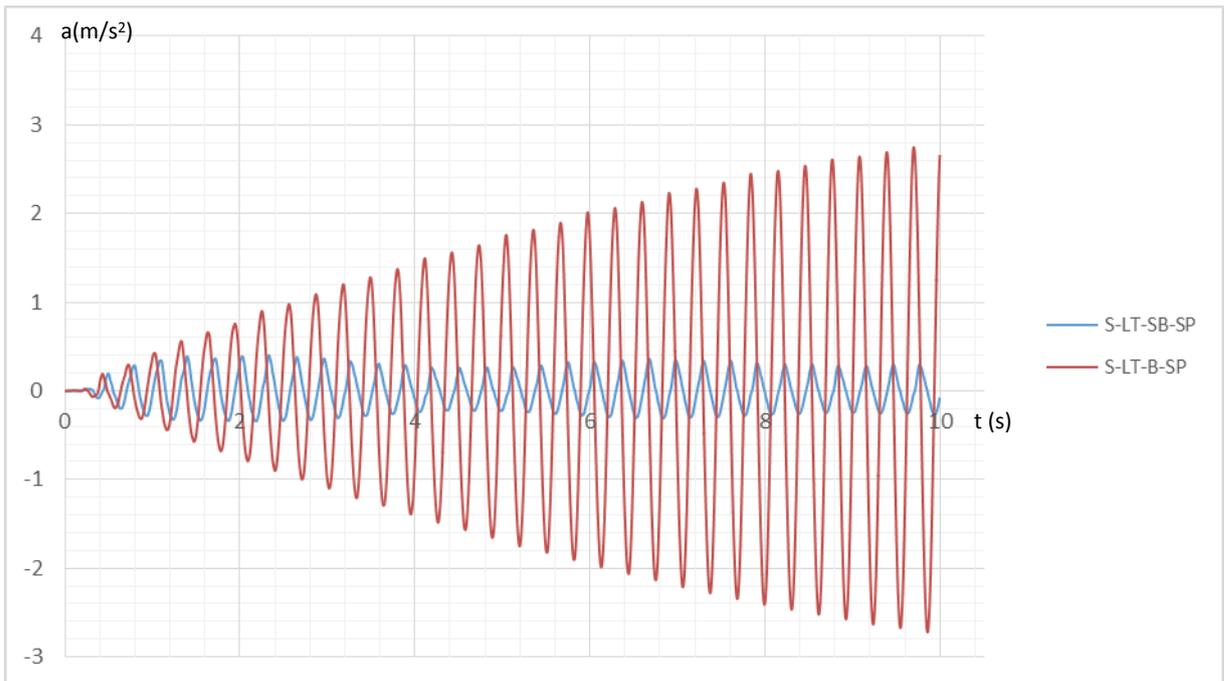


Ilustración 48. S-LT-SP comparación B-SB

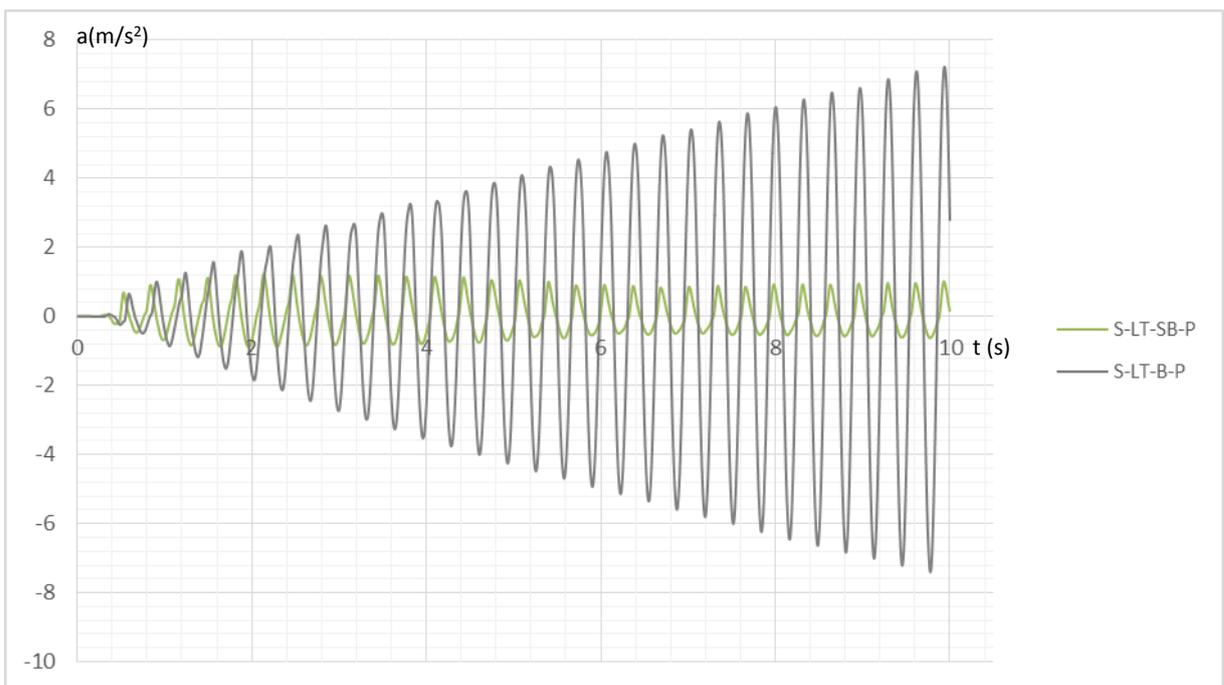


Ilustración 49. S-LT-P comparación B-SB

Se observa en estas dos gráficas como con el TMD libre la aceleración de la viga alcanza un comportamiento estacionario rápidamente. Con él bloqueado, en el tiempo que se ha escogido para realizar esta comparación, la aceleración aún no muestra signos de frenar su crecimiento. Si se prolongase este experimento las aceleraciones, desplazamientos y reacciones en los apoyos seguirían creciendo hasta poder provocar el colapso en la estructura. No se ha intentado llegar a los límites de ésta, pero probablemente con una masa móvil un poco mayor se podría provocar fácilmente.

S-LT-B-SP	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,113	0,102	0,118
MIN	-0,121	-0,159	-0,136
DIF	0,234	0,261	0,254
RMS	0,170		
S-LT-B-P	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,279	0,237	0,228
MIN	-0,291	-0,305	-0,286
DIF	0,571	0,542	0,514
RMS	0,452		
S-LT-SB-SP	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,103	0,104	0,116
MIN	-0,101	-0,155	-0,150
DIF	0,205	0,259	0,266
RMS	0,188		
S-LT-SB-P	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,281	0,226	0,225
MIN	-0,293	-0,313	-0,317
DIF	0,574	0,539	0,541
RMS	0,514		

Tabla 32. S-LT frecuencia mayor

Mejora TMD(%)	SP	P
Despl	12,62	-0,61
PD	0,91	0,58
PI	-4,97	-5,35
RMS	-10,39	-13,59

Tabla 33. S-LT mejora TMD frecuencia mayor

Cuando se analizan los resultados en los ensayos con la frecuencia mayor, se observa cómo el TMD no solo no produce una mejora, sino que en la mayoría de aspectos que se han analizado en la tabla 32, incluso ha empeorado el comportamiento. El hecho de que se amplíen los efectos sobre uno de los apoyos puede deberse a dos causas: primero, que aunque el robot se encuentre colocado en el centro de la estructura, la fuerza que aplica no está centrada, ya que el brazo de la leva tiene cierta longitud que hace que no se aplique en el centro exacto de la viga. Y segundo, que el TMD no se encuentre perfectamente centrado y provoque el mismo efecto. Véase la ilustración 17 en la que se ve cómo el brazo solidario a la estructura del TMD no se encuentra sobre la marca azul de 3m, que indica el centro de la viga. Estas dos causas provocan el aumento de manera desigual de la reacción en los apoyos.

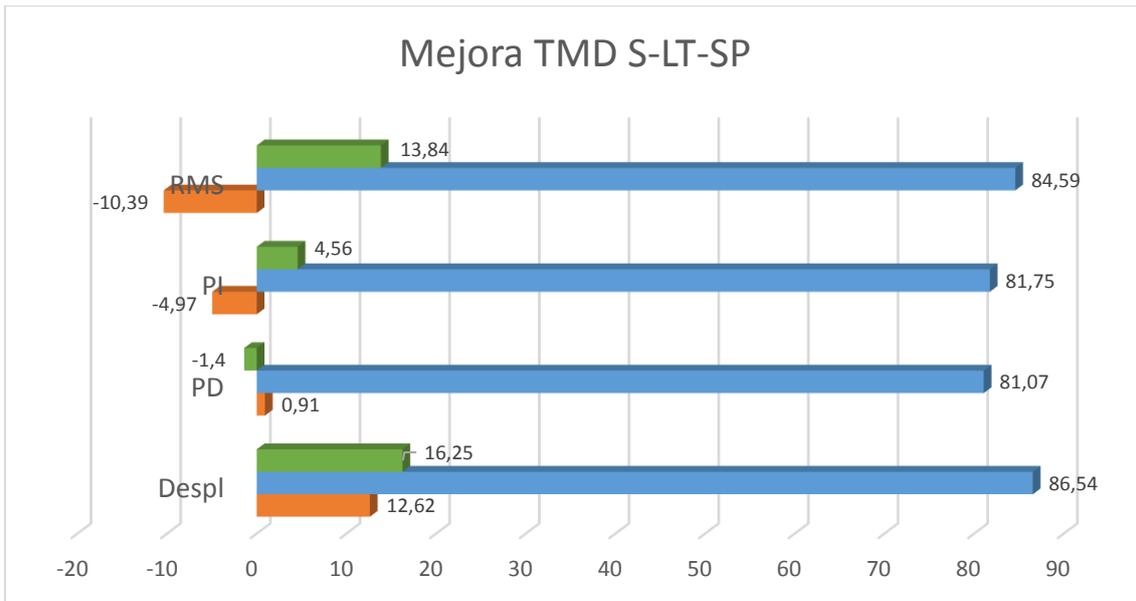
S-LT-B-SP	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,113	0,102	0,118
MIN	-0,121	-0,159	-0,136
DIF	0,234	0,261	0,254
RMS	0,170		
S-LT-B-P	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,279	0,238	0,228
MIN	-0,291	-0,305	-0,286
DIF	0,571	0,542	0,514
RMS	0,452		
S-LT-SB-SP	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,103	0,103	0,116
MIN	-0,101	-0,155	-0,150
DIF	0,205	0,259	0,266
RMS	0,188		
S-LT-SB-P	DESPL CORREGIDO	PD CORREGIDO	PI CORREGIDO
MAX	0,281	0,226	0,225
MIN	-0,293	-0,313	-0,317
DIF	0,574	0,539	0,541
RMS	0,514		

Tabla 34. S-LT frecuencia mayor

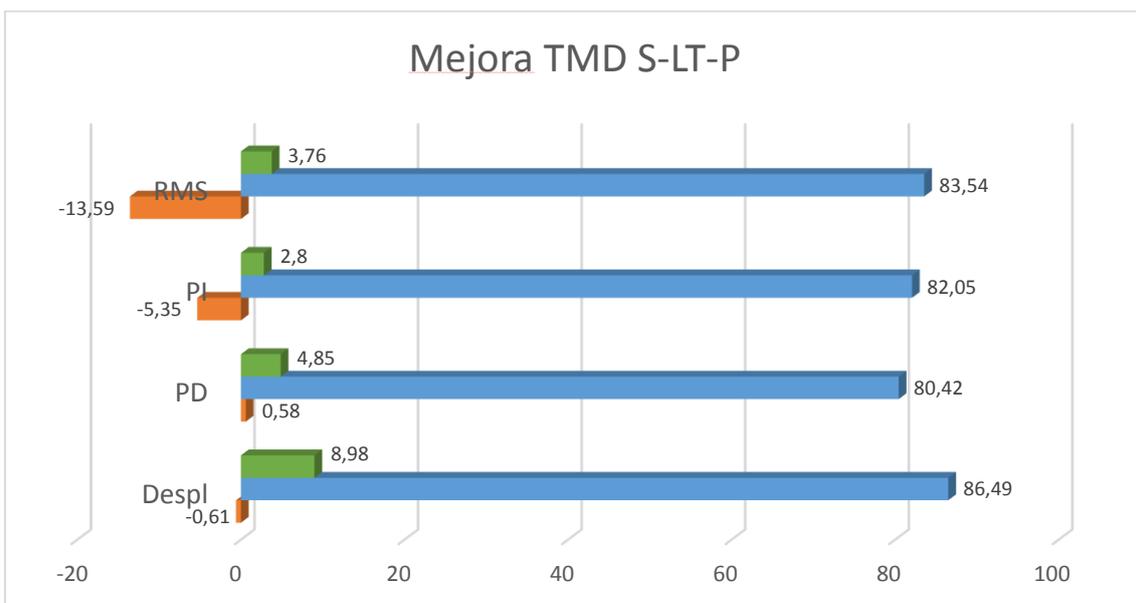
Mejora TMD(%)	SP	P
Despl	12,62	-0,61
PD	0,91	0,58
PI	-4,97	-5,35
RMS	-10,39	-13,59

Tabla 35. S-LT mejora TMD frecuencia mayor

Para estos casos el TMD no solamente no produce mejora, sino que aumenta el valor RMS de la aceleración en más de un 10% sin el peso y cerca de un 13,5% cuando se coloca el peso extra. Sin embargo este caso no es crítico, ya que los valores tanto de la aceleración como de desplazamientos y reacciones en apoyos alcanzan unos valores mucho menores a los que se registran en los casos donde se produce resonancia y el TMD no actúa.



*Ilustración 50. Mejora TMD S-LT-SP.*



*Ilustración 51. Mejora TMD S-LT-P.*

A modo de resumen, de manera análoga al capítulo 4.2.2.5, se presentan en forma de gráfico de barras el resumen de los ensayos S-LT. Para los casos de frecuencia menor, excepto uno donde se aumenta un 1,4% la reacción en un apoyo, el comportamiento ha mejorado. En cuanto a los casos que se produce resonancia, no hay lugar a dudas de que la liberación del TMD consigue reducir notablemente las variables analizadas. Por último, al liberar el TMD y cuando el servo de la leva gira a mayor velocidad de la necesaria para provocar resonancia, el trabajo del TMD es cuestionable. Casi todas las variables analizadas aumentan, excepto la reacción en el apoyo derecho en ambos casos, que disminuye de manera muy poco significativa. Sin embargo, la mejora en la resonancia es tan elevada que el empeoramiento en estos casos no es significativo. Una

idea para una investigación futura es la de un TMD activo que detecte cuando se produce resonancia y se libere. De este modo no se produciría este fenómeno.

#### 4.2.4. Ensayos W-LD

##### 4.2.4.1. Introducción

Ahora se analizarán los ensayos realizados con el robot desplazándose sobre la viga. Se ha escogido una velocidad de movimiento pequeña, de manera que el robot recorra la viga en unos 23s. Todos los ensayos se han realizado partiendo del reposo y desde el mismo extremo de la viga. Se han utilizado los mismos sensores que en el apartado anterior. Para el análisis de los datos, las muestras han sido de 25 segundos.

Siguiendo el orden que se tomó en el apartado anterior, se presenta el caso en el que se trabaja con la leva delantera, TMD bloqueado y sin peso extra. Procediendo del mismo modo, se han realizado tres ensayos; el correspondiente a la frecuencia de resonancia, uno con una potencia un 10% mayor y otro un 10% menor;

Para este conjunto de casos se presentan una gráficas diferentes. Además de la de aceleración del punto medio, la del desplazamiento de dicho punto y las dos que representan la reacción en cada apoyo. Numéricamente, es más difícil de analizar estos datos, ya que el desplazamiento y las reacciones no dependen solamente del movimiento de la leva, sino de la posición del robot. El análisis numérico de los valores de las reacciones es complejo y no ofrece una buena referencia para comparar cada caso. Sin embargo, su visualización sobre una gráfica si permite interpretar patrones de comportamiento y sacar conclusiones. Sin embargo esto no es suficiente, y para obtener un valor numérico con el que comparar objetivamente entre diferentes ensayos, se han elegido el valor RMS de la aceleración y el factor de cresta, obtenido con Sigview.

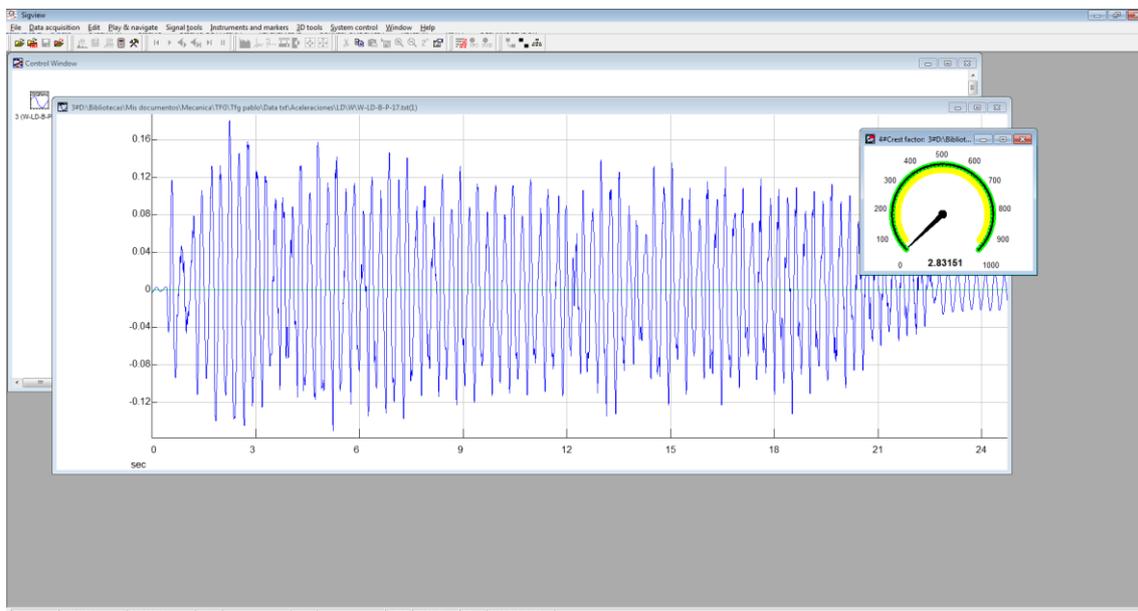


Ilustración 52. Sigview.

Este software de tratamiento de señales nos permite realizar un análisis exhaustivo de nuestras muestras. En este caso, se ha utilizado el factor de cresta para tener un indicador objetivo. El factor de cresta indica la relación entre el mayor pico de la amplitud y el valor RMS. Es un valor ampliamente utilizado en el campo del análisis de señales.

#### 4.2.4.2. Ensayos W-LD-B-SP

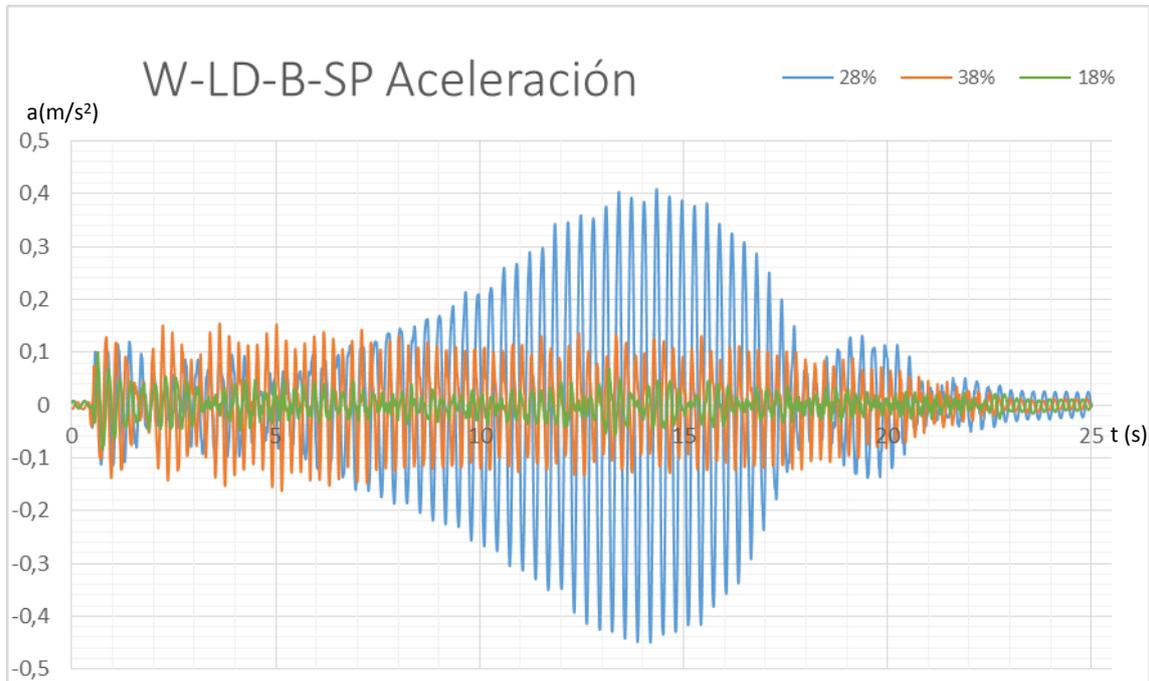


Ilustración 53. W-LD-B-SP Aceleración

Se observa en esta gráfica el comportamiento en aceleración del punto medio de la viga. En el caso de menor frecuencia, la fuerza generada por la leva es tan pequeña que apenas se puede observar, quedando superpuestas las gráficas de los otros dos ensayos. Para el caso de la frecuencia mayor, la amplitud de la aceleración es la mayor de todas en los primeros instantes. Sin embargo, pronto se hace patente la resonancia y comienza a aumentar la aceleración provocada al girar la leva en la frecuencia intermedia, debido a la resonancia. Una vez el robot ha superado aproximadamente dos tercios de la viga, se reduce el efecto de la resonancia.

