

**ESTUDIO DE LAS FUERZAS SOPORTADAS POR LOS  
HERMANOS DE CARGA DE UNA COFRADÍA.**

Escuela de Ingenierías Industriales

**GONZÁLEZ PARDO, SAÚL**



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**Estudio de las fuerzas soportadas por los  
Hermanos de Carga de una cofradía.**

**Autor:**

**González Pardo, Saúl**

**Tutores:**

**Lorenzana Ibán, Antolín**

**Magdaleno González, Álvaro**

**Dpto. de Construcciones  
Arquitectónicas, Ingeniería del  
Terreno y Mecánica de los Medios  
Continuos y Teoría de Estructuras.**

**Valladolid, Junio de 2024.**



## **RESUMEN**

Desde el principio, la tradición de cargar andas procesionales ha sido un acto de devoción y sacrificio, marcado por el esfuerzo físico de los hermanos de carga. Sin embargo, el reparto desigual de las cargas ha sido una constante fuente de sufrimiento y desgaste. En la era de la tecnología y el conocimiento, es imperativo que la ingeniería se alinee con estas prácticas ancestrales, buscando soluciones innovadoras. Este estudio propone analizar científicamente el peso y la distribución de las cargas, así como la frecuencia de paso de los portadores, utilizando herramientas modernas, como programas analíticos y sensores.

La meta es establecer un campo de estudio que optimice la distribución de los pesos entre los hermanos de carga, garantizando así una experiencia equitativa y armoniosa. De esta manera, las procesiones de Semana Santa aspirarán no solo a mantener su solemnidad, sino a reflejar un avance hacia el bienestar de sus participantes.

## **PALABRAS CLAVE**

Hermanos de carga, andas procesionales, peso estático, fuerzas de reacción, frecuencia de paso.

## **ABSTRACT**

From the outset, the tradition of carrying processional litters has been an act of devotion and sacrifice, characterized by the physical exertion of the load-bearing brethren. However, the unequal distribution of loads has been a persistent source of suffering and weariness. In this era of technological advancement and burgeoning knowledge, it is imperative that engineering converges with these ancient practices to seek innovative solutions. This study endeavours to scientifically analyse the weight and distribution of loads, as well as the step frequency of the bearers, utilizing modern tools such as analytical software and sensors.

The objective is to establish a scholarly field that optimizes the distribution of weight among the brethren, thereby ensuring an equitable and harmonious experience. In this manner, the Holy Week processions will aspire to not only retain their solemnity but also to exemplify progress towards the well-being of their participants.

## **KEYWORDS**

Load-bearing brethren, processional frames, static weight, reaction forces, step frequency.



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero darle las gracias a Antolín Lorenzana y a Álvaro Magdaleno, por permitirme realizar un proyecto personal y darme la libertad de escoger mi propio camino en su desarrollo. Sin ellos, seguramente este trabajo de fin de grado sería algo muy distinto. Gracias por las horas extra y por venir conmigo a un ensayo de nuestra cofradía o incluso a visitar la nave un día cualquiera a las nueve de la noche. Gracias por escucharme.

Gracias, cómo no a mi tutor en la sombra y amigo, Álvaro Pordomingo, por todo el esfuerzo que has dedicado y la ayuda tan grande que me has prestado. Seguramente sin ti este TFG no habría salido adelante. Gracias por animarme a seguir con la idea y hacer que todo pareciera más fácil.

Gracias, por supuesto, a mi cofradía, la Real y Venerable Cofradía de la Preciosísima Sangre de Nuestro Señor Jesucristo. Gracias a Alfonso y Alberto, los encargados del grupo de andas, y gracias a todos aquellos hermanos de carga que participaron y me apoyaron con este proyecto. Sin vosotros no podría haberlo hecho.

En especial, quiero dedicar mi más sincero agradecimiento a mis amigos cofrades y hermanos, Rodrigo Cabezudo y Jorge Romero, que me ayudaron con la elaboración de este trabajo y han sido mis referentes y apoyo en Valladolid.

A Adriana González, Elena Martínez, Celia Alonso y Claudia Barón, elegí estudiar mecánica porque diseño a vuestro lado fue la mejor experiencia de mi vida.

Gracias a mis amigos de toda la vida, mi “Panda del Moco”: Álvaro Pena y Javier Luna; soy la persona que soy gracias a vosotros. Todavía recuerdo con ganas las épocas de estudio machacando las horas juntos en Ciencias.

Gracias a ese grupo de “Imsero Salvaje”, que surgió cuando más lo necesitaba. Seguramente habría abandonado mecánica si no fuera por nuestras tardes de molonio y cafés nocturnos entre exámenes. También Cristina Francisco tuvo mucho que ver en todo esto. Gracias a mi pareja, que surgió de aquí, y que me dio la caña que necesitaba para superarlo todo.

Gracias también a Paula García, Fernando García y Mario Gómez, yo ya pensaba que no iba a encontrar mi ese otro grupo de amigos en mecánica. Cuarto se hizo más sencillo a vuestro lado.

Gracias a todos aquellos amigos que siempre estuvieron a mi lado y que han estado ahí durante todos mis siete largos años de carrera, y que nunca podré olvidar. Sin ellos no habría llegado tan lejos.

Y, por último, gracias a mis padres, por darme la oportunidad de estudiar lo que quería y permitirme el lujo de haberme pagado dos carreras increíbles. Por todo su apoyo, todo su amor y toda la confianza que siempre han depositado en mí a lo largo de toda mi vida, gracias por estar ahí.

*“Para que se repita lo contrario”.*



## ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación del estudio.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Aproximación Científica. Estado del Arte.....	5
1.3.1. Estudios previos sobre ergonomía en el campo de las estructuras de Semana Santa. ....	5
1.3.2. ¿Cómo se miden fuerzas de reacción estáticas? .....	6
1.3.3. ¿Cómo se miden fuerzas de reacción dinámicas? .....	7
1.4. Contexto. ....	10
1.4.1. La Semana Santa. La Semana Santa de Valladolid.....	10
1.4.2. Historia y evolución de los pasos o andas procesionales.....	12
Capítulo 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
2.1. Sensores Novel GmbH LoadSol.....	17
2.2. Unidades de medida inerciales (IMUs) Movella Xsens DOT.	18
Capítulo 3. DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS.....	23
3.1. Ensayo en viga con tres apoyos. ....	23
3.2. Ensayo sobre unas andas reales.....	27
3.3. Peso Estático.....	30
3.3.1. ¿Cómo pesar una viga esbelta? .....	31
3.3.2. ¿Cómo pesar una estructura de andas reales? .....	36
Capítulo 4. ADQUISICIÓN Y PROCESADO DE DATOS. ....	45
4.1. Peso estático de las estructuras. ....	45
4.1.1. Registro 1. Peso de una viga esbelta (varal).....	45
4.1.2. Registro 2. Peso de una estructura de andas reales.....	46
4.2. Análisis dinámico de los datos registrados.....	46
4.2.1. Registro 1. Viga con tres apoyos. ....	46
4.2.2. Registro 2. Andas reales.....	64
Capítulo 5. RESULTADOS. ....	97

5.1. Conclusiones.....	97
5.2. Líneas Futuras. ....	103
5.3. Consideraciones adicionales.....	104
REFERENCIAS.....	107

## Índice de Figuras.

Figura 1. Báscula para camiones de la empresa Tecbas.....	6
Figura 2. Esquema resumen del principio de funcionamiento. ....	7
Figura 3. Esquema gráfico del funcionamiento. A la derecha el puente de Wheatstone. ....	8
Figura 4. Tipos de transductores de la marca AEP. A la izquierda, transductor de desplazamiento, en el centro transductores de fuerza y a la derecha un transductor de presión. ....	8
Figura 5. Imagen de las plantillas FlexinFit.....	9
Figura 6. Ubicación de los sensores para la prueba estática (izquierda) y para la prueba dinámica (derecha). ....	10
Figura 7. Foto de unas andas tradicionales en La Pedraja de Portillo (Valladolid). ....	13
Figura 8. Fotografía de unas andas tradicionales de Castilla en Medina de Rioseco. ....	14
Figura 9. Modo de carga interior de Sevilla, “a costal”.....	15
Figura 10. Evolución de las andas de la Virgen de las Angustias (Valladolid). De izquierda a derecha, andas primitivas, carroza y andas actuales. ....	16
Figura 11, Imagen de las plantillas Loadsol. ....	18
Figura 12. Esquema del sistema de coordenadas para el acelerómetro triaxial. ....	19
Figura 13. Diagrama de procesamiento interno de los sensores Xsens.....	19
Figura 14. Gráfica comparativa del mismo registro del acelerómetro en el eje Z. Superior lo registrado, inferior restando la aceleración de la gravedad. ....	20
Figura 15. Croquis de la viga del laboratorio, con las medidas de la sección y el largo. ....	24
Figura 16. Viga en alzado mostrando a los sujetos con las medidas de colocación, las plantillas y los acelerómetros. ....	24
Figura 17. Tabla de distribución de alturas medidas hasta el hombro en metros de los tres sujetos. ....	25
Figura 18. Croquis de la almohadilla puesta en el hombro de Álvaro.....	25
Figura 19. Captura de vídeo del registro con la viga del laboratorio.....	26
Figura 20. Foto de la colocación de los IMUs en la viga.....	26
Figura 21. Croquis de las andas que se han utilizado para el registro. ....	27
Figura 22. Estructura de andas en planta con la posición de los cargadores y sus plantillas. ....	28
Figura 23. Tabla de distribución de alturas medidas hasta el hombro en metros de los hermanos de carga.....	29
Figura 24. Portadores traseros a la izquierda y los delanteros a la derecha. ....	29
Figura 25. Plantillas “LoadSol” colocadas. ....	30
Figura 26. Viga biapoyada simulada en SAP2000 con su carga distribuida arriba y su deformada abajo. ....	32
Figura 27. Diagrama cortante de la viga biapoyada con peso propio.....	32
Figura 28. Incorporación de un desplazamiento prescrito de 0,03 m en b. ....	33
Figura 29. Muestra de que la viga con desplazamiento no añade reacción. ....	33