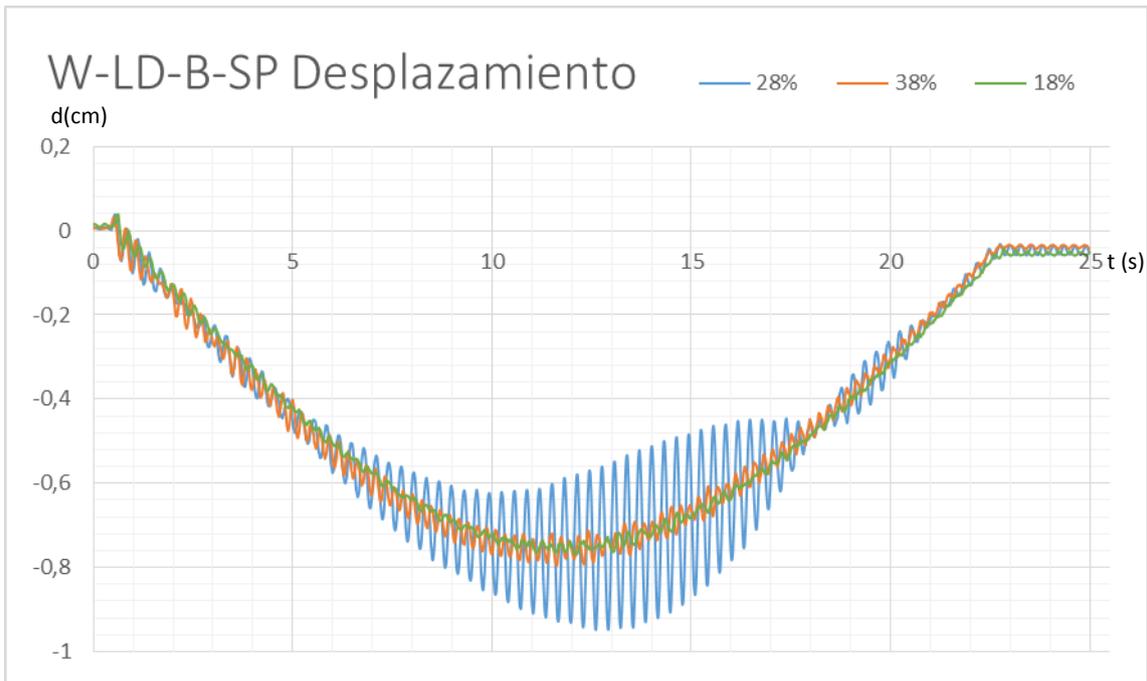


Ilustración 54. W-LD-B-SP Desplazamiento.

En la ilustración 54 se observa un fenómeno que merece atención. A la hora de comenzar el ensayo, se ha puesto a cero el sensor una vez el robot estaba situado sobre la viga. De manera teórica, una vez el robot acabe el tránsito, si lo hace en un punto simétrico respecto del centro de la viga, el desplazamiento del punto medio debería ser cero nuevamente. Sin embargo, si se observa el tramo final, una vez que el robot ha finalizado su recorrido y se encuentra detenido al final de éste, se puede ver que el desplazamiento no es exactamente cero, es algo inferior. Una posible causa es que el punto donde acabe el tránsito no sea exactamente el simétrico al que comenzó respecto del centro de la viga. No se ha estudiado en profundidad este fenómeno, ya que no afecta al desarrollo del análisis, pero puede ser un buen punto de partida para futuros ensayos.

	18%		28%		38%
RMS	0,020	RMS	0,150	RMS	0,065
FC	5,015	FC	2,994	FC	2,513

Tabla 36. W-LD-B-SP.

La comparación de la tabla 36 se ha realizado sobre el dato de la aceleración, ya que siempre está en torno a 0 y para su análisis no es necesario otro tratamiento extra, como puede ser la resta de una media móvil o de una tendencia lineal. Se observa un gran

cambio en la RMS de la señal, siendo del orden de 7 veces mayor en el caso de la frecuencia menor, y 2,5 veces mayor que en el caso de frecuencia mayor.

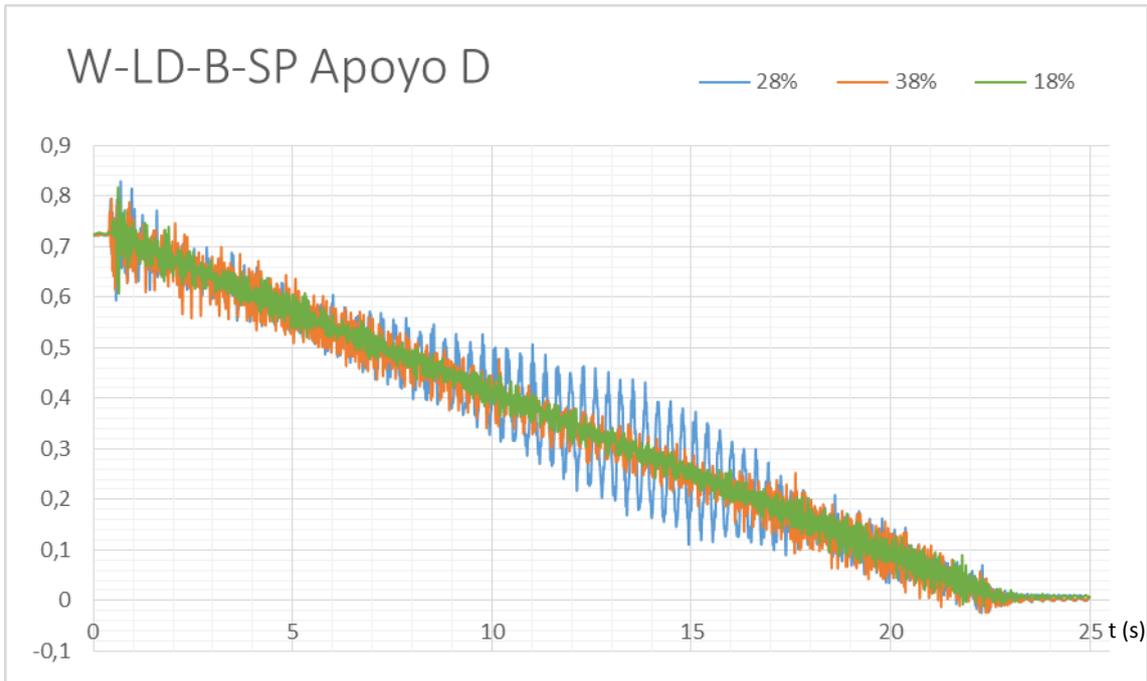


Ilustración 55. W-LD-B-SP Apoyo D.

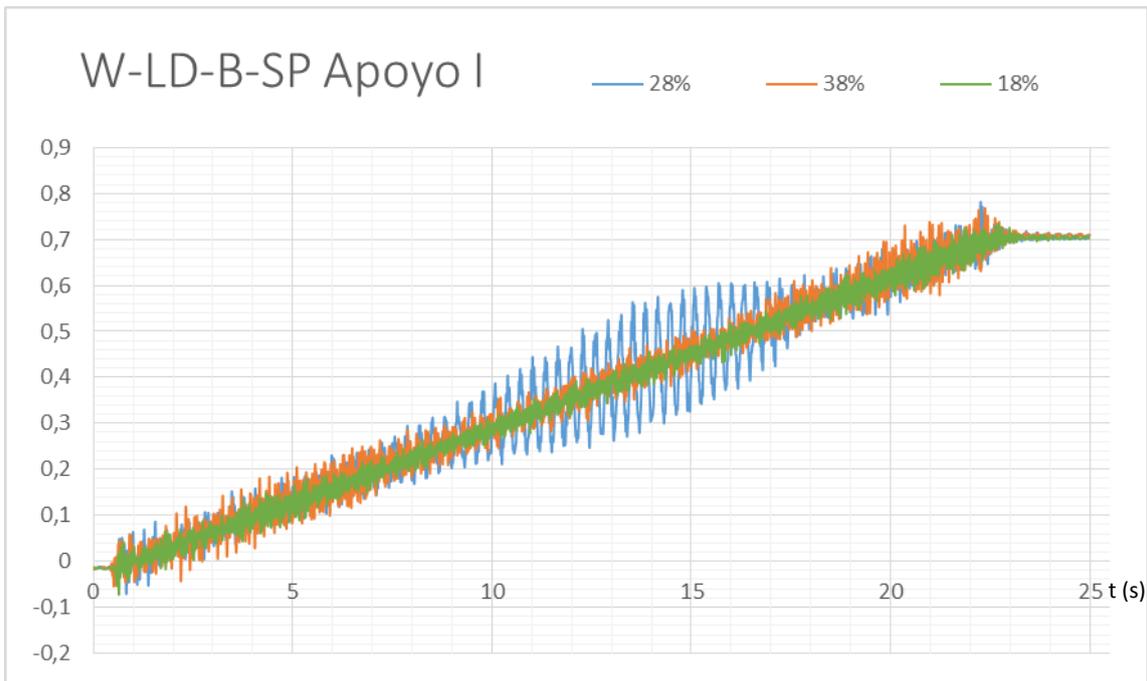


Ilustración 56. W-LD-B-SP Apoyo I.

En las gráficas de las reacciones en los apoyos se observa un comportamiento similar. La frecuencia menor es la que genera menores fluctuaciones del valor, generando una gráfica que dista poco de la que generaría el robot solamente transitando sobre la viga. En el caso de frecuencia mayor, se generan mayores picos pero tampoco excesivamente

alejados de la tendencia lineal. Para la gráfica de la frecuencia que genera resonancia, sin embargo, se ve perfectamente cómo se alejan los valores de dicha tendencia. Aunque este caso es, dentro de los realizados con el TMD bloqueado, en el que menos efecto tiene la resonancia, ya se puede observar el comportamiento de la viga.

#### 4.2.4.3. Ensayos W-LD-B-P

Para el siguiente bloque de ensayos, se colocará el peso extra sobre la leva delantera. Para todos los ensayos, la velocidad de avance del robot es la misma, solamente variando la velocidad de rotación de la leva. De esta manera, la leva dará un distinto número de vueltas en cada ensayo, ya que comenzará a girar a la vez que empieza a caminar el robot, y parará en el momento que este también pare.

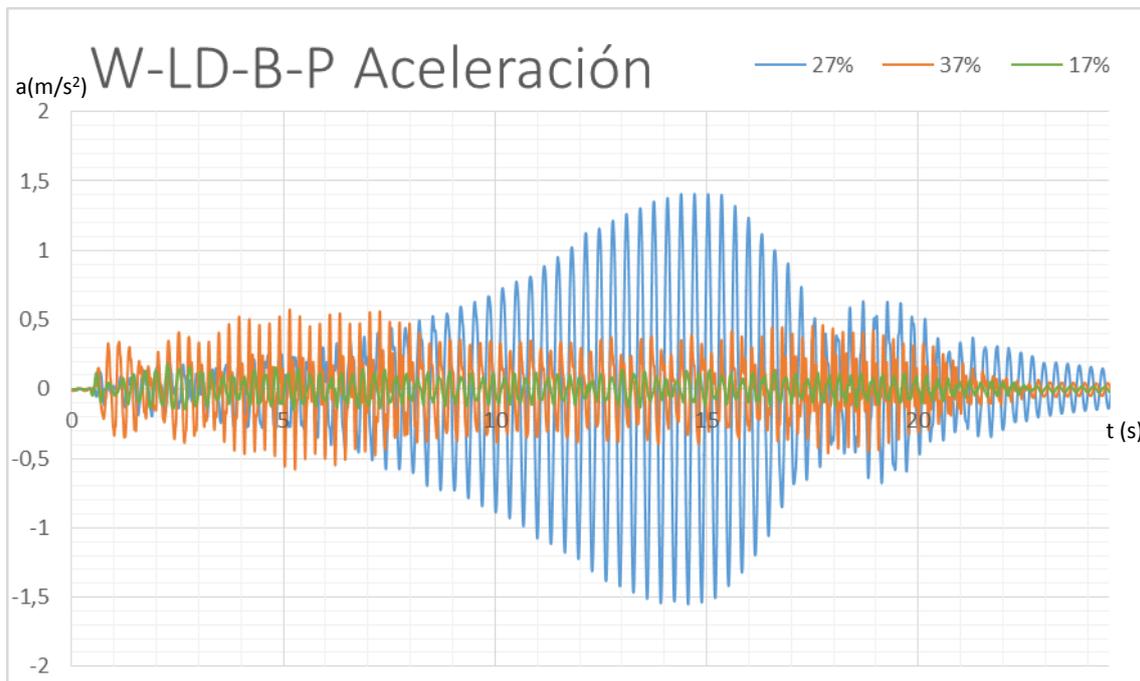


Ilustración 57. W-LD-B-P Aceleración.

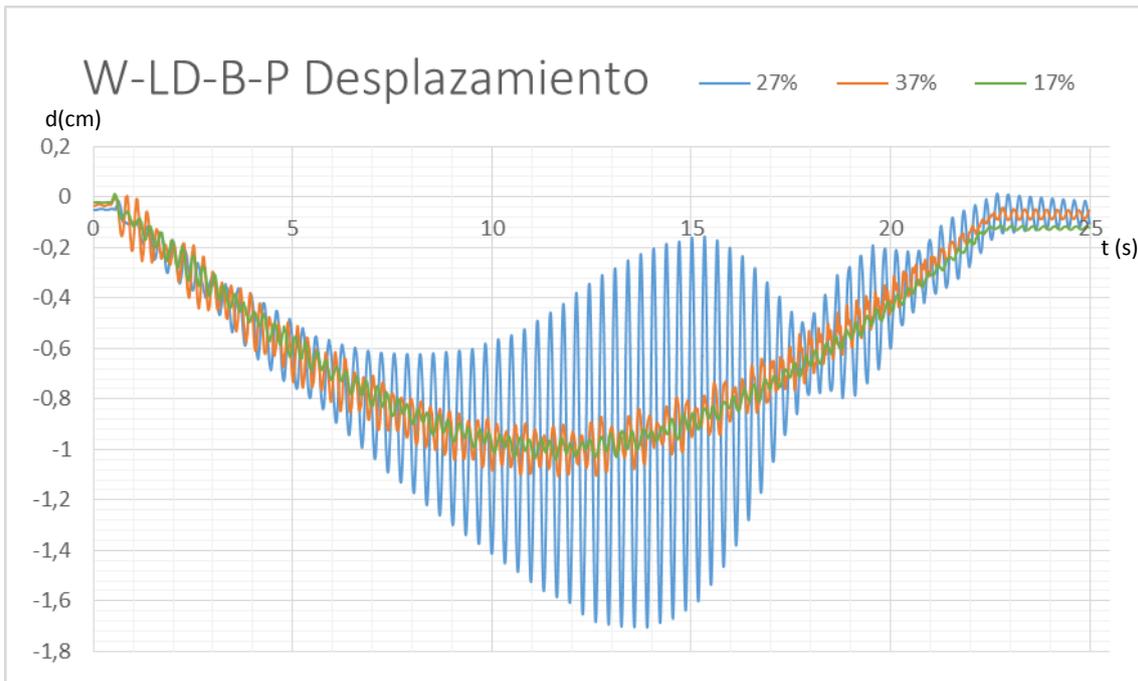


Ilustración 58. W-LD-B-P Desplazamiento.

	17%		27%		37%
RMS	0,064	RMS	0,513	RMS	0,205
FC	2,832	FC	3,028	FC	2,822

Tabla 37. W-LD-B-P.

En estas gráficas se hace más patente el efecto de la resonancia. La amplitud de la gráfica azul (la correspondiente a la frecuencia que genera resonancia) es mucho mayor que en los otros dos casos. Sin embargo, una vez que el robot ha recorrido unos dos tercios de la longitud de la viga, esta decrece rápidamente. No se trata del caso más preocupante dentro de los estudiados.

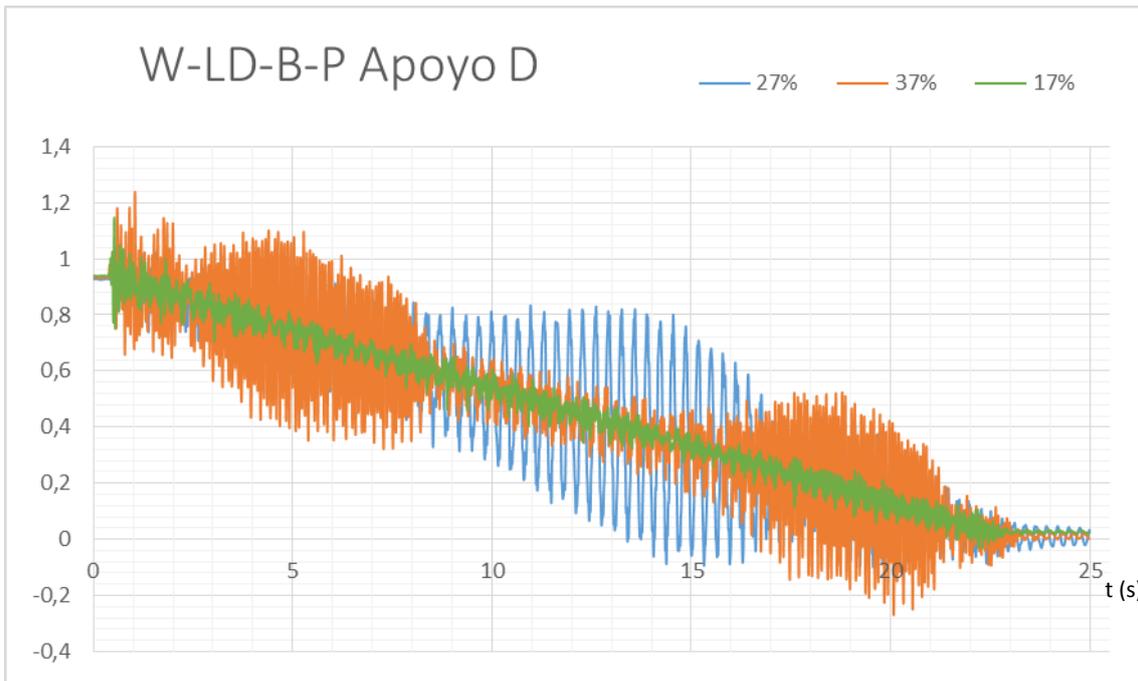


Ilustración 59. W-LD-B-P Apoyo D.

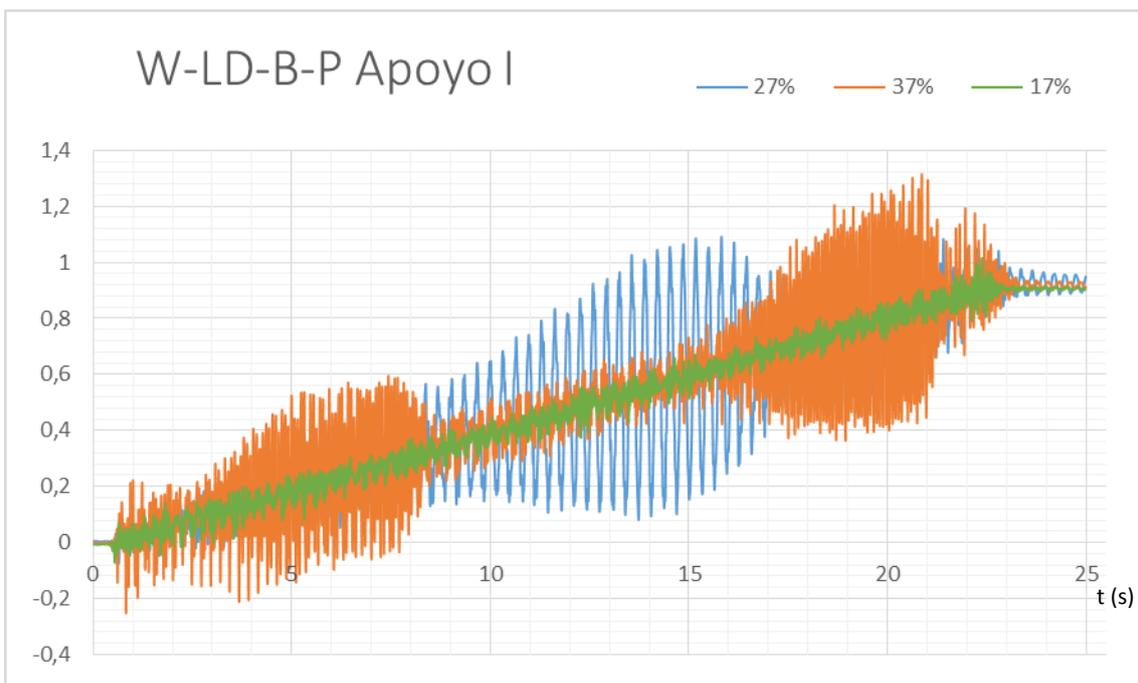


Ilustración 60. W-LD-B-P Apoyo I

Se produce un efecto digno de mención al analizar las reacciones en los apoyos. Al trabajar en la frecuencia mayor de las tres, la viga trabaja en otro modo de vibración, generando resonancia en este modo. Por ello, durante el primer cuarto y el último cuarto del tránsito, se observa como las fluctuaciones de las reacciones son mayores que en los otros dos casos. Es un comportamiento diferente al principal que se pretende analizar en este TFG, que merece la pena ser comentado y puede ser analizado de manera más profunda en futuras investigaciones.

4.2.4.4. Ensayos W-LD-SB-SP

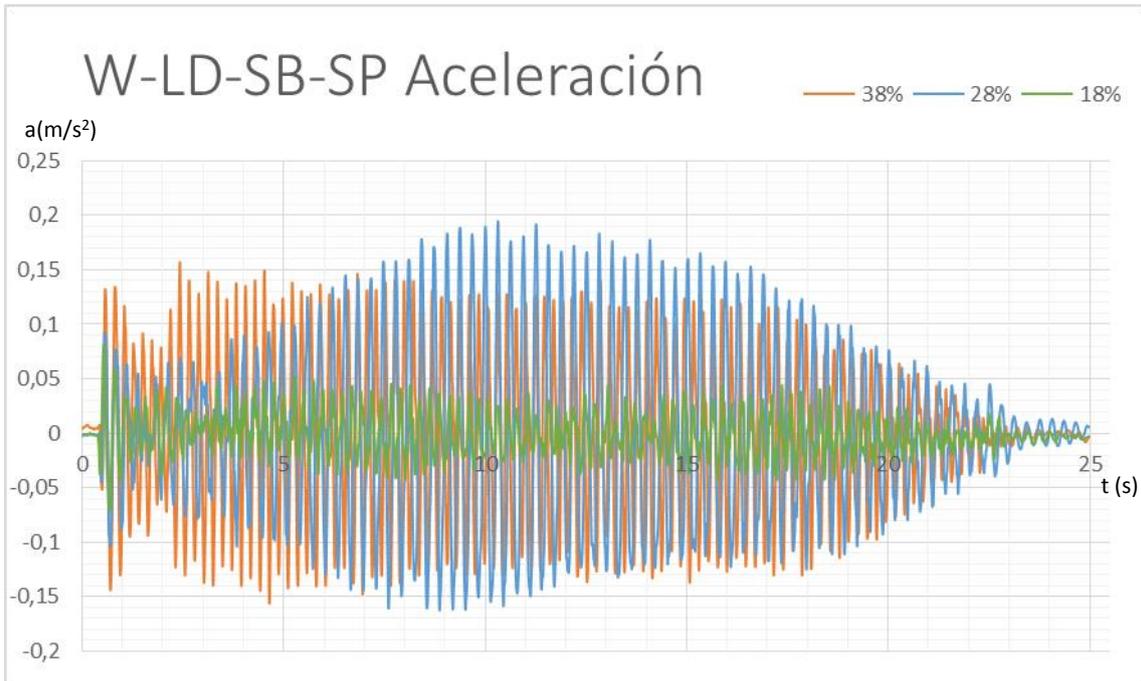


Ilustración 61. W-LD-SB-SP Aceleración

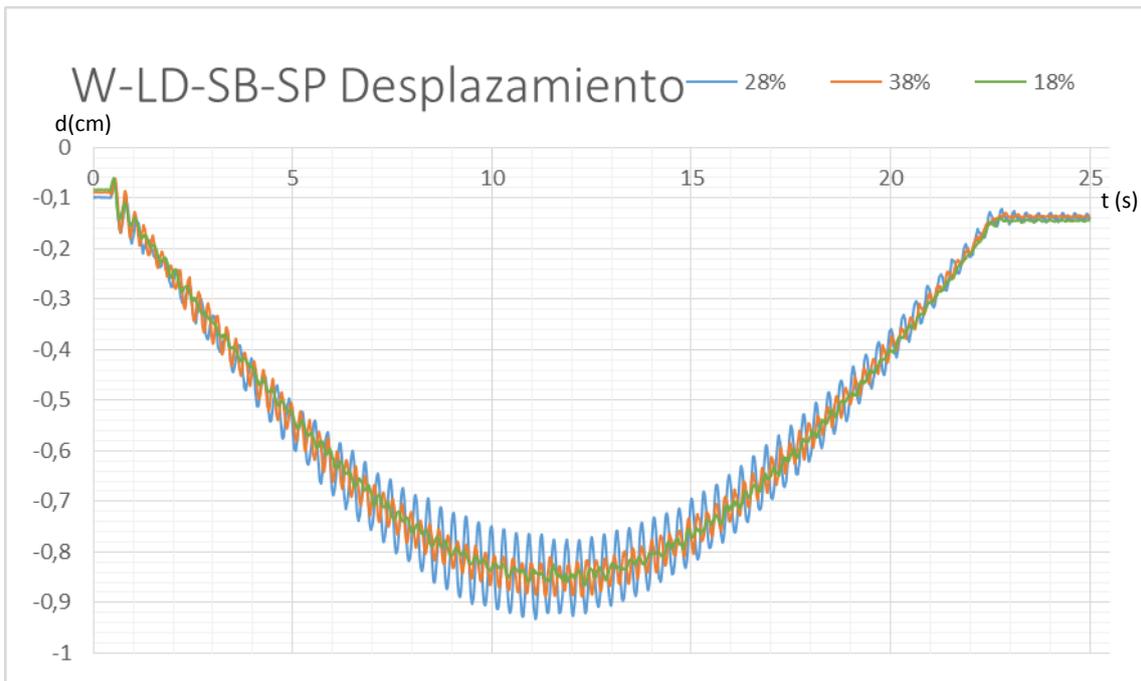


Ilustración 62. W-LD-SB-SP Desplazamiento.

18%		28%		38%	
RMS	0,019	RMS	0,079	RMS	0,070
FC	4,309	FC	2,473	FC	2,247

Tabla 38. W-LD-SB-SP.

Una vez desbloqueado el TMD, el efecto es muy claro. Las aceleraciones se vuelven similares en los tres casos. Si bien el desplazamiento sigue siendo mayor en el caso intermedio, hay una gran diferencia a los casos anteriores. La RMS sigue siendo mayor, pero en un orden mucho menor. Se comparará mejor en apartados posteriores.

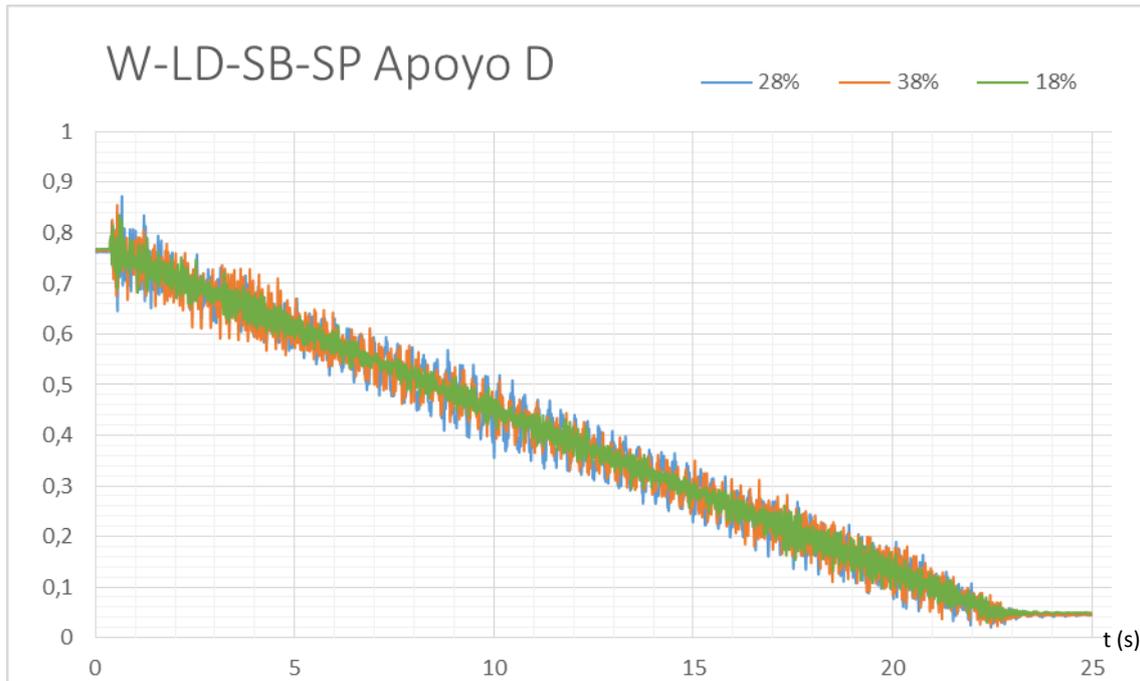


Ilustración 63. W-LD-SB-SP Apoyo D.

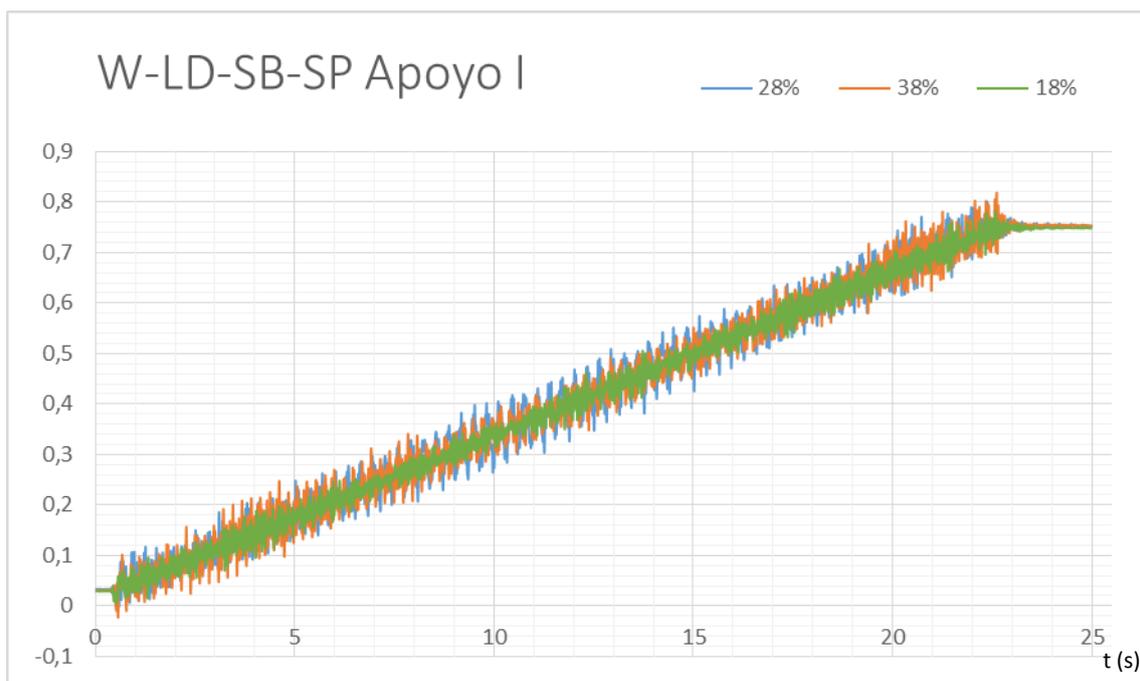


Ilustración 64. W-LD-SB-SP Apoyo I.

En cuanto a las reacciones en los apoyos observadas en las ilustraciones 63 y 64, las tres gráficas prácticamente se superponen, es difícil distinguir entre unas y otras. Es evidente la mejora que aporta el TMD al comportamiento de la viga.

#### 4.2.4.5. Ensayos W-LD-SB-P

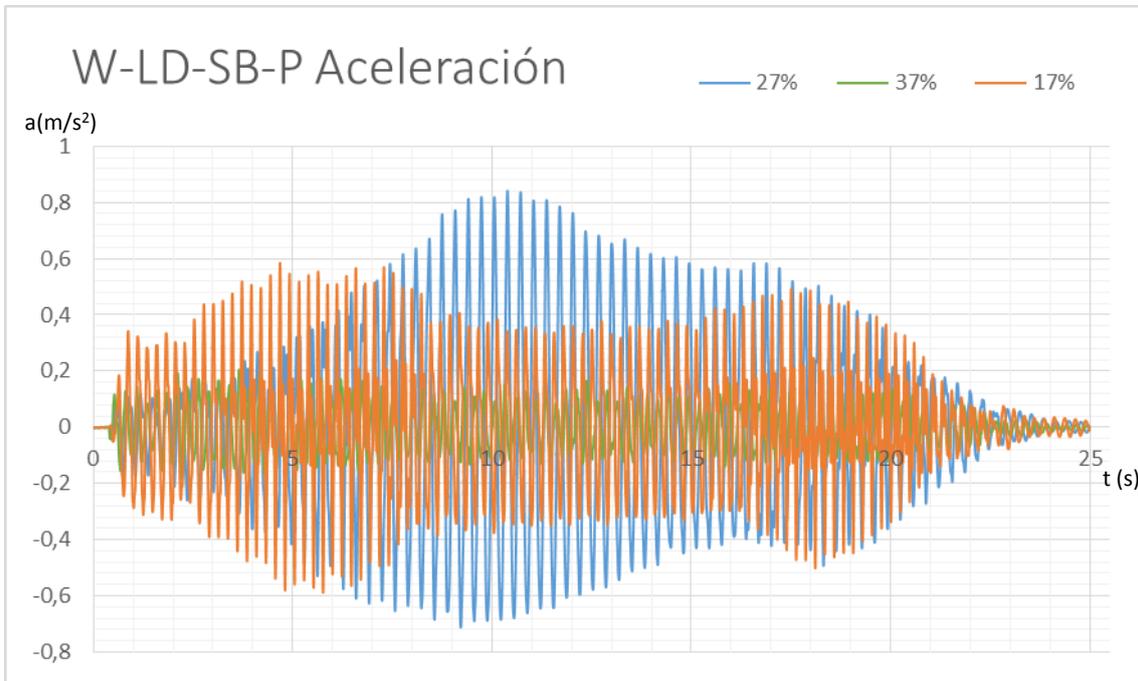


Ilustración 65. W-LD-SB-P Aceleración.

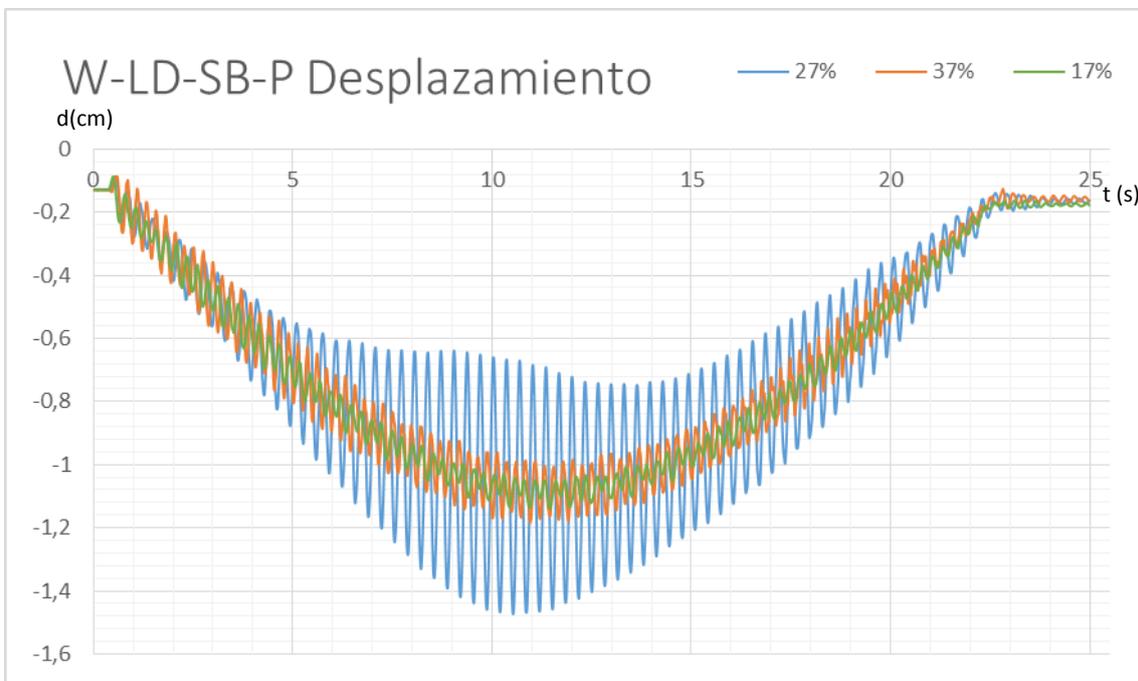


Ilustración 66. W-LD-SB-P- Desplazamiento.

18%		28%		38%	
RMS	0,078	RMS	0,312	RMS	0,218
FC	2,624	FC	2,694	FC	2,702

Tabla 39. W-LD-SB-P.

En la gráfica de aceleración se observa el comportamiento antes descrito, de la viga trabajando en un modo distinto al fundamental. La aceleración debida a la resonancia sigue siendo mayor, pero es mitigada por el TMD. En cuanto a desplazamiento, se hace patente el aumento respecto a los otros dos casos, pero sin llegar a valores comprometedores.

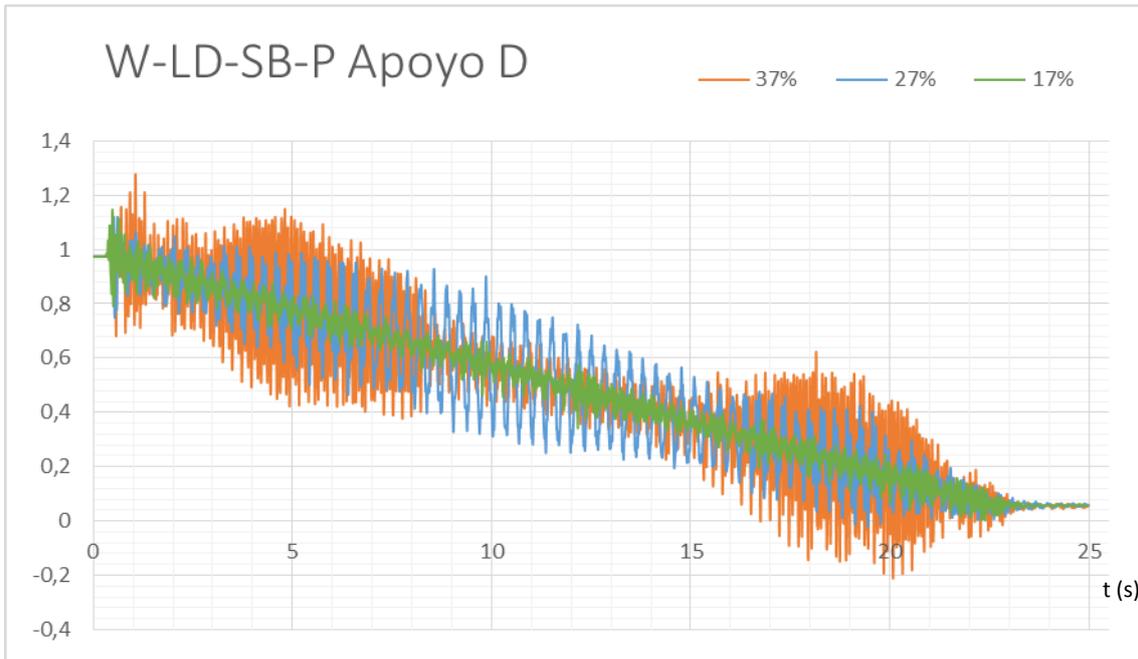


Ilustración 67. W-LD-SB-P Apoyo D.

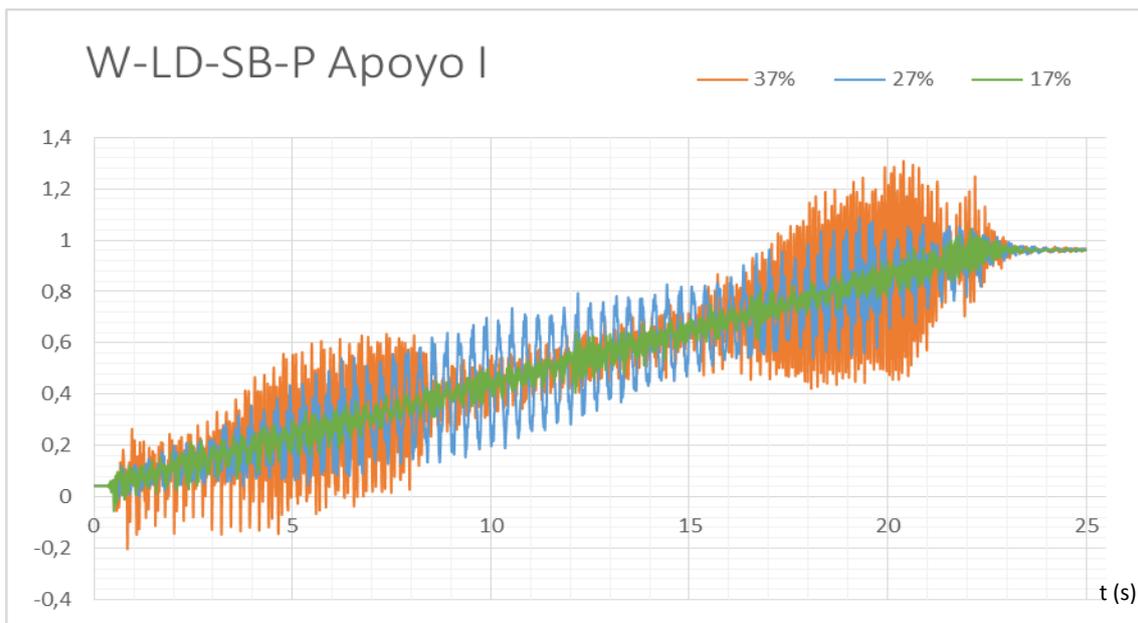


Ilustración 68. W-LD-SB-P Apoyo I.

El TMD funciona bien para limitar los esfuerzos de los apoyos. De hecho, las mayores amplitudes las provoca la frecuencia mayor, no la frecuencia de resonancia. Es un comportamiento diferente al que se observa en cuanto a desplazamientos.

#### 4.2.4.6. Resumen W-LD

Se presentan ahora las comparaciones entre los casos con frecuencia menor, de resonancia, y mayor, respectivamente. Los valores a comparar son los mismos que anteriormente, la RMS y el factor de cresta.

W-LD-B-SP	
RMS	0,020
FC	5,015
W-LD-B-P	
RMS	0,064
FC	2,832
W-LD-SB-SP	
RMS	0,019
FC	4,309
W-LD-SB-P	
RMS	0,078
FC	2,624

Tabla 40. W-LD Frecuencia menor.

Mejora TMD(%)	SP	P
RMS	5,26	-22,53
FC	14,08	7,31

Tabla 41. W-LD mejora TMD frecuencia menor.

Para la frecuencia menor, el TMD no produce apenas efecto. De hecho, en el caso con peso, incluso aumenta la RMS. Esto es debido a que el TMD al moverse genera una fuerza, que en este caso se suma a la producida por la leva. Sin embargo el movimiento de la viga en este caso es tan pequeño que no es un caso problemático. En el caso más desfavorable, sigue teniendo un comportamiento mejor que la viga en condiciones de resonancia.

W-LD-B-SP	
RMS	0,150
FC	2,995
W-LD-B-P	
RMS	0,513
FC	3,028
W-LD-SB-SP	
RMS	0,079
FC	2,473
W-LD-SB-P	
RMS	0,312
FC	2,694

Tabla 42. W-LD frecuencia de resonancia.

Mejora TMD(%)	SP	P
RMS	47,59	39,08
FC	17,41	11,03

Tabla 43. W-LD mejora TMD frecuencia de resonancia.

Este caso es el más interesante. El TMD produce una gran mejora en la RMS, haciendo disminuir su valor en un 47,58% (sin peso extra) y un 39,07% (con peso). Es una gran mejora, observable en las siguientes gráficas:

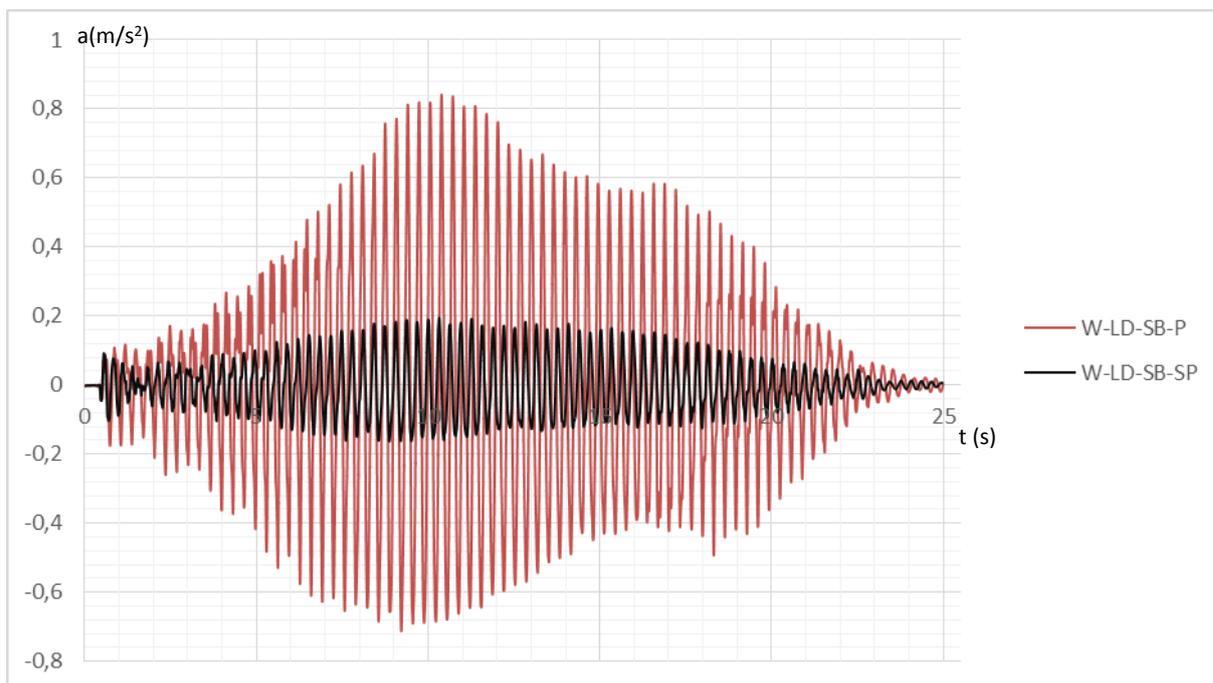


Ilustración 69. W-LD-SB comparación P-SP.