Figura 30. Viga biapoyada con el punto b desplazado una distancia hacia la izquierda.....	34
Figura 31. Resultado de las reacciones con el apoyo b desplazado. ....	34
Figura 32. Viga triapoyada simulada en SAP2000 con su carga distribuida arriba y su deformada abajo. ....	34
Figura 33. Diagrama cortante de la viga triapoyada con peso propio.....	35
Figura 34. Viga triapoyada con desplazamiento prescrito de 0,03 m en c, arriba y diagrama cortante para este caso, abajo.....	35
Figura 35. Viga triapoyada con desplazamiento prescrito de 0,03 m en b, arriba y diagrama cortante para este caso, abajo.....	36
Figura 36. Croquis de la viga biapoyada con las básculas introducidas para realizar el registro de peso. ....	36
Figura 37. Simplificación de las andas a una estructura con cuatro vigas y cuyas esquinas apoyan en uno de los laterales, mientras que en el otro solo apoya la parte central. ....	37
Figura 38. Croquis de la estructura 3d con tres apoyos y un peso distribuido a lo largo de la superficie con un valor de 500 N/m.....	38
Figura 39. Reacciones de la estructura de andas con tres apoyos. ....	39
Figura 40. Reacciones introducidas por el desplazamiento prescrito.....	39
Figura 41. Diagrama cortante de la estructura en 3D con tres apoyos y un desplazamiento prescrito en uno de los apoyos.....	40
Figura 42. Croquis de las andas procesionales con cuatro apoyos fijos y la carga distribuida de 500 N/m.....	41
Figura 43. Esquema que muestra las reacciones en los apoyos cuando no hay desplazamientos prescritos.....	41
Figura 44. Esquema de las andas con el desplazamiento de 3 cm en la pata derecha. ....	42
Figura 45. Reacciones tras poner la báscula en la pata derecha (según la imagen). ....	42
Figura 46. Croquis de la metodología seguida para pesar las andas, a la izquierda el alzado y a la derecha el perfil izquierdo.....	43
Figura 47. Tabla de los pesos recogidos en el laboratorio, junto a la suma total y la media de peso de ambos registros. ....	45
Figura 48. Tabla de los pesos recogidos en la prueba de campo, junto a la suma total y la media de peso de ambos registros. ....	46
Figura 49. Gráfica de la carga soportada por los cargadores a lo largo del tiempo completo del registro realizado. ....	47
Figura 50. Gráfica de la carga soportada por todos los tres sujetos acotada en [80,170]. Se incluye resultante de todas las fuerzas llamada "SUMA".....	48
Figura 51. Gráfica de la evolución de la carga de los tres portadores a lo largo del tiempo del registro, acotado en el intervalo [80, 170]. En rojo, los tres tramos diferenciados. ....	49
Figura 52. Gráfica de la carga media soportada por cada hermano de carga. ....	50

Figura 53. Porcentaje de carga soportado por cada portador en relación a la carga total.....	51
Figura 54. Diagrama de “Cajas y Bigotes” de la distribución de los datos de la viga.....	52
Figura 55. Tabla resumen de los diferentes datos estadísticos obtenidos del diagrama de “Cajas y Bigotes” de la viga.....	52
Figura 56. Gráfica de evolución de las fuerzas de los cargadores con detalles destacados. ....	54
Figura 57. Gráficas de aceleración a lo largo del tiempo del registro del cargador Antolín. De arriba abajo, aceleración en X, en Y y en Z. ....	55
Figura 58. Gráfica de aceleraciones en X de cada uno de los cargadores acotada en [80,170].....	57
Figura 59. Representaciones en dominio del tiempo y frecuencia de (a) Tono puro y (b) Tono complejo (Malcolm & Arenas, 2021) .....	58
Figura 60. Gráfica frecuencial de las cargas de Álvaro, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos. ....	59
Figura 61. Gráfica frecuencial de las cargas de Antolín, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos. ....	60
Figura 62. Gráfica frecuencial de las cargas del Saúl, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos. ....	61
Figura 63. Tabla con la distribución de frecuencias de cada sujeto según las plantillas. ....	61
Figura 64. Gráfica frecuencial de los registros para el IMU en el eje X.....	62
Figura 65. Arriba gráfica frecuencial de Antolín. Abajo la de Saúl. ....	63
Figura 66. Tabla de frecuencias reales y definitivas de los tres cargadores. .	63
Figura 67. Tabla resumen con todos los datos obtenidos del registro 1. ....	64
Figura 68. Gráfica de la carga soportada por los cargadores a lo largo del tiempo completo del registro realizado.....	64
Figura 69. Gráfica de la carga soportada por todos los cargadores (delanteros y traseros), acotada en [8,112]. Se incluye resultante de todas las fuerzas llamada “SUMA”.....	66
Figura 70. Gráfica de la carga soportada por los hermanos de carga de la parte trasera que llevan las plantillas “LX”. Se añade la resultante de las fuerzas que ejercen en la vanguardia de la estructura llamada “Suma L”. ....	67
Figura 71. Gráfica de la carga soportada por los hermanos de carga de la parte delantera que llevan las plantillas “RX”. Se añade la resultante de las fuerzas que ejercen en la vanguardia de la estructura llamada “Suma R”.....	67
Figura 72. Gráfica de la carga soportada por todos los cargadores (delanteros y traseros), acotada en [8,112]. ....	68
Figura 73. Gráfica de la carga media soportada por cada hermano de carga. ....	69
Figura 74. Porcentaje de carga soportado por cada hermano de carga de la parte posterior de la estructura en relación a la carga total trasera.....	70
Figura 75. Porcentaje de carga soportado por cada hermano de carga de la parte anterior de la estructura en relación a la carga total delantera. ....	71