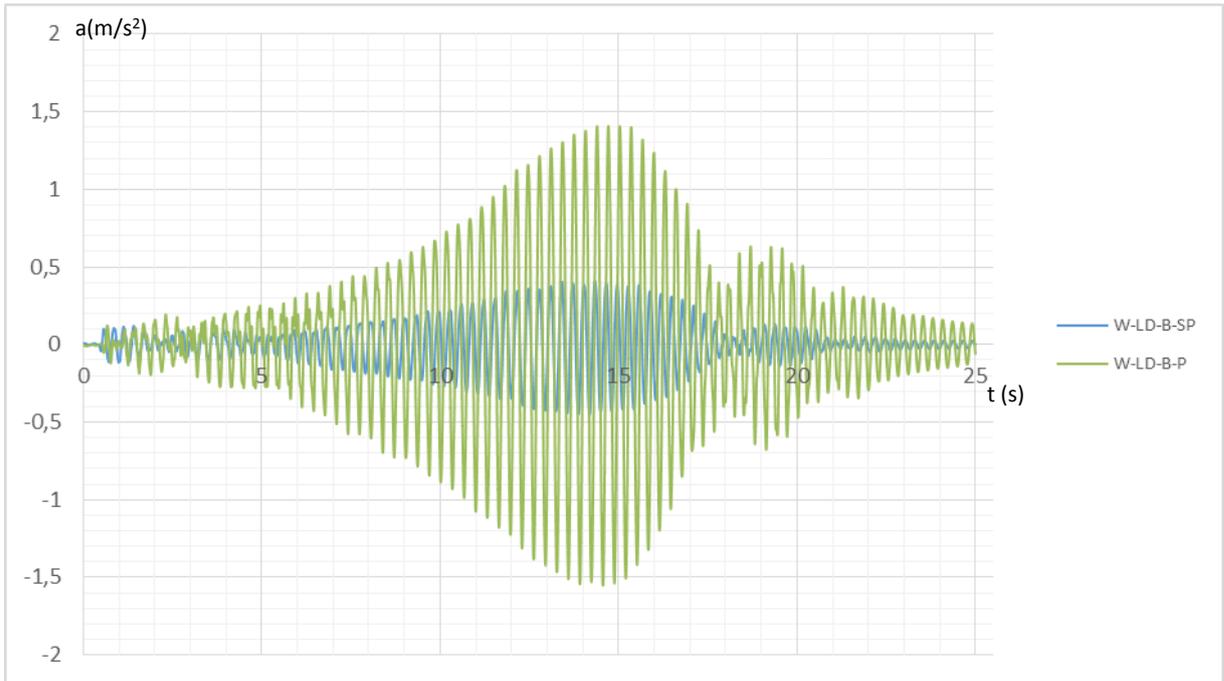


Ilustración 70. W-LD-B comparación P-SP.

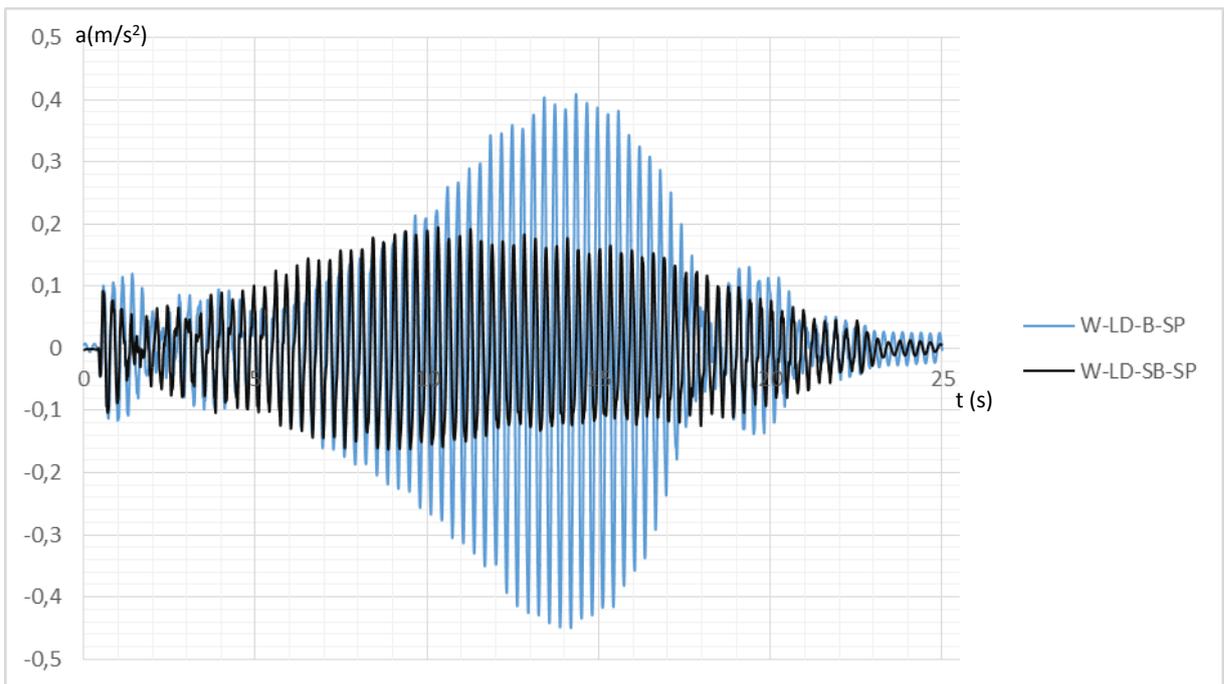


Ilustración 71. W-LD-SP comparación B-SB.

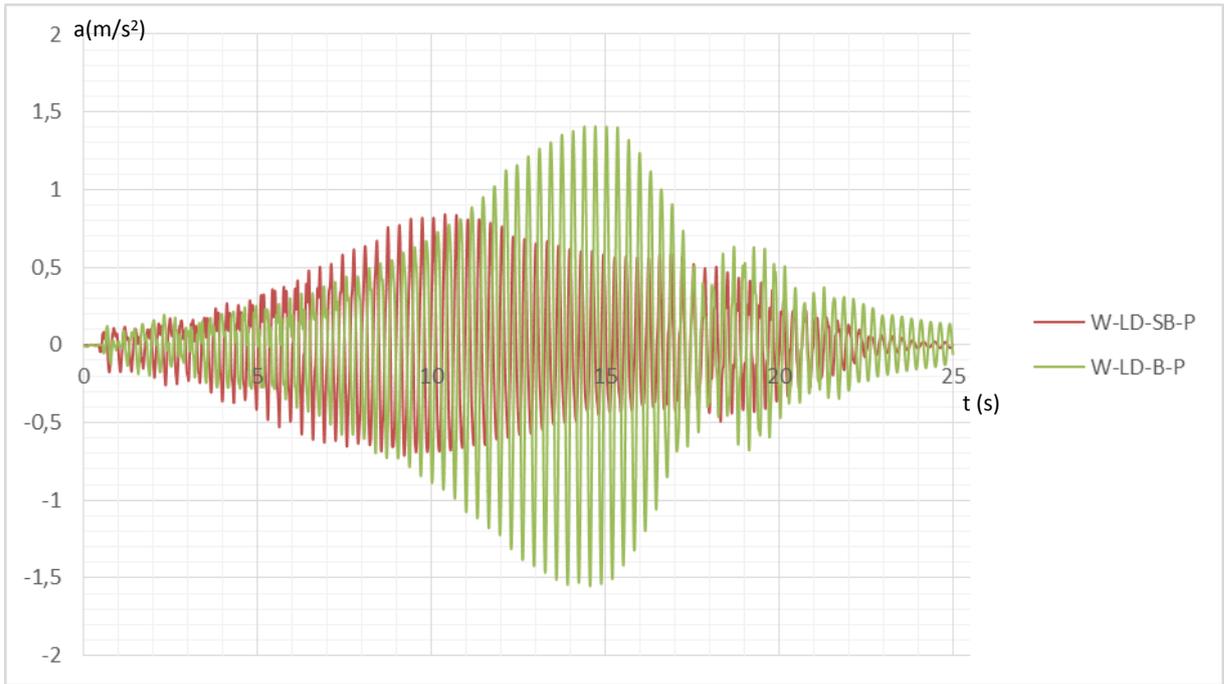


Ilustración 72. W-LD-P comparación B-SB.

Como se puede observar en estas ilustraciones, el TMD limita el crecimiento de la aceleración del punto medio de la viga. El comportamiento es similar para desplazamientos y reacciones, pero se ha elegido la representación de la aceleración ya que es donde mejor se observa en una gráfica su efecto.

W-LD-B-SP	
RMS	0,0648
FC	2,513
W-LD-B-P	
RMS	0,205
FC	2,822
W-LD-SB-SP	
RMS	0,070
FC	2,247
W-LD-SB-P	
RMS	0,218
FC	2,702

Tabla 44. W-LD frecuencia mayor.

Mejora TMD(%)	SP	P
RMS	-7,84	-6,17
FC	10,59	4,27

Tabla 45. W-LD mejora TMD frecuencia mayor.

Para frecuencias mayores a la de resonancia, se observa otra vez como el TMD no mejora el comportamiento de la estructura. Mejora el factor de cresta en ambos casos, minimizando los picos que presenta la aceleración, pero su valor RMS es peor. Sin

embargo, al igual que en la frecuencia menor, no se trata de casos críticos por lo que no debe de ser preocupante este efecto.

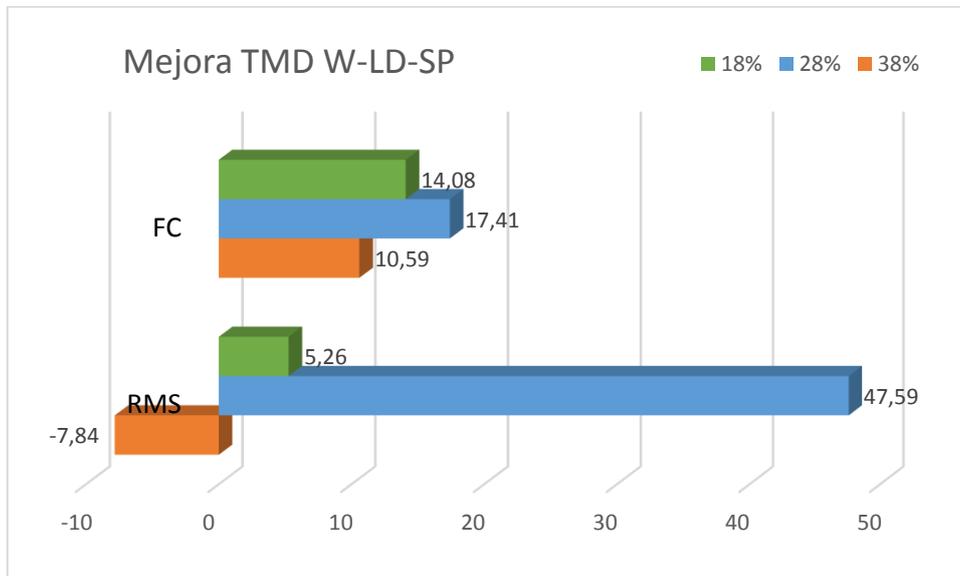


Ilustración 73. Mejora TMD W-LD-SP

La ilustración 73 muestra a modo de resumen la mejora que produce el TMD en los dos valores analizados: el factor de cresta y la RMS. La mayor mejora se produce en el caso de resonancia como era de esperar. La RMS empeora para la frecuencia mayor, pero si se observan las gráficas de aceleración con el TMD libre (ilustración 61) se ve que el comportamiento es similar en el caso de resonancia y en el caso de la frecuencia mayor. Por tanto el comportamiento, aunque es peor que cuando se bloquea el TMD, no es para nada peligroso para la estructura.

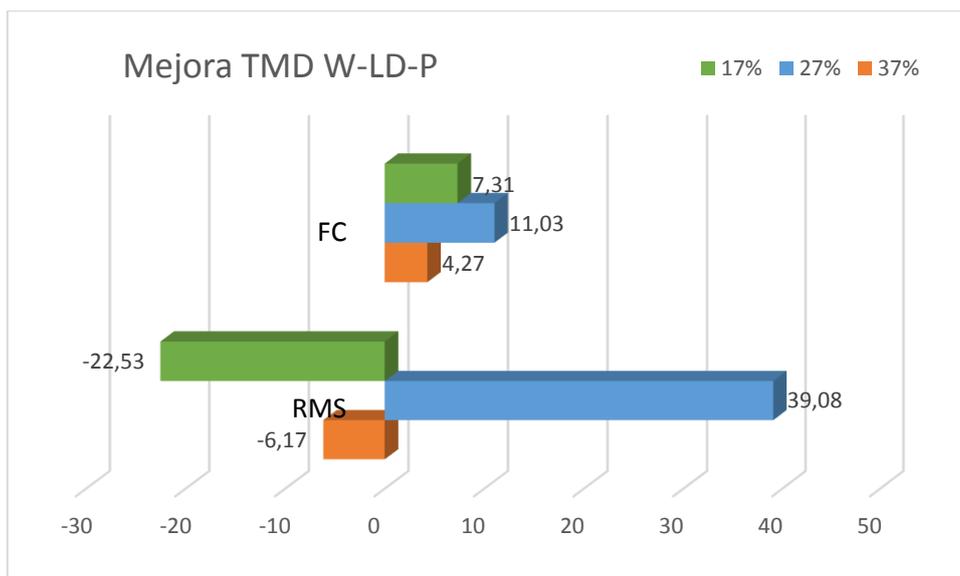


Ilustración 74. Mejora TMD W-LD-P

Cuando se coloca el peso extra sobre la estructura se puede observar una tendencia similar. En el caso de resonancia la mejora es muy grande, pero para los otros dos casos se empeora la RMS.

#### 4.2.5. Ensayos W-LT

##### 4.2.5.1. Ensayos W-LT-B-SP

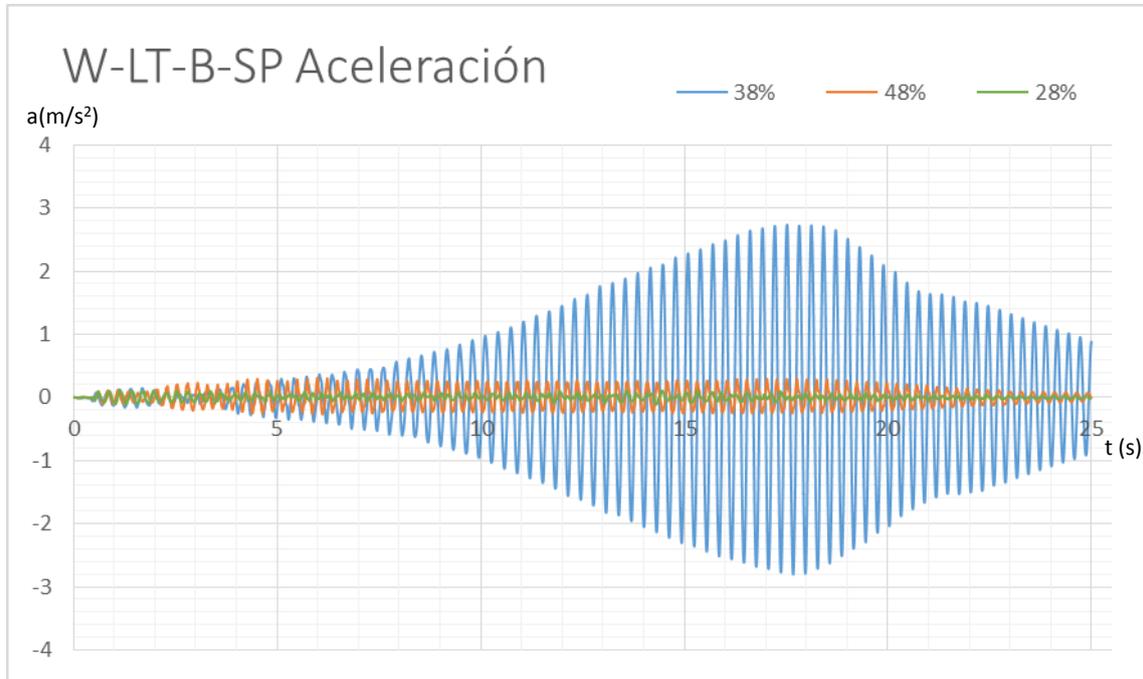


Ilustración 75. W-LT-B-SP Aceleración.

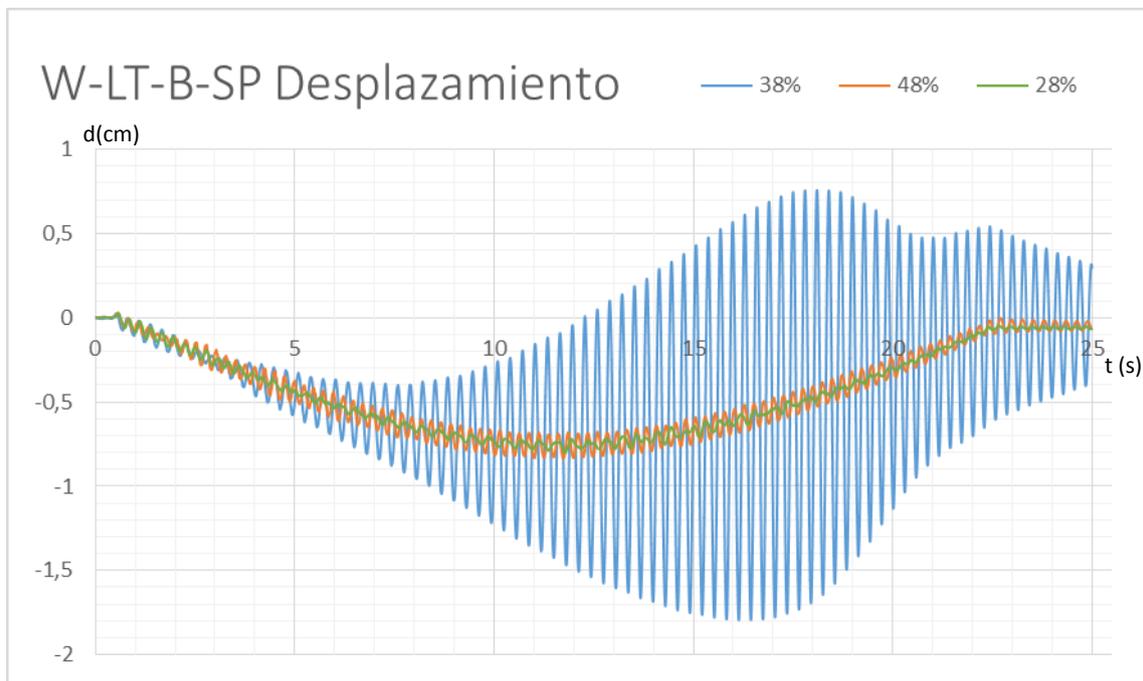


Ilustración 76. W-LT-B-SP Desplazamiento.

Los valores de aceleración y desplazamiento del punto medio observados en las ilustraciones 73 y 74 en los casos en que se manifiesta la resonancia son muy elevados. La viga llega a tener una amplitud de desplazamiento de unos 2 cm, lo cual no es nada despreciable para una viga de esta longitud. Es aproximadamente un 0.3% de la longitud de la viga. Si se llevase a la escala real de la pasarela, esta tendría un desplazamiento vertical de más de 20 cm en su punto medio.

	28%		38%		48%
RMS	0,037	RMS	1,081	RMS	0,145
FC	3,095	FC	2,593	FC	2,137

Tabla 46. W-LT-B-SP.

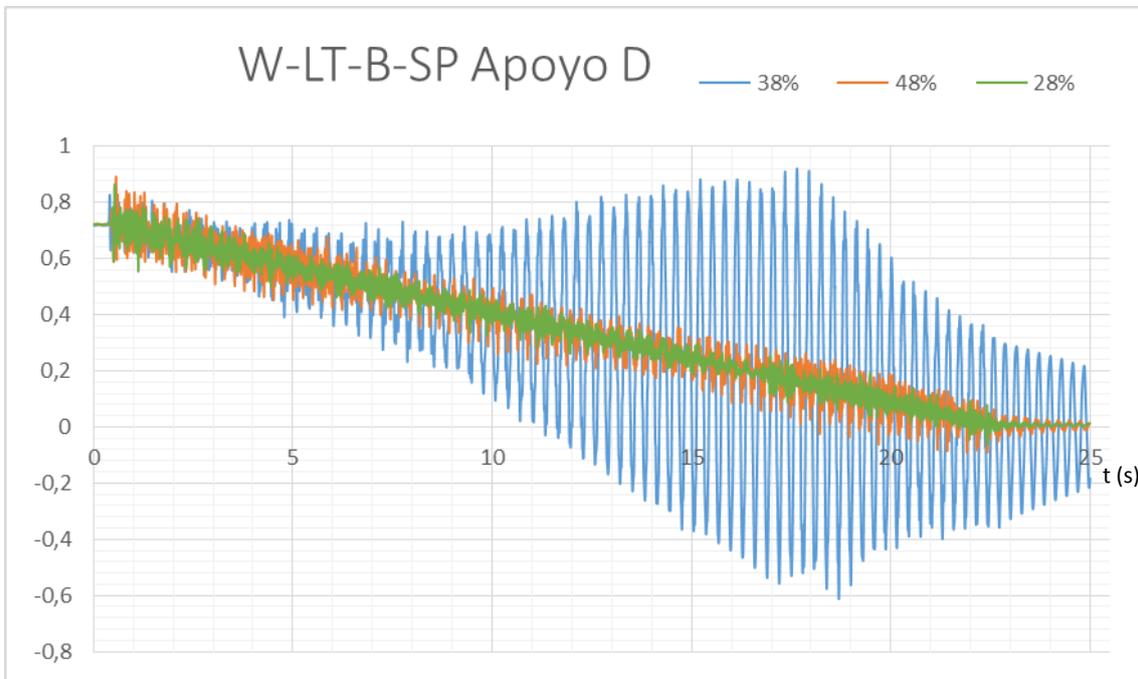


Ilustración 77. W-LT-B-SP Apoyo D.