Figura 76. Porcentaje de carga soportado por cada uno de los hermanos de carga que componen la estructura en relación a la carga total.....	71
Figura 77. Croquis con el reparto de cargas en cada varal con el porcentaje de carga sobre el total de cada uno de los hermanos. ....	72
Figura 78. Porcentaje de carga soportado por los hermanos delanteros vs los hermanos traseros. ....	73
Figura 79. Gráfica de la fuerza (N) soportada por Óscar a lo largo del ensayo. ....	74
Figura 80. Gráfica de la fuerza (N) soportada por Damián a lo largo del ensayo. ....	75
Figura 81. Gráfica de la fuerza (N) soportada por Alfonso a lo largo del ensayo. ....	75
Figura 82. Gráfica de la fuerza (N) soportada por Jesús a lo largo del ensayo. ....	75
Figura 83. Gráfica de la fuerza (N) soportada por Saúl a lo largo del ensayo.	76
Figura 84. Gráfica de la fuerza (N) soportada por Pablo a lo largo del ensayo. ....	76
Figura 85. Gráfica de la fuerza (N) soportada por Rodrigo a lo largo del ensayo. ....	77
Figura 86. Gráfica de la fuerza (N) soportada por Carlos a lo largo del ensayo. ....	77
Figura 87. Diagrama de “Cajas y Bigotes” de la distribución de los datos de las andas.....	78
Figura 88. Tabla resumen de los diferentes datos estadísticos obtenidos del diagrama de “Cajas y Bigotes” de las andas.....	78
Figura 89. Indicación de picos de fuerza y otras anomalías registradas en Rodrigo.....	80
Figura 90. Indicación de picos de fuerza y otras anomalías registradas en Carlos.....	80
Figura 91. Indicación de picos de fuerza y otras anomalías registradas en Saúl. ....	81
Figura 92. Comparativa entre las gráficas de Saúl, Rodrigo y Carlos para los tiempos mencionados de 8 segundos a la izquierda y 96 a la derecha.....	82
Figura 93. Indicación de picos de fuerza y otras anomalías registradas en Saúl. ....	82
Figura 94. Comparativa general de todas las gráficas de fuerzas.....	84
Figura 95. Frecuencias de paso obtenidas de cada uno de los hermanos de carga.....	85
Figura 96. Gráfica frecuencial de las cargas de Óscar, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos.....	86
Figura 97. Gráfica frecuencial de las cargas de Damián, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos.....	87
Figura 98. Gráfica frecuencial de las cargas de Alfonso, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos.....	88

<i>Figura 99. Gráfica frecuencial de las cargas de Jesús, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos. ....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 100. Gráfica frecuencial de las cargas de Saúl, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos. ....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 101. Gráfica frecuencial de las cargas de Pablo, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos. ....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 102. Gráfica frecuencial de las cargas de Rodrigo, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 103. Gráfica frecuencial de las cargas de Carlos, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos. ....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 104. Croquis mostrando las frecuencias de cada uno de los portadores en relación con el número de frecuencias predominantes.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 105. Captura de vídeo tomada dl vídeo del registro. ....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 106. Tabla resumen con todos los datos obtenidos del registro 2.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 107. Tabla salarial de ingenieros siderometalúrgicos en Valladolid. ....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 108. Costes del registro de la viga del laboratorio.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 109. Costes del registro del ensayo real con las andas procesionales. ....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 110. Costes de procesado, análisis, realización y redacción. ....</i>	<i>106</i>



## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.

Se pretende resumir a continuación el porqué proponer un estudio tan inusual como el siguiente, los objetivos que se pretenden conseguir y un contexto histórico para comprender de dónde sale el gusto y la necesidad del trabajo propuesto.

### 1.1. Motivación del estudio.

Desde hace ya muchos siglos se vienen cargando tallas y grupos escultóricos para representar la Semana Santa y la Pasión de Cristo, práctica muy extendida a lo largo de España, (país en el que se centra este estudio). A medida que los tiempos avanzan, la historia ha demostrado que se fomenta cada vez más el gusto por lo grande, lo recargado, el hecho de realizar el grupo escultórico y estructural tan espléndido como si el Dios mismo hubiera bajado a la Tierra. Es decir, hay un gusto por lo grandioso, lo que desemboca en realizar carrozas más difíciles de transportar.

Así, la labor de los hermanos de carga (hermanos de las cofradías que se encargan de soportar el peso de los pasos procesionales en el recorrido de la procesión), se hace más ardua y complicada, con lo que comienzan las lesiones y los problemas de motivación, fomentando el desánimo. Problemas que, si no se solucionan, el posible caso en el que en un futuro se perdieran estas tradiciones podría ser más inminente de lo pensado por muchos. De hecho, ya se observa en muchas cofradías la falta de personas para sacar las esculturas a la calle, claro está que también influyen otros aspectos sociales.

Aun así, el gusto de cargar un objeto o algo con valor significativo no sólo se da en la Semana Santa, sino que, por ejemplo, en algunas culturas, en los funerales, se transportan los féretros a hombros para homenajear y despedir de manera solemne al difunto.

Todas estas labores de medidas, realización de andas y puesta en escena, se llevan realizando por artesanos y personas de a pie, por medio de la prueba y el error desde el principio de los tiempos, pero nunca antes se ha planteado el hecho de introducir la ingeniería en un ámbito que podría requerirla. Si bien se emplea la ingeniería en este ámbito por medio de estructuras que se levantan gracias a poleas con trinquetes manuales y gatos hidráulicos para poder sacar los pasos procesionales de los templos, (al permitir la elevación de grupos pesados), entre otras mecanismos y soluciones; nunca se ha planteado desde

el punto de vista del confort de los cargadores que portan estas estructuras. Sin gente, las andas no pueden salir a las calles.

¿Qué es lo que ocurre debajo del paso? ¿Cómo se vive la carga de peso a lo largo de una procesión? ¿Realmente todos los hermanos cargan por igual? ¿Es posible redistribuir mejor los cargadores para homogeneizar las cargas? ¿Todos los hermanos andan a la vez? Todas estas son las preguntas que a menudo nos hacemos algunos de los que formamos parte de este, llamémoslo gremio.

Quién no se ha quejado alguna vez de que carga demasiado, o incluso también de lo contrario, quizá porque, por su altura o inconveniencias del terreno no se llega a las andas; gente que dice que percibe demasiadas inestabilidades o que no son capaces de seguir el ritmo. También, a menudo, la cuadrilla de hermanos que carga en la parte trasera aqueja que los hermanos de delante andan demasiado rápido provocando desequilibrios o percances inesperados. Estos y muchos otros problemas se llevan acuciando durante mucho tiempo y al final, nunca se solventan. La prueba y el error, en estos tiempos modernos ya no sólo puede ser una solución, es necesario implementar métodos más eficientes para buscar posibles soluciones.

Actualmente el proceso se basa en el encargo de una estructura para portar las tallas (estructura en la que se objetivará el estudio), a un ebanista o carpintero que, por experiencia y/o virtud, es capaz de construir unas, tales que cumplen a la perfección su cometido. Saben cómo hacer que la estructura no llegue a su límite y lo diseñan de manera que no llegue a la rotura, pero a menudo se hacen demasiado robustas y se sobredimensionan, al fin y al cabo, no son ingenieros con la capacidad de optimizar por medio de cálculos exactos el peso correcto. A veces incluso los materiales no son los correctos, (aunque también estos vienen impuestos desde la cofradía); adicionando peso innecesario a la estructura.

Después, una vez que la cofradía recibe la estructura (algunas cofradías antiguas tienen sus propias andas desde siglos pasados, las cuales suelen ser más pesadas; pero el proceso en su siglo sería el mismo, ya que es un arte que se va pasando de generación en generación), se comienzan los ensayos, todo tiene que salir correctamente en la procesión. Para ello, antes de comenzar, se mide hasta el hombro a cada uno de los hermanos de carga con los zapatos que sacarán en procesión, para que la altura varíe lo mínimo posible. Y posteriormente se hacen grupos, si hay suficientes personas, en función de las alturas. Vulgarmente se le suele llamar “grupo de altos” y “grupo de bajos”. Y se colocan por orden de altura desde el más bajo detrás del todo, hasta el más alto en la cabeza de la estructura. Pero no siempre es fácil cuadrar las cuadrillas a la perfección, ya que hay alturas diversas y nunca suelen ir escalonadas. Hay personas con alturas similares que cargan una detrás de otra

o quizá los de detrás son muy bajos y los de delante son muy altos y otras combinaciones. Por lo que se colocan debajo del paso de manera perceptiva por el comisario (persona que se encarga de organizar y dirigir el grupo de andas, aunque también a veces se les llama así a los portadores), de manera que se hacen pequeños ensayos de unos minutos para recibir el retorno de los hermanos de carga: si portan mucho peso, si llegan a las andas si se sienten cómodos...

Si se reciben quejas de alguno de los hermanos, se redistribuye, esta vez más a pequeño nivel, cambiando una de las personas y colocándola más hacia el frente o hacia atrás, cambiando de varal, o quizá recibiendo una almohadilla, según el caso, etc. Por lo que el proceso se hace tedioso, abstracto y subjetivo, susceptible de cambios en dicho confort y no siempre todos los hermanos quedan conformes con la decisión, (a veces, aunque se disponga de un estudio de ingeniería tampoco será posible, porque las personas tienen las características que tienen y son limitadas, pero se intentará cuadrar todo a la perfección). Esto fomenta una gran incertidumbre y hace que los hermanos de carga tengan miedo de que las cosas salgan mal, lo provoca un peor rendimiento.

Así, la puesta en escena se vuelve deficiente. Además, a pesar de las medidas, los ensayos y las percepciones positivas, el terreno va cambiando y las fuerzas de cada uno a lo largo de la procesión también, por lo que en la calle no siempre sale como se espera y muchas veces hasta se precisa una redistribución en pleno acto; se pierde el paso y suele ocurrir que la cuadrilla de delante va descoordinada de la de detrás, lo que se refleja en una talla que, como vulgarmente se dice, “culea”.

Por lo que este estudio está básicamente motivado por la falta de ergonomía en el bienestar del cargador, la comodidad con la que se soporta el peso y la dificultad de hacer que todos los hermanos anden al mismo ritmo y carguen lo mismo.

Es fácil comprobar que no es algo que se haya hecho con anterioridad, por lo que también es una motivación importante el hecho de poder empezar un estudio que sienta las bases de estudios más exhaustivos y completos para proporcionar a la comunidad religiosa una cómoda y más segura procesión (dentro de lo posible).

## **1.2. Objetivos.**

Expuesta la problemática, se propone realizar un estudio científico como prueba de concepto para tratar de solventar dichos problemas encontrados e

intentar, en una línea de futuro, redistribuir los hermanos de carga de la manera más óptima posible.

Hay que tener en cuenta que el horizonte del estudio será principalmente el bienestar del cargador debajo de las andas para llegar al objetivo final de que nadie sufra daños lesivos al final de una procesión y que la puesta en escena en la calle sea lo más correcta y cómoda posible. Debido a que es simplemente un análisis que sienta las bases de este horizonte, los objetivos que se proponen son algo más simples y concisos.

Por lo tanto, este trabajo surge en torno a tres objetivos principales:

- (1) Determinar el peso de un varal y una estructura de andas por medio de básculas ordinarias, analizando, además, las reacciones que genera este peso bajo diferentes condiciones de apoyos.
- (2) Realizar una simplificación de una estructura de andas y extrapolarla a una viga, como si se estuviera analizando la mecánica de un único varal. Obteniendo resultados de la marcha de tres cargadores durante un registro que simule unos minutos de una procesión, analizando el reparto de cargas, las vibraciones soportadas y el ritmo de carga.
- (3) Analizar, unas andas al uso, asistiendo a uno de los ensayos de los hermanos de la cofradía para poder analizar el reparto de cargas y el ritmo al que estos se mueven, de manera que permita conocer quiénes son los portadores más solicitados y si su ritmo en relación con este reparto y las características de altura influyen en el proceso de una marcha confortable. Es decir, comprobar si cargan lo mismo y si todos se mueven a la misma frecuencia.