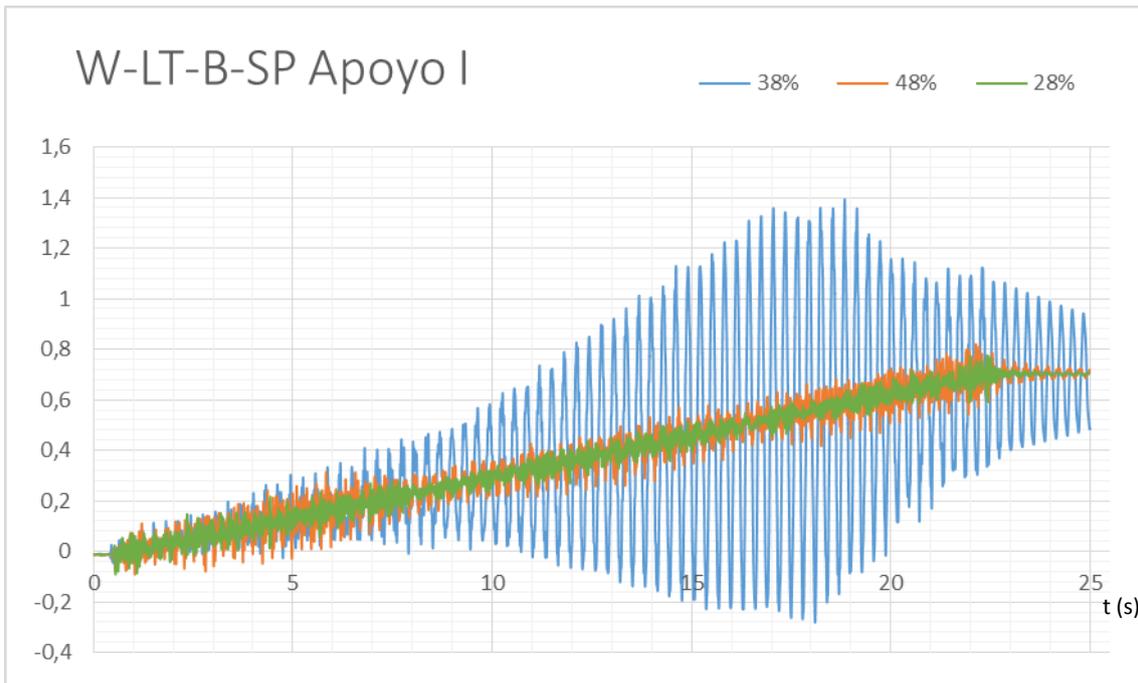


Ilustración 78. W-LT-B-SP Apoyo I.

#### 4.2.5.2. Ensayos W-LT-B-P

Este ensayo es el que mayores desplazamientos y aceleraciones provoca. Al colocar el peso extra sobre la leva trasera, aumentamos la fuerza generada por esta, y al entrar en resonancia la fuerza con el movimiento de la viga, se alcanzan unos valores muy altos tanto de aceleración como de desplazamiento.

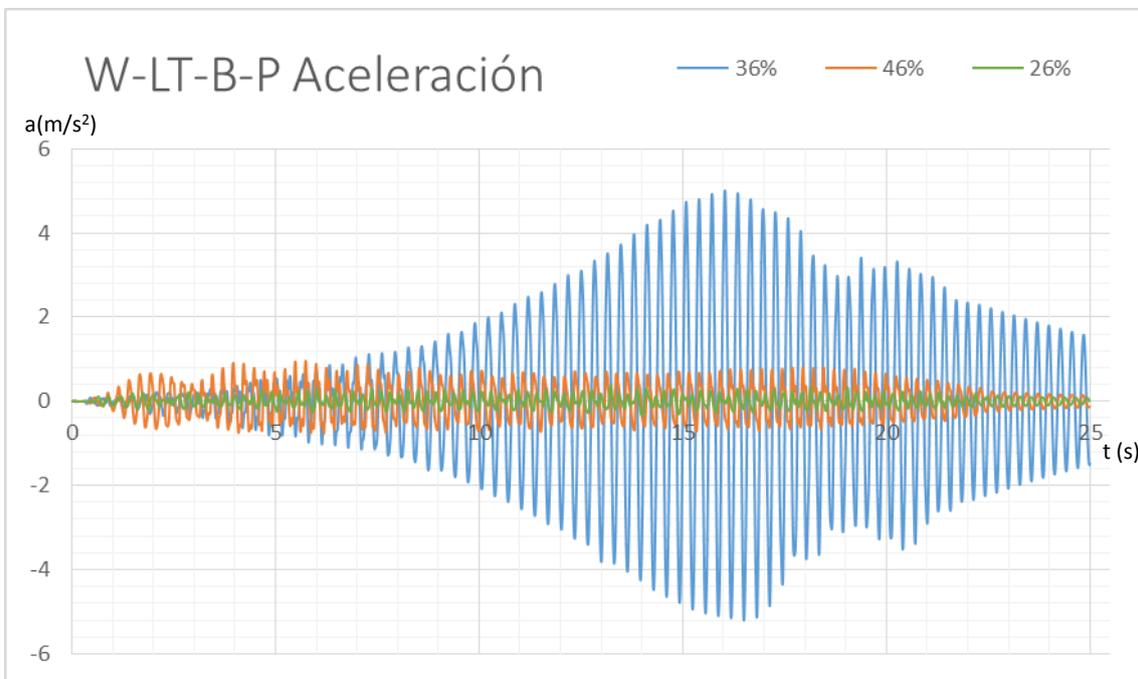


Ilustración 79. W-LT-B-P Aceleración.

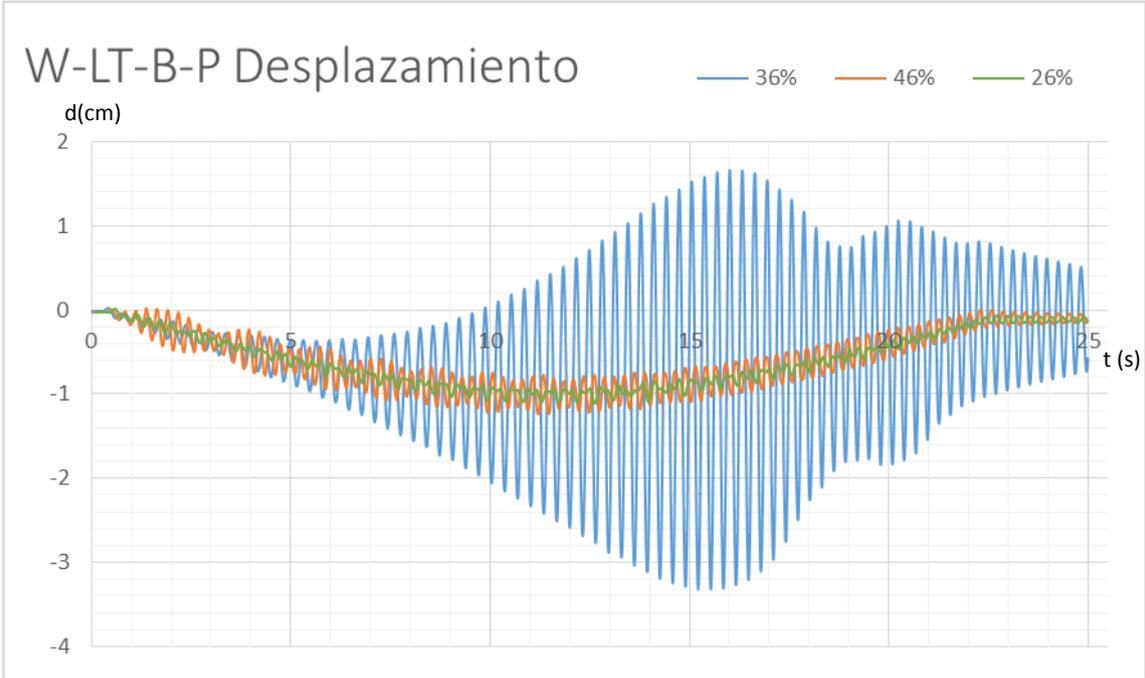


Ilustración 80. W-LT-B-P Desplazamiento.

	26%	36%	46%
RMS	0,121	1,902	0,410
FC	3,108	2,735	2,343

Tabla 47. W-LT-B-P.

Véase como la amplitud máxima del desplazamiento supera los 4 cm, doblando casi el caso anterior. Del mismo modo lo hace la RMS, y con un factor de cresta elevado. Haciendo la analogía con una pasarela real, esta tendría un desplazamiento vertical en su punto medio de más de 45 cm. Se necesitaría un diseño muy cuidadoso para que la pasarela soportase este movimiento, y esta sería completamente intransitable para un peatón.

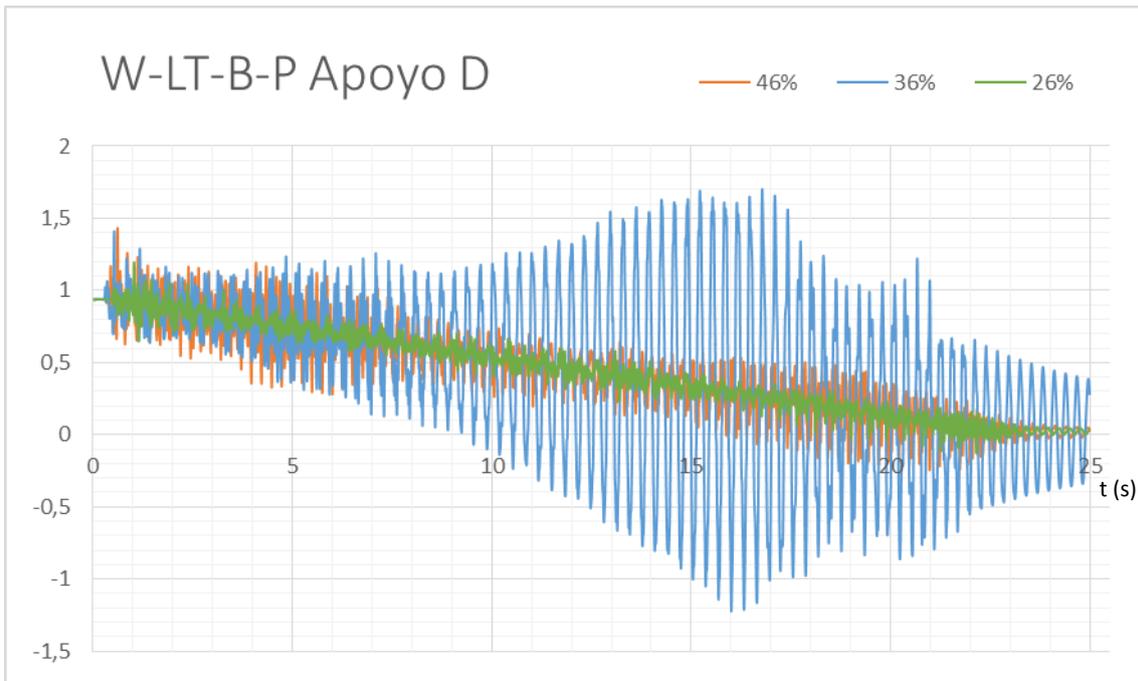


Ilustración 81. W-LT-B-P Apoyo D.

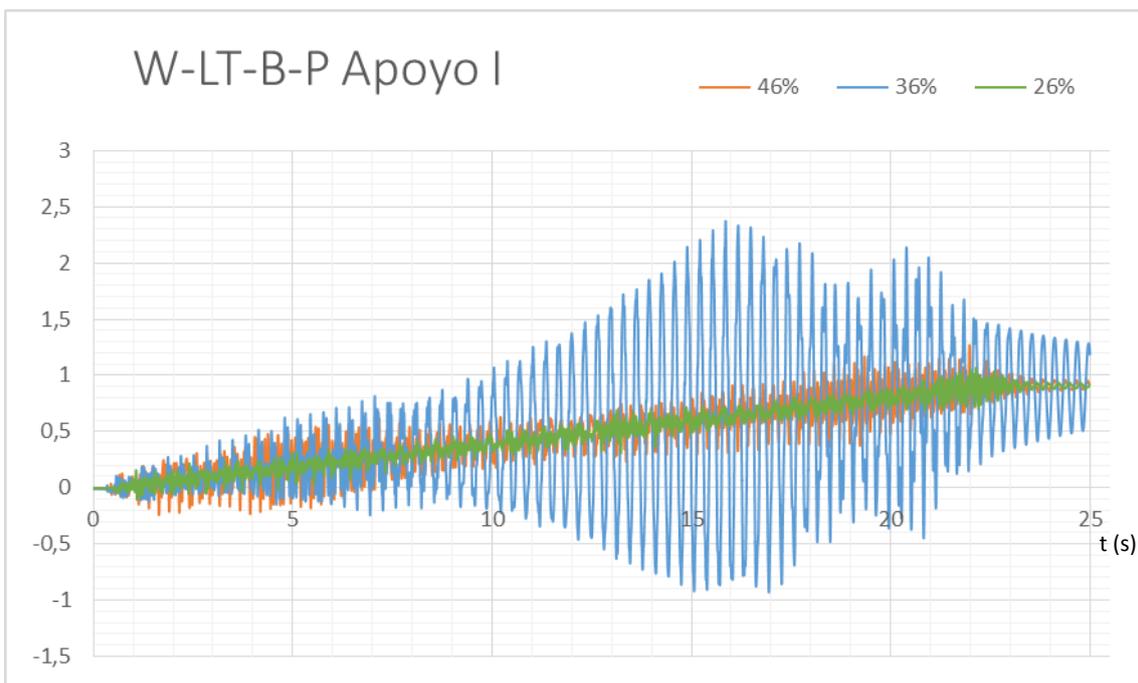


Ilustración 82. W-LT-B-P Apoyo I.

Las representaciones de las reacciones en los apoyos son similares al caso anterior, pero con mayor amplitud. Se observa como los dos casos donde no se produce resonancia son similares, siguiendo la línea que generaría el robot sin leva. Pero en el caso de resonancia, el movimiento que se ha generado es tan grande que, incluso cuando el robot se detiene, la viga continúa durante unos segundos moviéndose. Esto se aprecia en el tramo final de la gráfica; mientras que en los dos casos fuera de resonancia el valor

se estabiliza muy rápidamente en torno al valor que tendría en caso de estar situado el robot en ese punto sin moverse, para el caso donde se ha producido resonancia se puede apreciar la amortiguación natural del sistema. Si se alargase más aún la gráfica, por encima de los 25 segundos, se podría medir esta amortiguación.

#### 4.2.5.3. Ensayos W-LT-SB-SP

Para el siguiente ensayo se retira el peso extra sobre la leva, y se desbloquea el TMD.

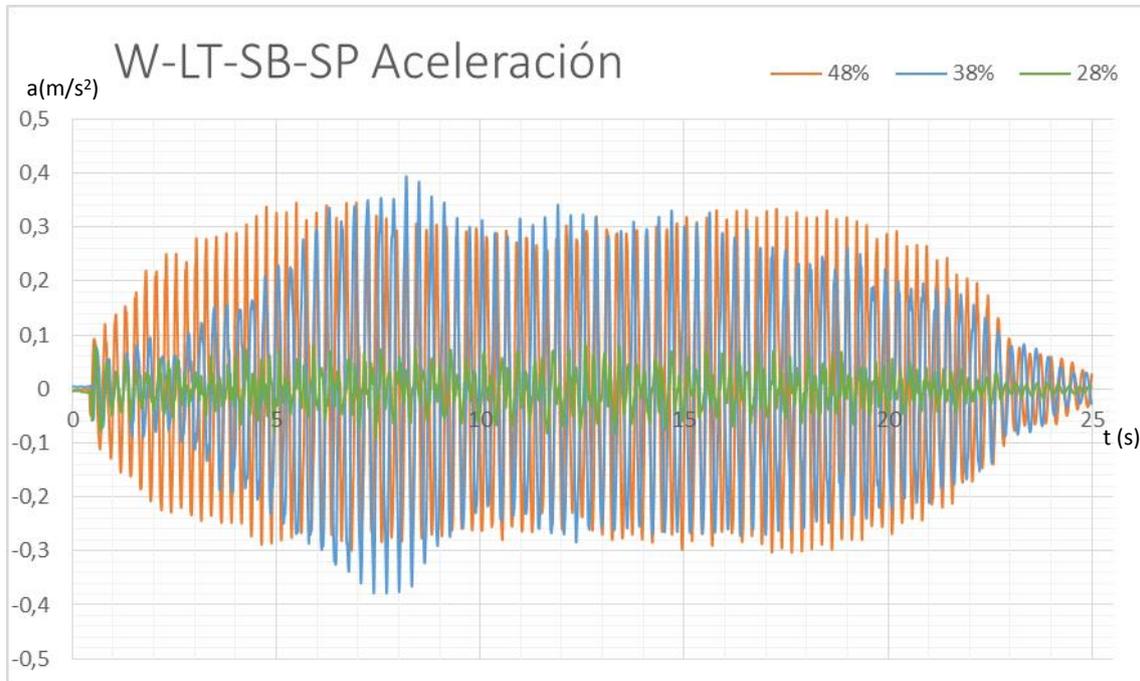


Ilustración 83. W-LT-SB-SP Aceleración.

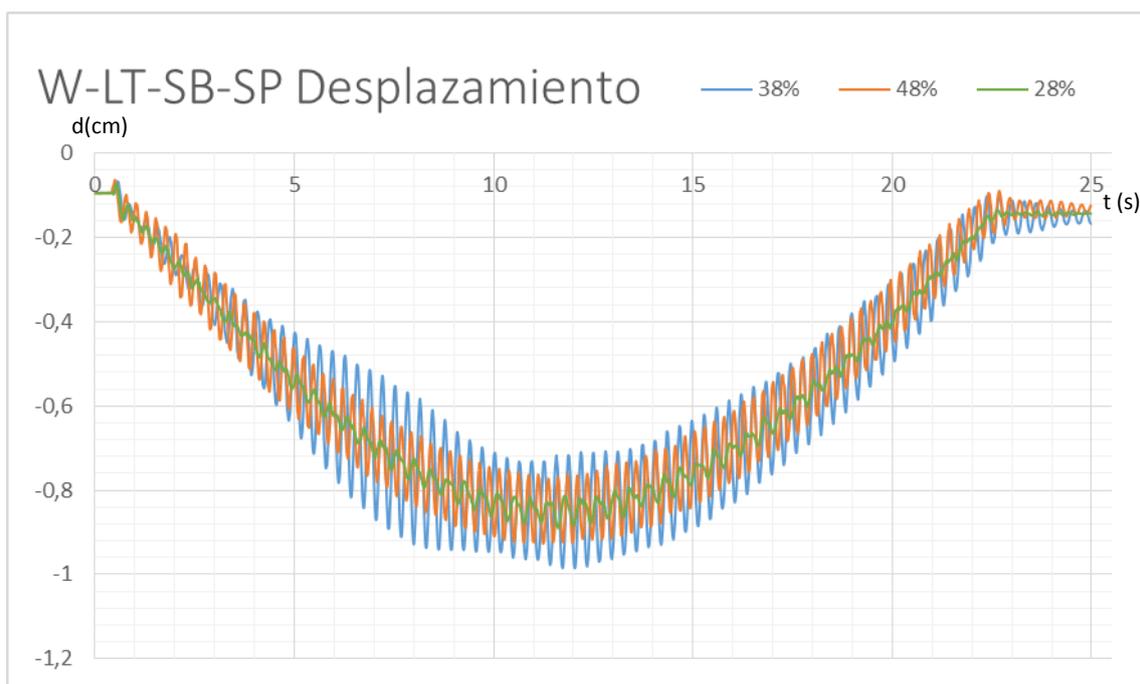


Ilustración 84. W-LT-SB-SP Desplazamiento.

28%		38%		48%	
RMS	0,030	RMS	0,161	RMS	0,173
FC	3,021	FC	2,446	FC	1,990

Tabla 48. W-LT-SB-SP.

La mejora al desbloquear el TMD se hace patente. La aceleración es similar en los tres casos, llegando a ser la RMS incluso menor cuando se produce resonancia que en el caso con mayor frecuencia. Queda patente el buen funcionamiento de este dispositivo, que ha conseguido disminuir las oscilaciones de la viga en gran medida. El análisis numérico de la mejora se verá en el apartado posterior.

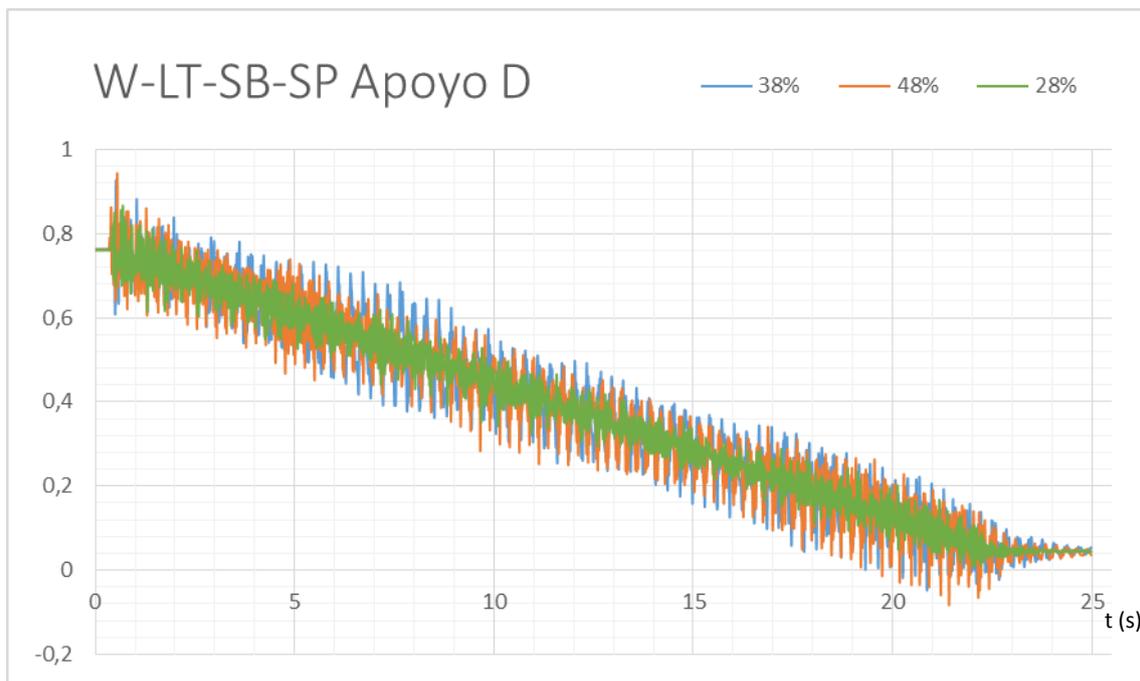


Ilustración 85. W-LT-SB-SP Apoyo D.

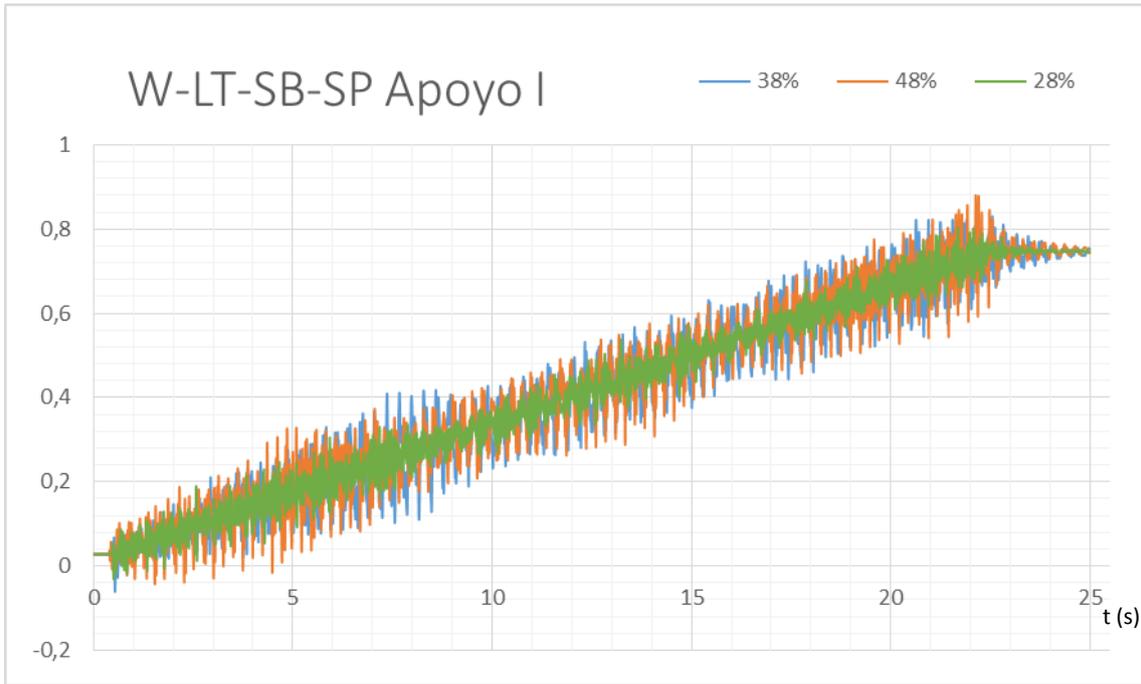


Ilustración 86. W-LT-SB-SP Apoyo I.

En el caso de las reacciones en los apoyos, apenas se pueden distinguir las tres gráficas. Se ha mitigado el efecto de la resonancia gracias al TMD.

4.2.5.4. Ensayos W-LT-SB-P

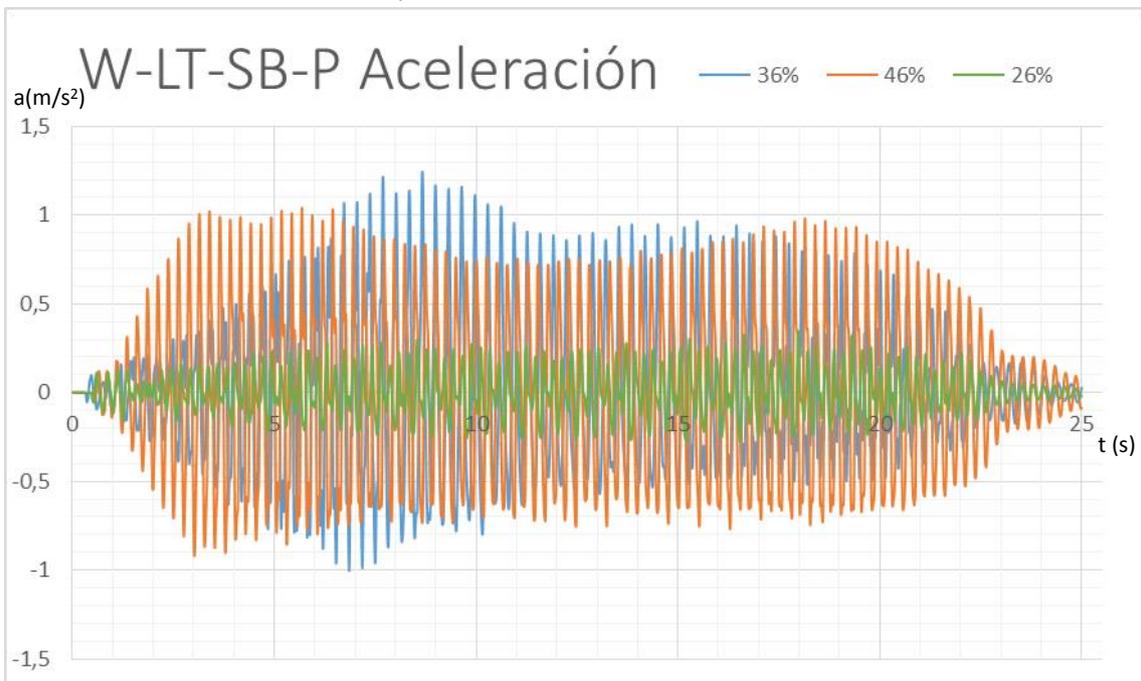


Ilustración 87. W-LT-SB-P Aceleración.

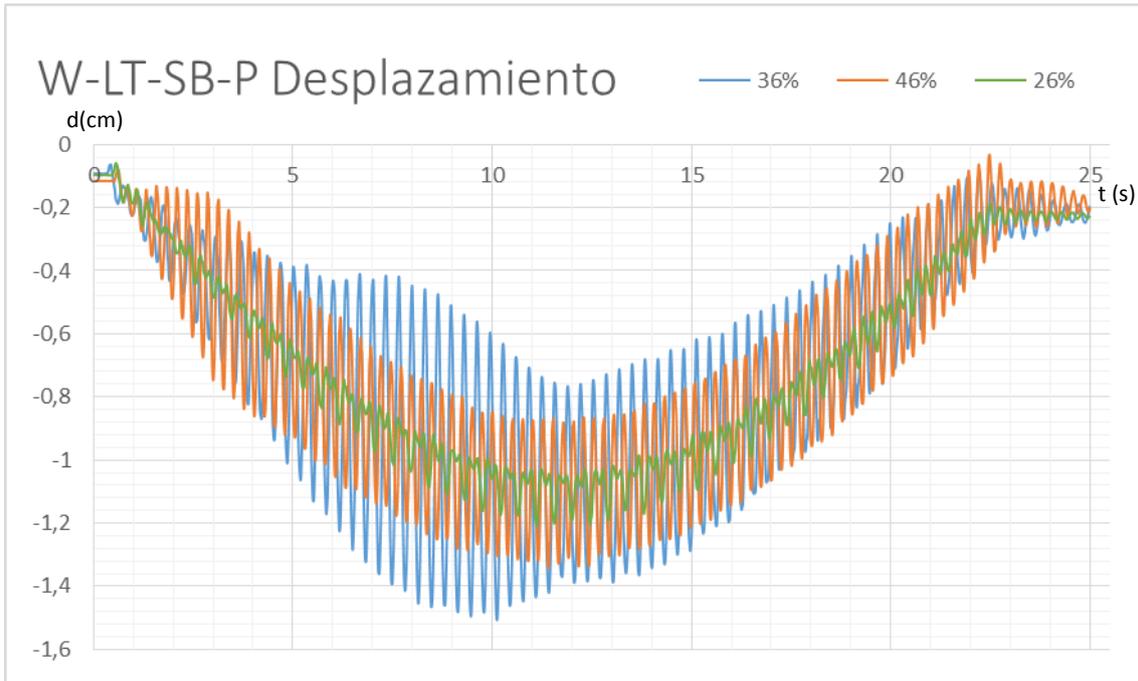


Ilustración 88. W-LT-SB-P Desplazamiento.

	26%	36%	46%
RMS	0,122	0,415	0,492
FC	2,833	3,002	2,115

Tabla 49. W-LT-SB-P.

Al colocar el peso sobre la leva, el comportamiento es similar al caso anterior. La RMS sigue siendo la mayor en el caso de mayor frecuencia. Sin embargo, el factor de cresta del caso intermedio indica unos mayores picos en la aceleración. Como se puede observar en la ilustración 85, ambos casos son similares en cuanto a aceleración.

Para el desplazamiento, la amplitud del caso de resonancia sigue siendo mayor, especialmente en el primer tramo.

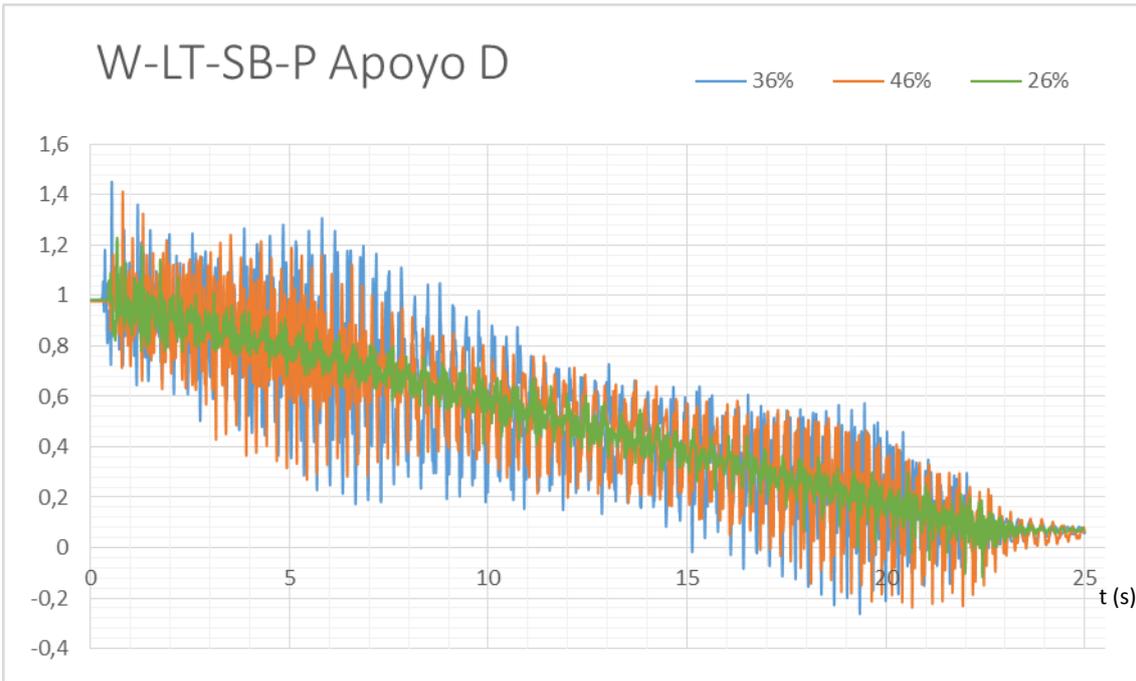


Ilustración 89. W-LT-SB-P Apoyo D.

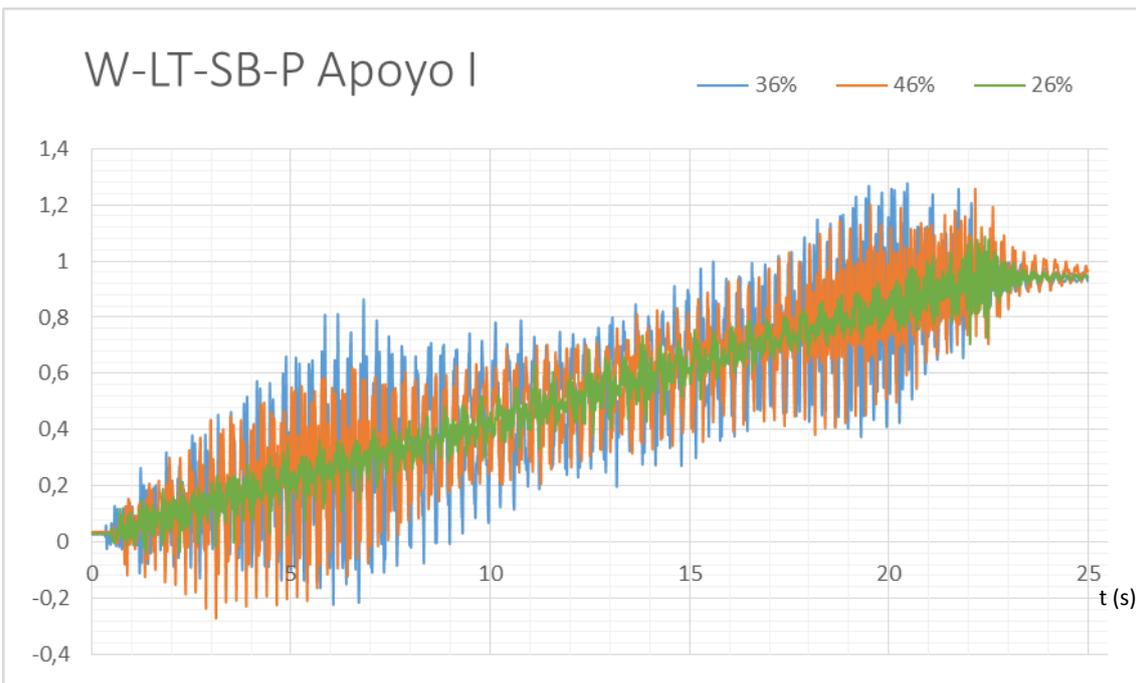


Ilustración 90. W-LT-SB-P Apoyo I.

#### 4.2.5.5. Resumen W-LT

Se presentan ahora los casos comparativos para analizar la mejora que produce el TMD, primero comparando todos los de la frecuencia menor, luego los que producen resonancia, y por último los de la frecuencia mayor. Se comparará en todos los casos el valor de la aceleración.

W-LT-B-SP	
RMS	0,037
FC	3,095
W-LT-B-P	
RMS	0,121
FC	3,108
W-LT-SB-SP	
RMS	0,030
FC	3,021
W-LT-SB-P	
RMS	0,122
FC	2,833

Tabla 50. W-LT frecuencia menor.

Mejora TMD(%)	SP	P
RMS	19,37	-1,07
FC	2,41	8,85

Tabla 51. W-LT mejora TMD frecuencia menor.

El TMD mejora en ambos casos el comportamiento, para una frecuencia menor. Sin peso reduce tanto la RMS como el factor de cresta. Con peso, si bien aumenta ligeramente la RMS, la disminución en el factor de cresta compensa este aumento. Esto quiere decir que existen menos picos

W-LT-B-SP	
RMS	1,081
FC	2,593
W-LT-B-P	
RMS	1,902
FC	2,735
W-LT-SB-SP	
RMS	0,161
FC	2,446
W-LT-SB-P	
RMS	0,415
FC	3,002

Tabla 52. W-LT frecuencia de resonancia.

Mejora TMD(%)	SP	P
RMS	85,09	78,20
FC	5,66	-9,77

Tabla 53. W-LT mejora TMD frecuencia de resonancia.

La mejora se incrementa cuando se habla de la frecuencia intermedia, cuando se produce resonancia. Como se observa en la tabla 53 en ambos casos se reduce la RMS. Y si bien cuando se coloca el peso, el factor de cresta se ve elevado con el desbloqueo del TMD, la disminución del valor eficaz es tan grande que compensa este hecho.

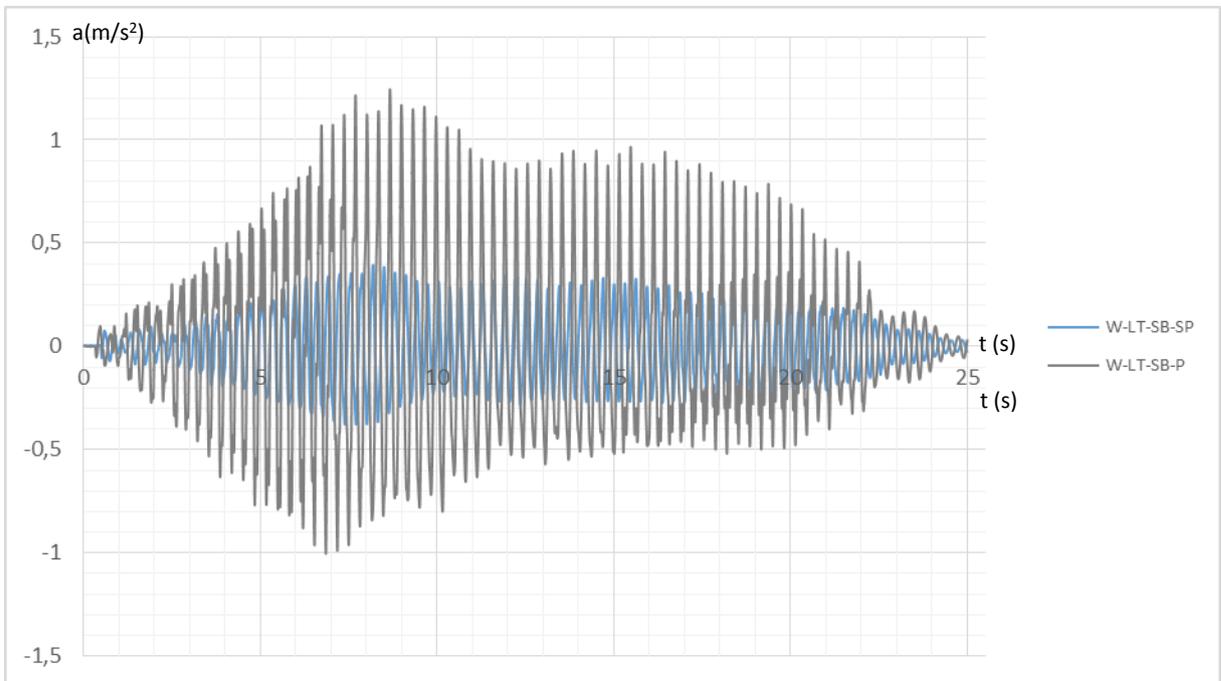


Ilustración 91. W-LT-SB comparación P-SP.

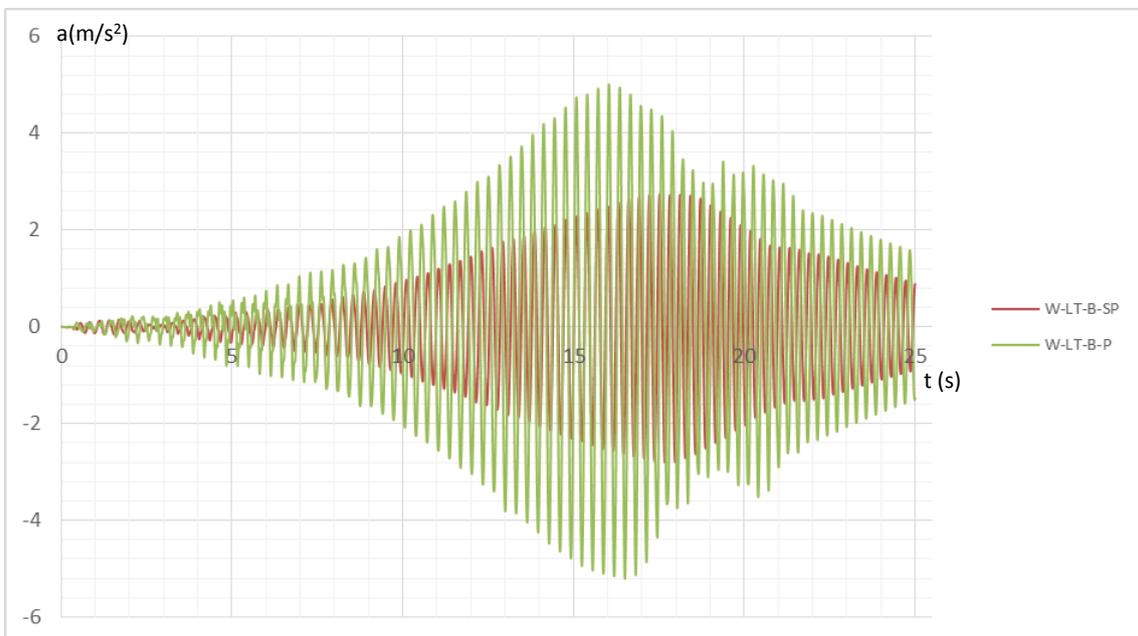


Ilustración 92. W-LT-B comparación P-SP.

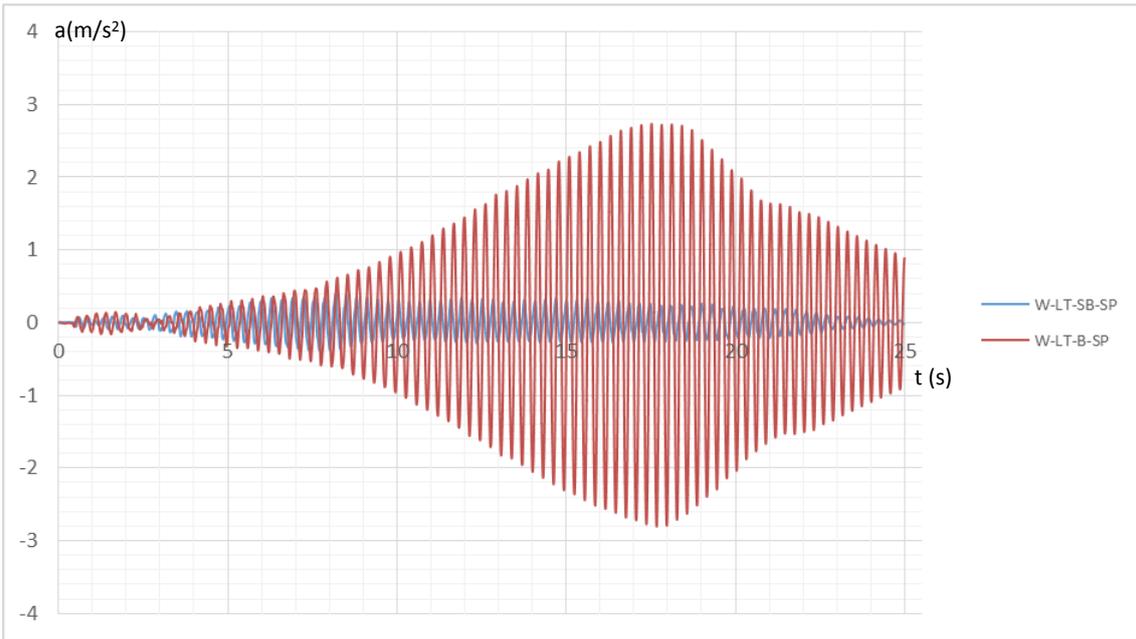


Ilustración 93. W-LT-SP comparación B-SB.