Otros objetivos planteados son los siguientes:

- (4) Comprobar mediante simulación que el peso de las estructuras es correcto y la metodología adecuada.
- (5) Comprobar que las diferentes alturas de los cargadores afectan significativamente al reparto de cargas de la estructura.
- (6) Aplicar los conceptos aprendidos de estructuras a una problemática real en un ámbito en el que no se suele hacer cálculo estructural, a pesar de las grandes estructuras que se fabrican.

- (7) Demostrar que incluso en una tradición tan antigua como es la Semana Santa la ingeniería está presente y puede ir de la mano con la religión para mejorar las condiciones de los hermanos de carga. Es decir, estudiar un tema que nunca se había planteado antes.
- (8) Sentar las bases de una investigación que sirva como aliciente para que algún otro ingeniero interesado en el tema de la Semana Santa y la ingeniería, continúe con el proceso de optimizar la cuadrilla para cargar lo más cómodamente posible. Es decir, entender de manera superficial qué es lo que ocurre debajo de un paso procesional y cómo se sienten los hermanos de carga portándolo.

### **1.3. Aproximación Científica. Estado del Arte.**

#### **1.3.1. Estudios previos sobre ergonomía en el campo de las estructuras de Semana Santa.**

No hay prácticamente nada al respecto, debido a que se trata de un estudio innovador sobre el que no hay muchos estudios. Como se comentó en el apartado de motivación, no es muy usual hacer estudios de ingeniería en temas sobre la religión. Es común el gusto por lo artesano y lo tradicional.

Sin embargo, si hay algún estudio, no obstante, de una Semana Santa de otra provincia en la que el método de carga es por medio de un costal, apoyando la estructura sobre las cervicales de los hermanos portadores (Molina, 1985) [1].

En este estudio se expone un análisis de carácter divulgativo sobre el trabajo físico y anatómico que realiza un costalero, en el que se explican las posturas forzosas que un hermano tiene que adoptar para poder conllevar el peso de la estructura y las implicaciones físicas lesivas que estas pueden producir en el desarrollo de la tarea, explicando exhaustivamente los músculos involucrados en tales posturas. Además de explicar los kilos que soporta a medida que se van produciendo los distintos tipos de movimientos propios de una representación en la calle como es en las hermandades sevillanas.

Se detalla minuciosamente cómo hay que posicionarse para un desarrollo correcto y los puntos clave de carga explicados como puntos críticos de presión en los que hay que presentar especial cuidado para evitar lesiones.

### 1.3.2. ¿Cómo se miden fuerzas de reacción estáticas?

En el mundo de la ingeniería y la construcción, es fundamental comprender y medir tanto las fuerzas dinámicas como las estáticas que actúan sobre las estructuras. Si bien las fuerzas dinámicas se refieren a aquellas que cambian con el tiempo, las fuerzas estáticas son aquellas que permanecen constantes en magnitud y dirección. En el caso de estructuras grandes, como puentes, edificios o maquinaria pesada, medir las fuerzas estáticas es esencial para garantizar su estabilidad y seguridad.

Una de las formas más comunes de medir las fuerzas estáticas en estructuras grandes es mediante el uso de básculas industriales. Estas básculas están diseñadas para soportar grandes pesos y pueden utilizarse para medir la fuerza de compresión o tensión que actúa sobre una estructura determinada. Se basan en células de carga, que utilizan la fuerza de compresión ejercida por el peso del objeto transformándola, con un principio similar al explicado en el apartado siguiente, en un voltaje que devuelve, de manera electrónica el peso exacto de la estructura.

Estos dispositivos se colocan estratégicamente en puntos clave de la estructura y pueden medir con precisión las fuerzas que actúan sobre ellos.

También se pueden encontrar las básculas para camiones típicas que hay en algunas gasolineras o pueblos que cuentan con una plataforma de grandes dimensiones que calculan el peso ejercicio por diferencia de nivel con respecto a su altura de equilibrio, como una balanza, por ejemplo. Otras más complejas, como las de la marca Tecbas, utilizan sensores de carga como los explicados. (Tecbas, s.f.) [2]. Se puede observar la *Figura 1*.

En este caso se han utilizado básculas de pesaje de hogar. Es una de las soluciones innovadoras del trabajo, teniendo en cuenta que no se ha necesitado recurrir a instrumentos complejos para pesar una gran estructura.



*Figura 1. Báscula para camiones de la empresa Tecbas. [2]*

### 1.3.3. ¿Cómo se miden fuerzas de reacción dinámicas?

La medición de las fuerzas de reacción dinámicas es un aspecto crucial en el análisis de sistemas mecánicos y estructuras sometidas a cargas variables, como es el caso de las andas estudiadas en este trabajo. Este proceso involucra la evaluación de las fuerzas generadas en respuesta a movimientos y cargas dinámicas. Así bien, se describirán los principios fundamentales de funcionamiento y algunas herramientas utilizadas para llevar a cabo este tipo de mediciones de manera precisa y efectiva.

Según la definición de la empresa Futek: “un sensor de fuerza es un tipo de transductor, concretamente un transductor de fuerza que convierte una fuerza mecánica de entrada como carga, peso, tensión, compresión o presión en otra variable física, en este caso, en una señal de salida eléctrica que puede medirse, convertirse y estandarizarse. A medida que aumenta la fuerza aplicada al sensor de fuerza, la señal eléctrica cambia proporcionalmente” (Futek SL, s.f.) [3].

Estos sensores se suelen llamar transductores de fuerza de galgas extensiométricos (utilizan unas galgas que perciben las tensiones y los desplazamientos) o transductores piezoeléctricos debido a que estos sensores se basan en el efecto piezoeléctrico, que básicamente consiste en que al aplicar una determinada presión (del griego “piezo”), en un cristal, este transmite un voltaje proporcional a la presión aplicada que un sistema de adquisición recoge por medio de señales eléctricas.