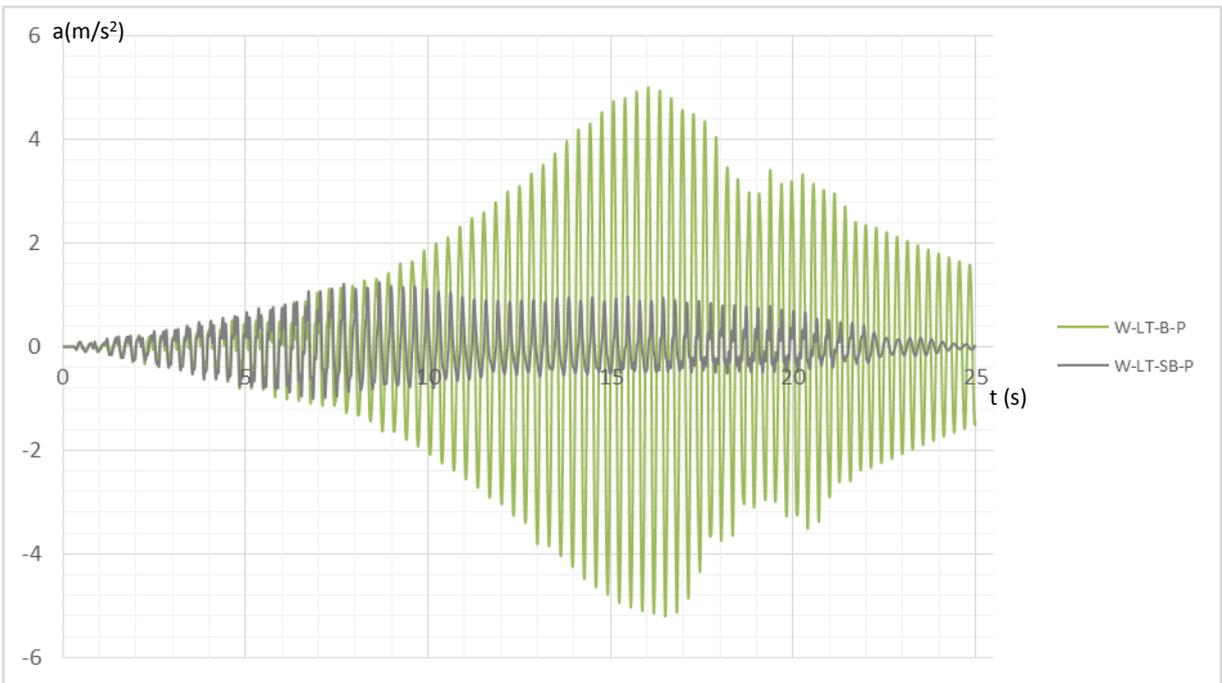


Ilustración 94. W-LT-P comparación B-SB.

Las gráficas comparativas no dejan lugar a duda; el TMD es efectivo reduciendo las oscilaciones del sistema.

W-LT-B-SP	
RMS	0,145
FC	2,137
W-LT-B-P	
RMS	0,410
FC	2,343
W-LT-SB-SP	
RMS	0,173
FC	1,990
W-LT-SB-P	
RMS	0,492
FC	2,115

Tabla 54. W-LT frecuencia mayor.

Mejora TMD(%)	SP	P
RMS	-19,70	-20,25
FC	6,85	9,73

Tabla 55. W-LT mejora TMD frecuencia mayor.

Cuando se habla de la frecuencia mayor de todas, el efecto del TMD no es tan positivo. El valor eficaz de la aceleración se aumenta en torno a un 20% en ambos casos, aunque el factor de cresta si se ve reducido. Sin embargo, el comportamiento del TMD mejora tanto los casos más conflictivos (los de resonancia) que se puede aceptar el empeoramiento que se produce para estos casos.

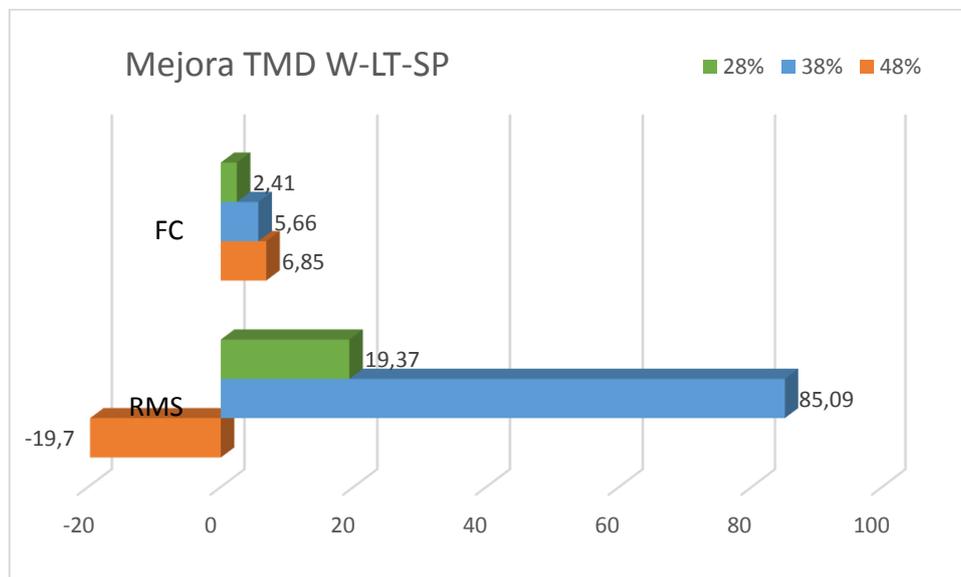


Ilustración 95. Mejora TMD W-LT-SP.

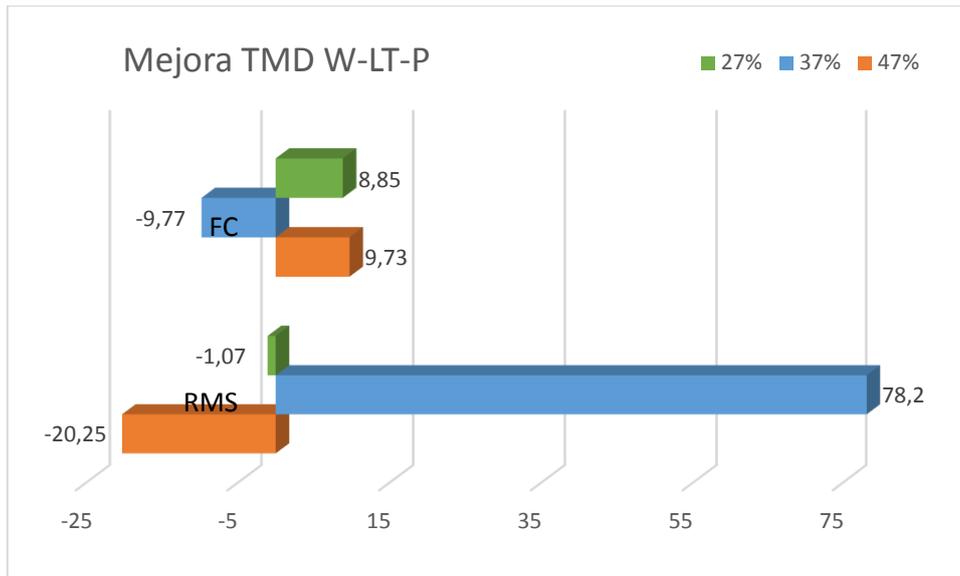


Ilustración 96. Mejora TMD W-LT-P.

La mejora que produce el TMD se hace evidente en las ilustraciones 95 y 96. De nuevo, el TMD empeora un poco los resultados para los casos fuera de resonancia, pero queda compensado por la reducción de la RMS en el caso de resonancia.

## 5. Conclusiones y líneas de futuro

Una vez revisado el total de los casos (48 ensayos) se dispone de una gran cantidad de datos con los que dar un sentido global al trabajo y sacar conclusiones de éste.

La monitorización de una estructura mediante distintos sensores proporciona

Se ha visto que la incorporación de un dispositivo TMD sintonizado para la frecuencia de resonancia disminuye la amplitud de aceleraciones, desplazamientos y reacciones en apoyos cuando la fuerza externa induce resonancia en la viga. Se puede verificar por ello el buen funcionamiento del dispositivo TMD en la frecuencia que está sintonizado. Sin embargo, fuera de esa frecuencia hay ocasiones en que la actuación del TMD liberado provoca que los indicadores estudiados aumenten. Es decir, la pasarela se comporta mejor cuando el TMD está bloqueado que cuando éste se libera. La mejora que provoca en los casos que se produce resonancia, que son los más peligrosos y pueden violar la normativa más fácilmente, justifica el uso de este dispositivo. Aunque se vea que empeora ciertos valores, estos jamás llegan a ser tan elevados como en los casos en que se produce resonancia y el TMD no actúa. Una posible mejora para futuros proyectos sería el diseño de un TMD que se liberase solamente cuando su actuación mejora el comportamiento de la viga, estando bloqueado cuando su funcionamiento no es necesario.



## 6. Referencias

### 6.1. Bibliografía

- Tipler, P. Mosca, G. «Física para ciencia y tecnología vol.1: mecánica, oscilaciones y ondas, termodinámica». Reverte 6ª Edición.
- D. Dimarogonas, Andrew. «Vibration for Engineers», 1992. Washington: Pertice Hall international editions.
- Penzien, Joseph. W.Clough, Ray. «Dynamics of structures», 1975. Berkeley: McGraw-Hill Book Company. «»
- L. Bañón Vázquez: «Acciones», 2011. Universidad de Alicante.
- Ministerio de Fomento, Gobierno de España: «EAE Instrucción de Acero Estructural», 2011.
- Ministerio de Fomento, Gobierno de España: «IAP-11 Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera», 2012.
- L. Bañón: «Prontuario básico de estructuras simples», 2009. Universidad de Alicante.
- S. Živanović, A. Pavic, P. Reynolds: «Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation», 2004. Universidad de Sheffield.
- L. Moyá Guindo: «Comportamiento dinámico de pasarelas peatonales», 2015. Universidad Politécnica de Madrid.

### 6.2. Trabajos Fin de Grado

- Muñoz Alonso, Diego. «Diseño y caracterización de un móvil robótico multiconfigurable para simular las cargas verticales sobre una maqueta de pasarela peatonal», 2017. Universidad de Valladolid.
- Rodríguez Celador, Jesús. «Incorporación de dispositivos TMD en una maqueta de edificio de 2 plantas. Diseño, construcción y sintonizado», 2016. Universidad de Valladolid.
- Guerra Pajares, Víctor. «Diseño de un sistema móvil a escala para simular las acciones verticales de los peatones sobre las estructuras», 2016. Universidad de Valladolid.
- López-Peteiro Tuñón, Javier Ignacio. «Método de variación de masa para determinar propiedades modales», 2016. Universidad de Valladolid.
- García García, Juan Luis. «Diseño, construcción y caracterización de una maqueta de edificio multiplanta para prácticas de vibraciones», 2016. Universidad de Valladolid.
- Anel Martín, César. «Parametrización de un prototipo de TMD magnético ajustable en frecuencia y amortiguamiento», 2016. Universidad de Valladolid.
- Giganto Castañeda, Raúl. «Prototipado y caracterización de sistemas de excitación controlada para maquetas de estructuras», 2016. Universidad de Valladolid.

Jiménez Muñoz, Alberto. «Simulación dinámica mediante WorkingModel2D del tránsito de ciclistas por estructuras esbeltas», 2014. Universidad de Valladolid.

### 6.3. Ilustraciones y tablas

[1]: [myrobotcenter.a.ssl.fastly.net](http://myrobotcenter.a.ssl.fastly.net)

[2]: [www.lego.com/es-es/mindstorms](http://www.lego.com/es-es/mindstorms)

[3]: Muñoz Alonso, Diego. «Diseño y caracterización de un móvil robótico multiconfigurable para simular las cargas verticales sobre una maqueta de pasarela peatonal», 2017. Universidad de Valladolid.

[4]: Rodríguez Celador, Jesús. «Incorporación de dispositivos TMD en una maqueta de edificio de 2 plantas. Diseño, construcción y sintonizado», 2016. Universidad de Valladolid.

[5] : [deicon.com](http://deicon.com)

[6]: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/25612/1/Estructuras%20Met%C3%A1licas%20-%20Material%20apoyo.pdf>

[7]: [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/vibracion\\_barra/vibracion\\_barra.htm](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/vibracion_barra/vibracion_barra.htm)

[8]: <http://www.mecapedia.uji.es/images/resonancia.2.gif>

[9]: L. Bañón Vázquez: «Acciones», 2011. Universidad de Alicante.

[10]: S. Živanović, A. Pavic, P. Reynolds: «Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation», 2004. Universidad de Sheffield.

[11]: «EAE: Instrucción de Acero Estructural», 2011. Ministerio de Fomento.

## 7. Anexos

### Anexo A: Célula de Carga

Data Sheet: TCA.315.R4 Cella di carico  
**www.aep.it** **TCA** Load cell



Linearità - Isteresi  
 $\leq \pm 0.03\%$   
 Linearity - Hysteresis



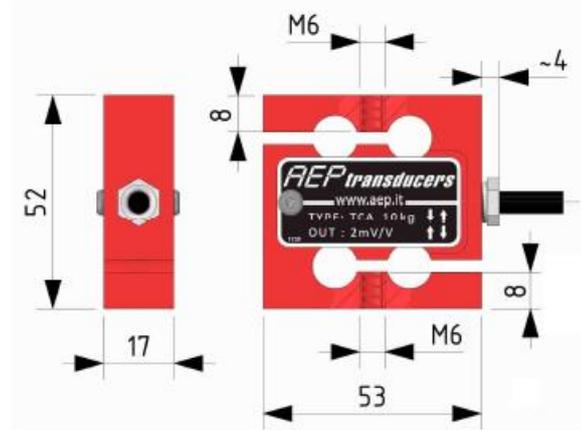
FACILE APPLICAZIONE  
 EASY APPLICATION



Cella di carico estensimetrica in ALLUMINIO per la misura di carichi statici e dinamici in **COMPRESSIONE** e **TRAZIONE**  
 ALUMINIUM strain gages Load cell for the measurement of static and dynamic loads in **COMPRESSION** and **TENSION**

**Dimensioni** *Dimensions*

[mm]



CODICE CODE	Carico nominale Nominal load	Frequenza naturale Natural frequency
CTCA1K5	1 kg	~ 0.22 kHz
CTCA2K5	2 kg	~ 0.50 kHz
CTCA5K5	5 kg	~ 0.75 kHz
CTCA10K5	10 kg	~ 1.00 kHz
CTCA25K5	25 kg	~ 1.50 kHz
CTCA50K5	50 kg	~ 2.00 kHz

**Dati Tecnici**
**Technical Data**


CARICO NOMINALE	NOMINAL LOAD	1 <sup>(1)</sup> - 2 <sup>(1)</sup> - 5 <sup>(1)</sup> kg <sup>(2)</sup> 10 - 25 - 50 kg <sup>(2)</sup>
SENSIBILITA' NOMINALE	NOMINAL SENSITIVITY	2 mV/V
TOLLERANZA DI CALIBRAZIONE	SENSITIVITY TOLERANCE	≤ ± 0.1%
EFFETTO TEMPERATURA (10 °C)	TEMPERATURE EFFECT (10 °C)	
a) sullo zero	a) on zero	≤ ± 0.025 %
b) sulla sensibilità	b) on sensitivity	≤ ± 0.021 %
LINEARITA'	LINEARITY	≤ ± 0.03 %
ISTERESI	HYSTERESIS	≤ ± 0.03 %
RIPETIBILITA'	REPEATABILITY	≤ ± 0.01 %
RESISTENZA DI INGRESSO	INPUT RESISTANCE	440 ± 20 Ω
RESISTENZA DI USCITA	OUTPUT RESISTANCE	350 ± 2 Ω
RESISTENZA DI ISOLAMENTO	INSULATION RESISTANCE	>5 GΩ
BILANCIAMENTO DI ZERO	ZERO BALANCE	≤ ± 1 %
ALIMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	RECOMMENDED SUPPLY VOLTAGE	10 V
ALIMENTAZIONE NOMINALE	NOMINAL SUPPLY VOLTAGE	1-15 V
ALIMENTAZIONE MAX.	MAXIMUM SUPPLY VOLTAGE	18 V
VALORI MECCANICI LIMITE RIFERITI AL CARICO NOMINALE:	MECHANICAL LIMIT VALUES REFERRED TO NOMINAL LOAD:	
a) carico di servizio	a) service load	120 %
b) carico limite	b) max permissible load	150 %
c) carico di rottura	c) breaking load	>300 %
d) massimo carico trasversale	d) max transverse load	50 %
e) carico dinamico limite	e) max permissible dynamic load	50 %
FRECCIA MAX. AL CARICO NOMINALE	DISPLACEMENT AT NOMINAL LOAD	~ 0.3 mm
TEMPERATURA DI RIFERIMENTO	REFERENCE TEMPERATURE	+23 °C
CAMPO NOMINALE DI TEMPERATURA	TEMPERATURE NOMINAL RANGE	-10 / +40 °C
TEMPERATURA DI ESERCIZIO	SERVICE TEMPERATURE	-20 / +70 °C
TEMPERATURA DI STOCCAGGIO	STORAGE TEMPERATURE	-20 / +80 °C
PESO	WEIGHT	~ 0.3 kg
CLASSE DI PROTEZIONE (EN 60529)	PROTECTION CLASS (EN 60529)	IP20
MATERIALE DELLA CELLA	EXECUTION MATERIAL	Alluminio / Aluminium
LUNGHEZZA CAVO	CABLE LENGTH	3 m
TESTE A SNODO SFERICO CONSIGLIATE	RECOMMENDED KNUCKLE JOINTS	DURBAL EM6

<sup>(1)</sup> Complete di protezione contro i sovraccarichi in TRAZIONE e COMPRESSIONE (Max. 500% F.S.).  
Supplied with overload protection TENSION and COMPRESSION (Max. 500% F.S.).

<sup>(2)</sup> A richiesta calibrazioni in N.  
N calibrations on request

**Collegamenti Elettrici Electrical Connections**


Load Cell	OUTPUT	CABLE	CAVO
	EXCITATION+ EXCITATION - OUTPUT+ OUTPUT-	Red Black White Yellow Shield <sup>(3)</sup>	Rosso Nero Bianco Giallo Schermo <sup>(3)</sup>

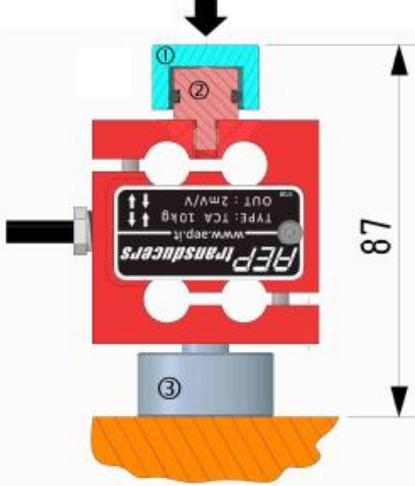
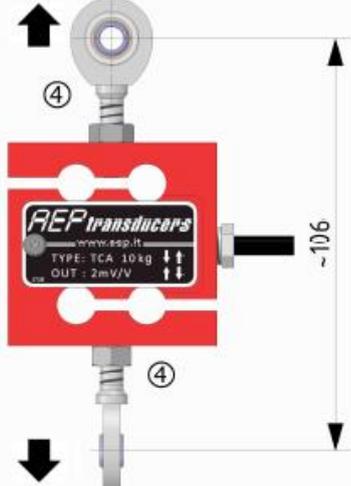
<sup>(3)</sup> Collegato al corpo della cella di carico  
Connected to the body of the load cell.

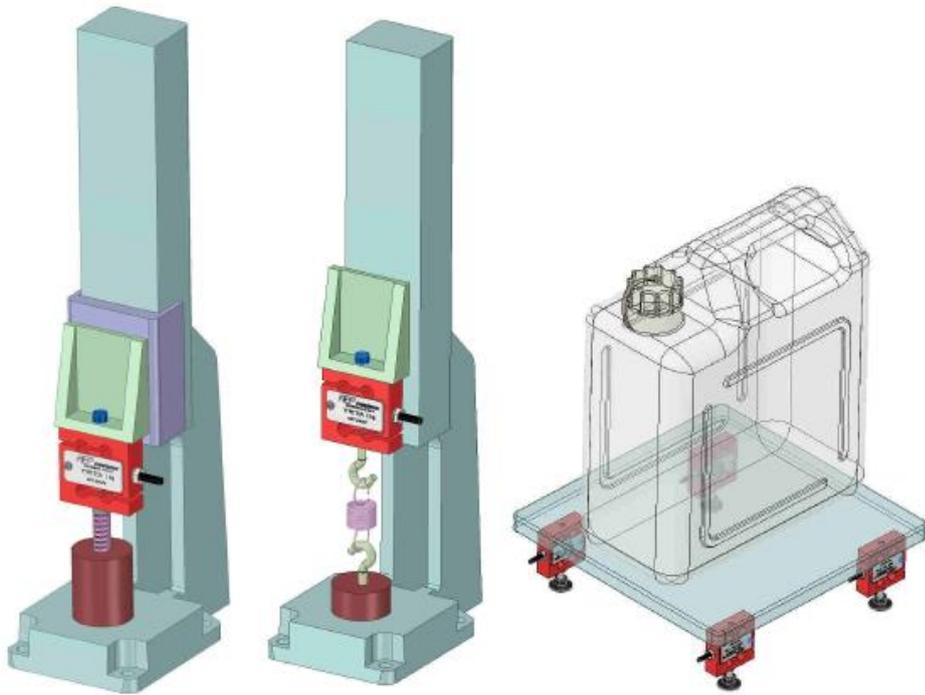
Cavo schermato PVC 70°C, Ø 4.2mm a 4 conduttori stagnati

PVC 70°C shielded cable, Ø 4.2mm with 4 tinned conductors.

**Applicazioni**

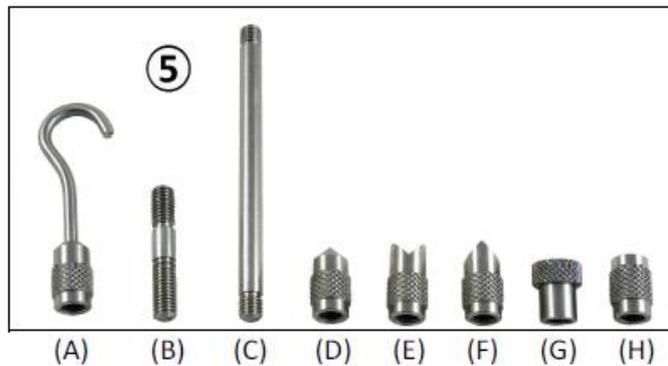
**Applications**

COMPRESSIONE <i>COMPRESSION</i>	TRAZIONE <i>TENSION</i>
 <p style="text-align: center;"><b>⚠ ATTENZIONE ⚠</b></p> <p>Verificare che la forza generata durante il montaggio degli accessori non superi il carico nominale.</p> <p>Il peso del cavo può influire sulla misura, è pertanto consigliabile posizionarlo nella zona fissa, dalla parte opposta al carico.</p>	 <p style="text-align: center;"><b>⚠ WARNING ⚠</b></p> <p>Be sure that the force exerted when assembling accessories does not exceed nominal load.</p> <p>Cable weight can influence measurement, it is therefore recommended to place it at the opposite site of the load.</p>





CODE:		ACCESSORI (opzionali)	ACCESSORIES (optional)
CTIC13	①	Testa di carico.	Loading head.
CTS18M6	②	Testa di carico sferica.	Spherical loading head.
CBC32M6	③	Base di carico.	Mounting plate.
CACCEM6	④	Teste a snodo sferico.	Knuckle joints.
KITCT	⑤	<b>KIT di accessori per eseguire prove in COMPRESIONE e TRAZIONE sui materiali.</b> (A) Gancio per prove a trazione. (B) Prolunga filettata corta. (C) Prolunga filettata lunga. (D) Punta conica per prove a compressione. (E) Punta dentata per prove a compressione. (F) Punta a scalpello per prove a compressione. (G) Punta piana per prove a compressione. (H) Bussola filettata.	<b>Accessory KIT for TENSION and COMPRESSION test of materials.</b> (A) Hook for tension test. (B) Short extension threaded. (C) Long extension threaded. (D) Conical tip for compression test. (E) Notched tip for compression test. (F) Chisel tip for compression test. (G) Flat Tip for compression test. (H) threaded sleeve.



**AEP** transducers



DIN R-Register  
EN ISO 9001:2008  
IQ-1100-01



LAT N° 093  
Calibration Centre  
The products are NOT covered by accreditation



Production Quality Assurance Certified n°  
TÜV 06 ATEX 553793 Q

41126 Cognento (MODENA) Italy Via Bottego 33/A Tel: +39-(0)59-346441 Fax: +39-(0)59-346437 E-mail: aep@aep.it

Al fine di migliorare le prestazioni tecniche del prodotto, la società si riserva di apportare variazioni senza preavviso.  
In order to improve the technical performances of the product, the company reserves the right to make any change without notice.

**Reflex Sensor  
for Measuring Tasks**



**CP08MHT80 LASER**

Part Number



- High resolution 8  $\mu\text{m}$  (Resolution-Mode)
- Linearity 0,1 % (Resolution-Mode)
- Measured value independent of material, color and brightness
- Response Time < 660  $\mu\text{s}$  (Speed-Mode)
- Zoom function

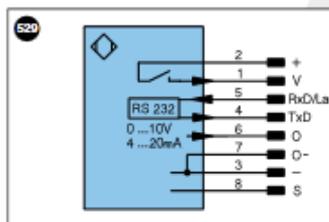
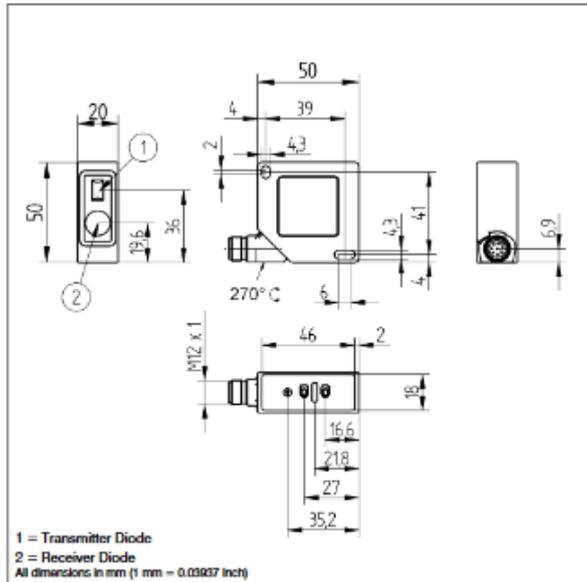
The sensor uses a high-resolution CMOS line array and DSP technology, virtually eliminating material, color and brightness related measurement value differences. Integrated analogue output can be configured for voltage 0...10 V (10...0 V) or current 4...20 mA (20...4 mA).



**Technical Data**

<b>Optical Data</b>	
Working Range	30...80 mm
Measuring Range	50 mm
Resolution	< 8 $\mu\text{m}$
Resolution (Speed-Mode)	< 12 $\mu\text{m}$
Linearity	0,1 %
Linearity (Speed-Mode)	0,2 %
Light Source	Laser (red)
Wave Length	660 nm
Service Life (T = +25 °C)	100000 h
Laser Class (EN 60825-1)	2
max. Ambient Light	10000 Lux
Light Spot Diameter	see Table 1
<b>Electrical Data</b>	
Supply Voltage	18...30 V DC
Current Consumption (U <sub>b</sub> = 24 V)	< 80 mA
Measurement Rate	1500 /s
Measurement Rate (Resolution-Mode)	600 /s
Response Time	< 660 $\mu\text{s}$
Response Time (Resolution Mode)	< 1660 $\mu\text{s}$
Temperature Drift	< 5 $\mu\text{m/K}$
Temperature Range	-25...50 °C
Analog Output	0...10 V
Current Load Voltage Output	< 1 mA
Analog Output	4...20 mA
Current Output Load Resistance	< 500 Ohm
Interface	RS-232
Baud Rate	38400 Bd
Protection Class	III
<b>Mechanical Data</b>	
Adjustment	Teach-In
Housing	Plastic
Degree of Protection	IP67
Connection	M12 × 1; 8-pin
Error Output	●
Analog Output	●
RS-232 Interface	●
Connection Diagram No.	520
Control Panel No.	P7
Suiting Connection Technology No.	10
Suiting Mounting Technology No.	100



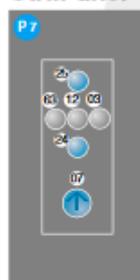


Legend					
+	Supply Voltage +	U	Test Input	PE	Power over Ethernet
-	Supply Voltage 0 V	O	Test Input inverted		
-	Supply Voltage (AC Voltage)	W	Trigger Input		
A	Switching Output (NO)	O	Analog Output		
A	Switching Output (NC)	O-	Ground for the Analog Output		Wire Colors according to DIN IEC 757
V	Contamination/Error Output (NO)	BZ	Block Discharge		
V	Contamination/Error Output (NC)	Aw	Valve Output		
E	Input (analog or digital)	a	Valve Control Output +		
T	Teach Input	b	Valve Control Output 0 V		
Z	Time Delay (activation)	SY	Synchronization		
S	Shielding	E+	Receiver-Line		
RxD	Interface Receive Path	S+	Emitter-Line		
TxD	Interface Send Path	+	Grounding		
RDY	Ready	SyR	Switching Distance Reduction		
GND	Ground	Rx+/-	Ethernet Receive Path		
CL	Clock	Tx+/-	Ethernet Send Path		
E/A	Output/Input programmable	Rx	Interfaces-Bus A(+)/B(-)		
	IO-Link	La	Emitted Light disengageable		
				BK	Black
				BN	Brown
				RD	Red
				OG	Orange
				YE	Yellow
				GN	Green
				BU	Blue
				VT	Violet
				GY	Grey
				WH	White
				PK	Pink
				GNYE	Green Yellow

### Complementary Products

Analog Evaluation Unit AW02
Interface Cable S232W3
Protection Housing Set ZSP-NN-02
Protection Housing ZSV-0x-01

### Ctrl. Panel

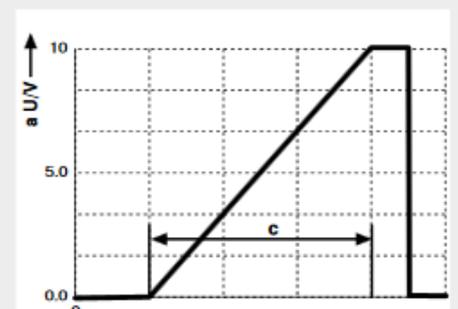


- 03 = Error Indicator
- 07 = Selector Switch
- 12 = Analog Output Indicator
- 24 = Plus Button
- 25 = Minus Button
- 63 = Analog Output Current Indicator

Table 1

Working Distance	30 mm	80 mm
Light Spot Size	0,5 x 1 mm	1 x 2 mm

### Output Graph



c = Measuring Range  
a = Analog Voltage Output

Specifications are subject to change without notice

## Anexo C: Sirius HD-STG



ADC type	24 bit sigma delta dual core with anti-aliasing filter
Data rate	Simultaneous 200kS/s
Isolation voltage [V]	1000 V (non-isolated version available)
Power consumption	max 4 W
Connectors	DB9
Direct inputs	Voltage, full/half/quarter bridge strain, potentiometer, RTD, resistance, IEPE (with MSI), thermocouple (with MSI), charge (with MSI)
Dual core ranges	+/-50 V, +/-10 V, +/-1 V, +/- 100 mV
Bridge ranges	+/-500 mV/V, +/-200 mV/V, +/- 20 mV/V, +/-2 mV/V
Dynamic range @ 10 kS	152dB (dual core)
Input coupling	DC
Excitation voltage	SW programmable 0 to 20V (100mW)
Excitation current	SW programmable 0 to 45mA (100mW)
Bridge connection type	3,4,5,6 wire connection
Internal bridge completion	half bridge 1kOhm, quarter bridge 120 and 350 Ohm, SW selectable
Short	SW selectable
Shunt	SW selectable (59.88kOhm, 175kOhm)
TEDS support	yes
TEDS chip	DS2406, DS2430A, DS2432, DS2433
Overvoltage protection	In+ to In-: 50 V continuous, 200 V peak (10 msec)
Input impedance	10 MOhm for 50 V range, all other ranges 1 GOhm

# Universal-Beschleunigungsaufnehmer General Purpose Accelerometers

## 1.1 Sensoren Sensors

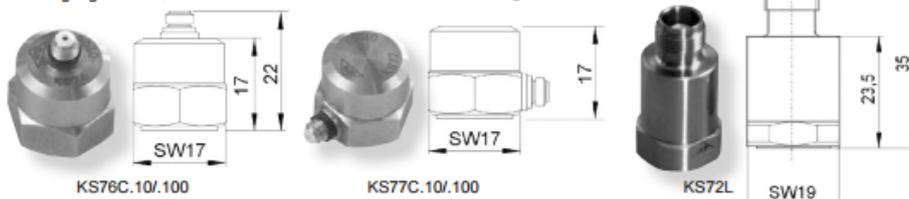
**KS76C10**  
**KS76C100**  
**KS77C10**  
**KS77C100**  
**KS72L**

### Eigenschaften

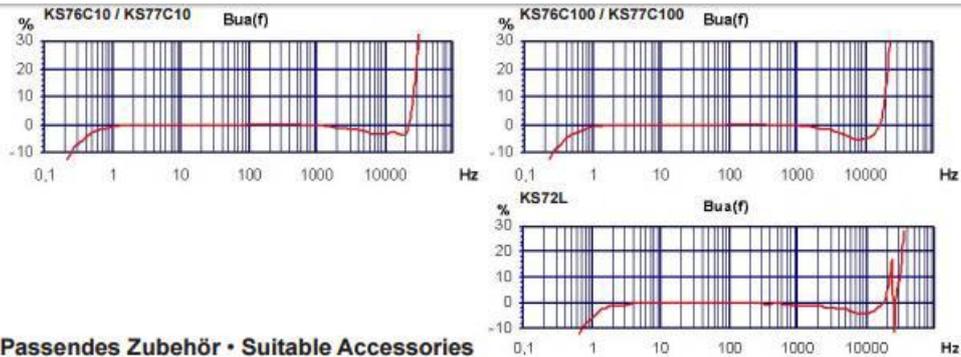
- Universalaufnehmer mit Scherkeramik
- Zwei Empfindlichkeitsvarianten
- Unempfindlich gegen Temperaturänderung
- Unempfindlich gegen Messobjektdehnung
- IEPE-Spannungsausgang erlaubt große Kabellängen
- KS72L mit Low-Power-IEPE-Ausgang
- Hohe lineare Bandbreite bis 37kHz
- Rauscharm, hohe Auflösung
- Robustes Edelstahlgehäuse
- Befestigung mit M5-Gewinde im Boden

### Properties

- General purpose shear-type accelerometer
- Two sensitivity versions
- Low sensitivity to temperature transients
- Low influence of base bending effects
- IEPE compatible output allows long cables
- KS72L with low-power IEPE output
- High linear band width up to 37 kHz
- Low noise, high resolution
- Sturdy stainless steel housing
- M5 mounting thread in base



		KS76C10	KS76C100	KS77C10	KS77C100	KS72L		
Ausgang • Output		IEPE	IEPE	IEPE	IEPE	LP-IEPE		
Piezsystem • Piezo design		Schersprinzip • Shear design						
Spannungsübertragungsfaktor • Voltage sensitivity	$B_{\text{out}}$	10 ± 5 %	100 ± 5 %	10 ± 5 %	100 ± 5 %	20 ± 10 %	mV/g	
Messbereich • Range	$a_x / a_y$	± 600	± 60	± 600	± 60	± 90	g	
Bruchbeschleunigung • Destruction limit	$a_{\text{max}}$	6000	6000	6000	6000	5000	g	
Linearer Frequenzbereich • Linear frequency range	$f_{-3\text{dB}}$ $f_{-10\text{dB}}$ $f_{-5\text{dB}}$	0,12-33k 0,25-26k 0,35-24k	0,13-24k 0,3-19k 0,4-18k	0,12-33k 0,25-26k 0,35-24k	0,13-24k 0,3-19k 0,4-18k	0,3-37k 0,7-20k 1,0-17k	Hz Hz Hz	
Resonanzfrequenz • Resonant frequency	$f_r$	>50 (+25dB)	>32 (+25dB)	>50 (+25dB)	>32 (+25dB)	>50 (+25dB)	kHz	
Querrichtungsfaktor • Transverse sensitivity	$\Gamma_{\text{90MAX}}$	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	%	
Eigenrauschen (Effektivwert; 0,5 Hz - 20 kHz) • Residual noise (RMS; 0,5 Hz - 20 kHz)	$a_n$ wide band	< 2000	< 300	< 2000	< 300	< 2000	µg	
Rauschdichten • Noise densities	0,1 Hz $a_{n,1}$ 1 Hz $a_{n,2}$ 10 Hz $a_{n,3}$ 100 Hz $a_{n,4}$	100 60 20 2	30 10 3 1	100 60 20 2	30 10 3 1	60 20 5 2	µg/√Hz µg/√Hz µg/√Hz µg/√Hz	
Konstantstromversorgung • Constant current supply	$I_{\text{CONST}}$	2 .. 20	2 .. 20	2 .. 20	2 .. 20	0,5 .. 6	mA	
Arbeitspunktspannung • Output bias voltage	$U_{\text{BIAS}}$	12 .. 14	12 .. 14	12 .. 14	12 .. 14	5,8 .. 6,8	V	
Ausgangsimpedanz • Output impedance	$r_{\text{OUT}}$	< 130	< 130	< 130	< 130	< 200	Ω	
<b>Verhalten gegenüber Umgebungseinflüssen • Environmental characteristics</b>								
Arbeitstemperaturbereich • Operating temperature range	$T_{\text{min}}/T_{\text{max}}$	-20 / 120	-20 / 120	-20 / 120	-20 / 120	-30 / 120	°C	
Temperaturkoeffizient • Temperature coefficient	$TK(B_{\text{out}})$	-20 .. 0 °C; KS72L: -20 .. 10 °C 0 .. 30 °C; KS72L: 10 .. 40 °C 30 .. 120 °C; KS72L: 40 .. 120 °C	0,06 ±0,02 -0,06	0,05 ±0,02 -0,07	0,06 ±0,02 -0,06	0,05 ±0,02 -0,07	0,05 ±0,02 -0,1	%/K
Temperatursprungempfindlichkeit • Temperature transient sensitivity	$b_{\text{ST}}$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,01	ms <sup>2</sup> /K	
<b>Mechanische Daten • Mechanical data</b>								
Masse ohne Kabel • Weight without cable	m	20 / 0,7	23 / 0,8	20 / 0,7	23 / 0,8	35 / 1,23	g / oz	
Gehäusematerial • Case material		Edelstahl • Stainless steel						
Kabelanschluss • Cable connection		axial	axial	radial	radial	axial		
Buchse • Socket		UNF 10-32				TNC		
Befestigung • Mounting		M5-Bodengewinde • M5 thread in base						



### Passendes Zubehör • Suitable Accessories

	KS76C10/100; KS77C10/100	KS72L
Anschluss-zubehör	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 009-UNF-UNF-1,5: Kabel 2 x UNF 10-32; 1,5 m lang</li> <li>• 009-UNF-BNC-1,5: Kabel UNF 10-32 / BNC; 1,5 m lang</li> <li>• 010-UNF-BNC-5/10: Kabel UNF 10-32 / BNC; 5 / 10 m lang</li> <li>• 016: Kupplung für 2 UNF 10-32-Stecker</li> <li>• 017: Adapter UNF 10-32 / BNC (männlich)</li> <li>• 117: Adapter UNF 10-32 / BNC (weiblich)</li> <li>• 025: Adapter UNF 10-32 / TNC (männlich)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 010-TNC-BNC-1,5: Kabel TNC / BNC; 1,5 m lang</li> <li>• 010-UNF-BNC-5/10: Kabel UNF 10-32 / BNC; 5 / 10 m lang</li> <li>• 025: Adapter UNF 10-32 / TNC (männlich)</li> </ul>
Connection accessories	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 009-UNF-UNF-1,5: cable 2 x UNF 10-32; 1.5 m long</li> <li>• 009-UNF-BNC-1,5: cable UNF 10-32 / BNC; 1.5 m long</li> <li>• 010-UNF-BNC-5/10: cable UNF 10-32 / BNC; 5 / 10 m long</li> <li>• 016: Coupler for 2 UNF 10-32 plugs</li> <li>• 017: Adapter UNF 10-32 / BNC (male)</li> <li>• 117: Adapter UNF 10-32 / BNC (female)</li> <li>• 025: Adapter UNF 10-32 / TNC (male)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 010-TNC-BNC-1,5: cable TNC / BNC; 1.5 m long</li> <li>• 010-UNF-BNC-5/10: cable UNF 10-32 / BNC; 5 / 10 m long</li> <li>• 025: Adapter UNF 10-32 / TNC (male)</li> </ul>
Befestigungs-zubehör	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 001: Tastspitze M5</li> <li>• 003: Gewindestift M5</li> <li>• 006: Isolierflansch M5</li> <li>• 029: Isolierendes Klebepad M5</li> <li>• 045: Gewindeadapter M5 / UNF 10-32</li> <li>• 046: Gewindeadapter M5 / 1/4"-28</li> <li>• 008: Haftmagnet M5</li> <li>• 030: Triaxial-Befestigungswürfel M5</li> <li>• 700: Unterwasser-Druckgehäuse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 001: Tastspitze M5</li> <li>• 003: Gewindestift M5</li> <li>• 006: Isolierflansch M5</li> <li>• 029: Isolierendes Klebepad M5</li> <li>• 045: Gewindeadapter M5 / UNF 10-32</li> <li>• 046: Gewindeadapter M5 / 1/4"-28</li> <li>• 008: Haftmagnet M5</li> <li>• 030: Triaxial-Befestigungswürfel M5</li> <li>• 700: Unterwasser-Druckgehäuse</li> </ul>
Mounting accessories	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 001: Probe M5</li> <li>• 003: Mounting stud M5</li> <li>• 006: Insulating flange M5</li> <li>• 029: Insulating adhesive pad M5</li> <li>• 045: Thread adapter M5 / UNF 10-32</li> <li>• 046: Thread adapter M5 / 1/4"-28</li> <li>• 008: Magnetic base M5</li> <li>• 030: Triaxial mounting cube M5</li> <li>• 700: Underwater pressure hull</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 001: Probe M5</li> <li>• 003: Mounting stud M5</li> <li>• 006: Insulating flange M5</li> <li>• 029: Insulating adhesive pad M5</li> <li>• 045: Thread adapter M5 / UNF 10-32</li> <li>• 046: Thread adapter M5 / 1/4"-28</li> <li>• 008: Magnetic base M5</li> <li>• 030: Triaxial mounting cube M5</li> <li>• 700: Underwater pressure hull</li> </ul>

### Bestellinformation • Ordering Information

KS76C10/01; KS77C10/01: Aufnehmer mit Zubehörtüte; Inhalt: Kabel 009-UNF-UNF-1,5 (KS72L: 010-TNC-BNC-1,5), Adapter 017 (nur KS76/77), Gewindestift 003, Klebwachs  
 KS76C100/01; KS77C100/01; KS72L/01: 002, Isolierflansch 006 mit Schlüssel, Tastspitze 001, Haftmagnet 008, Bedienungsanleitung, Kennblatt  
 Sensor with accessories kit including cable 009-UNF-UNF-1,5 (KS72L: 010-TNC-BNC-1,5), adapter 017 (KS76/77 only), mounting stud 003, adhesive wax 002, insulating flange 006 with wrench, probe 001, magnetic base 008, instruction manual, data sheet

KS76C10; KS77C10: Aufnehmer mit Kennblatt  
 KS76C100; KS77C100; KS72L: Sensor with data sheet

Hinweis: Auf Wunsch liefern wir unsere Aufnehmer mit einem kostengünstigen DKD-Kalibrierzertifikat. Preise auf Anfrage.

Note: Our transducers can be supplied with an attractively priced calibration certificate of DKD. Prices on demand.

Anderungen vorbehalten.

Specifications subject to change without prior notice.

Manfred Weber

**Metra Meß- und Frequenztechnik in Radebeul e.K.**

Meißner Str. 58  
 D-01445 Radebeul  
 Tel. +49-(0)351-836 2191

P.O.Box 01 01 13  
 D-01435 Radebeul  
 Fax: +49-(0)351-836 2940

Ausgabe / Edition: 01/12

Internet: [www.MMF.de](http://www.MMF.de)  
 Email: [Info@MMF.de](mailto:Info@MMF.de)