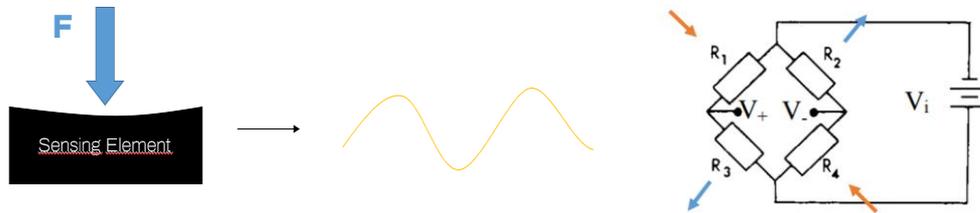
La *Figura 2* es un esquema resumen:



*Figura 2. Esquema resumen del principio de funcionamiento.*

Básicamente recogen una fuerza aplicada que provoca una tensión/compresión en las galgas extensiométricas incorporadas en un puente

de Wheatstone (*Figura 3*), lo que hace que se produzca un desequilibrio de voltajes, después el puente se energiza de manera que compensa ese desequilibrio obteniendo una salida eléctrica proporcional que posteriormente se interpreta.



*Figura 3. Esquema gráfico del funcionamiento. A la derecha el puente de Wheatstone.*

Algunos de los sensores más utilizados en la industria se pueden observar en la *Figura 4* (AEP Transducers, 2021) [4].



*Figura 4. Tipos de transductores de la marca AEP. A la izquierda, transductor de desplazamiento, en el centro transductores de fuerza y a la derecha un transductor de presión. [4]*

No sólo se utilizan transductores de fuerza como los mostrados y no sólo en el ámbito de la ingeniería. En concreto, para realizar este proyecto y medir fuerzas a lo largo del tiempo, se utilizaron unas plantillas empleadas en salud, biomecánica, análisis postural y ortopedia (este tipo de sensores no se exponen aquí porque ya se comentarán con más detenimiento en el apartado 0).

Pero otro ejemplo de este tipo de plantillas son las plantillas “FlexinFit”, de la empresa Ortomecánica (Ortomecánica, 2020) [5]. Son unas plantillas que se venden y se utilizan específicamente para estudios sobre la distribución de las presiones del pie dentro del calzado (*Figura 5*). Se analizan la marcha y/o carrera del sujeto, permiten comprobar si las terapias que se han indicado son las correctas o localizar los puntos de presión para evitar la formación de ampollas, entre otras.

Básicamente la principal diferencia con los sensores “LoadSol”, usados en este trabajo, es que permiten localizar las fuerzas de reacción en los distintos puntos en que se aplica una presión del pie. Los “loadSol” sólo permiten conocer la resultante de la fuerza vertical.



*Figura 5. Imagen de las plantillas FlexinFit. [5]*

En el contexto de las fuerzas de reacción dinámicas, es fundamental considerar las aceleraciones que experimentan los cuerpos en movimiento. Las aceleraciones son el resultado directo de las fuerzas aplicadas, conforme con la segunda ley de Newton, que establece que la fuerza es directamente proporcional a la fuerza e inversamente a la masa. Para medir estas aceleraciones se utilizan dispositivos especializados como acelerómetros, o sensores de medida inercial también llamados IMUs como es el caso de los “XSens” utilizados en este trabajo.

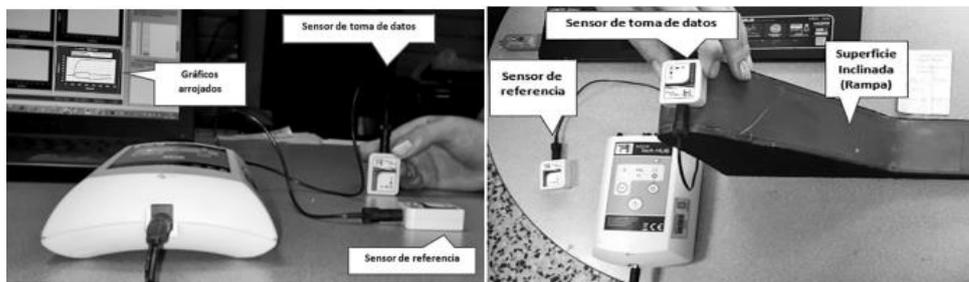
Estos últimos suelen emplearse con mayor frecuencia en el ámbito del estudio del cuerpo humano.

Algún otro ejemplo de este tipo de sensores como los de la *Figura 6*, se utilizan en estudios de otras universidades. Según un artículo de la revista “Ingenio Magno” de la Universidad de Santo Tomás de Colombia (Luengas Contreras,

López Ávila, & Jiménez Espinosa, 2017) [6], los IMUs son: “unidades que poseen acelerómetros, giroscopios y brújulas en su interior que permiten medir y reportar cambios de posición y velocidad asociados con fenómenos de peso experimentados por una masa que se encuentra en el marco de referencia del dispositivo”.

En este artículo relatan una caracterización de este tipo de acelerómetros, en concreto, unos de la empresa Technid SL de manera que luego sirvan para hacer estudios para diversos ámbitos que incluyan movimientos y reacciones del cuerpo humano ante algún estímulo.

En resumen, estos son algunos de los dispositivos más utilizados en el ámbito de estudios dinámicoestáticos.



*Figura 6. Ubicación de los sensores para la prueba estática (izquierda) y para la prueba dinámica (derecha). [6]*

## 1.4. Contexto.

A continuación, se introduce un poco de historia para entender mejor el por qué del estudio y conocer cómo surge todo esto de las procesiones de Semana Santa.

### 1.4.1. La Semana Santa. La Semana Santa de Valladolid.

La Semana Santa es una festividad de la religión cristiana en la que se conmemora la Pasión, Muerte y Resurrección de Jesucristo, que tiene lugar durante la primavera.

Aunque esta fiesta se celebra en todo el mundo cristiano con actos litúrgicos, en ciertos países católicos se acompaña de representaciones y procesiones que se celebran fuera de los templos, como ocurre en España, Italia, Portugal y otros territorios del imperio hispánico como América Latina o Filipinas,

(aunque también podemos encontrarnos procesiones de índole similar en otros países como Alemania o Francia, entre otros).

Desde finales de la Edad Media y en el caso de España, más concretamente, tras las predicaciones del dominico San Vicente Ferrer (1350-1419), comenzó un movimiento espiritual que apostaba por el autocastigo físico siguiendo el modelo de la Pasión de Cristo. Así, tanto hombres como mujeres recorrían las calles de prácticamente todas las localidades de España flagelándose o cargando con cruces. Este es el origen primitivo de lo que conocemos hoy en día como procesiones de Semana Santa.

A raíz de estos movimientos se comenzaron a fundar cofradías o hermandades dedicadas al culto de la Pasión de Cristo y cuyas actividades principales se desarrollaban durante la Semana Santa. Estas cofradías, al igual que otras que celebraban sus fiestas en otros periodos del año, como aquellas dedicadas a Vírgenes o Santos, estaban formadas por un conjunto de fieles que se agrupaban para rezar pero que también conseguían ayudas económicas y sociales por el hecho de pertenecer a dichas agrupaciones, como si de una mutua actual se tratase.

Teniendo en cuenta que la evolución de las cofradías de Semana Santa o como se suelen llamar también, cofradías penitenciales, (ya que los cofrades se redimen por medio de la penitencia), es similar en todo el territorio español; a partir de ahora se tratará la historia de la Semana Santa de Valladolid, lugar en el que se ha desarrollado este trabajo, como ejemplo extrapolable a las demás.

Desde finales del siglo XV y a lo largo del siglo XVI se fundaron en Valladolid cinco cofradías penitenciales (por orden de antigüedad): Santa Vera Cruz, Pasión de Cristo, Nuestra Señora de las Angustias, Virgen de la Piedad y Nuestro Padre Jesús Nazareno. Estas cofradías, como ya se ha comentado anteriormente, se dedicaban principalmente al culto de los Misterios de la Pasión de Cristo, desde la Entrada en Jerusalén hasta el Entierro en el Sepulcro y celebrando procesiones en las que se flagelaban. Además, se dedicaban al cuidado de enfermos a través de hospitales propios y a la ayuda de los más necesitados, siendo entonces, sus bases, la penitencia y la caridad.

Tras la reforma protestante de Martín Lutero (1483-1546), en 1517, se produjo en la Iglesia Católica la Contrarreforma y el Concilio de Trento en 1545. A raíz de ella, entre otras cosas, se potenció el papel de las imágenes religiosas en la fe. Por ello, desde este momento, las cofradías empezaron a realizar imágenes o grupos escultóricos que representaran la Pasión y sacarlas a la calle para instruir a la población, en su mayoría analfabeta, sobre estos pasajes y fomentar la devoción.

Estos primeros pasos eran de pequeño tamaño y se realizaban en materiales ligeros para que se pudieran llevar más fácilmente a hombros. Así lo recoge el portugués Tomé Pinheiro da Veiga en su *Fastiginia* (1605), (Agapito y Revilla, 1925) [7], describiendo las procesiones durante la estancia de la corte en Valladolid como capital de España. De estos, sólo subsiste a día de hoy *La Entrada en Jerusalén* (vulgo “La Borriquilla”) de la cofradía de la Vera Cruz.

Debido a la fragilidad de estos grupos escultóricos, en 1604 la cofradía de la Pasión encargó el primer paso realizado a tamaño natural e íntegramente en madera policromada: *La Elevación de la Cruz*, obra de Francisco del Rincón (1567-1608), conservado actualmente en el Museo Nacional de Escultura (Manuel, 2019) [8]. A raíz de este primer cambio, el resto de cofradías sustituyeron sus antiguos pasos por otros nuevos con estas características realizados por Gregorio Fernández (1576-1636) y sus seguidores. Así comenzó el momento de mayor esplendor de las cofradías de Valladolid, durante el Barroco.

En el siglo XVIII, con la llegada de los Borbones y la Ilustración, las cofradías comienzan a decaer y estos grandes pasos dejan de procesionarse sacándose solamente las imágenes centrales de Cristo. Este proceso se agravará en el siglo XIX y estas figuras secundarias que ya no procesionaban serán recogidas por el Museo Provincial de Bellas Artes de Valladolid, hoy Museo Nacional de Escultura, donde se conservan (Burrieza Sánchez, 2004) [9].

Finalmente, en la década de 1920, y con el impulso del arzobispo Don Remigio Gandásegui (Burrieza Sánchez, 2010) [10] (1857-1937), se volvieron a recuperar estos pasos de forma completa, aunque ahora llevados sobre plataformas con ruedas o carrozas procesionales. Y para acompañarlos se fundaron hasta los años 40 el resto de cofradías, junto a las históricas, que integran actualmente la Semana Santa de Valladolid, entre ellas, la Real y Venerable Cofradía de la Preciosísima Sangre de Nuestro Señor Jesucristo, fundada en 1929, en la que se basa el estudio del presente trabajo.

#### **1.4.2. Historia y evolución de los pasos o andas procesionales.**

La Real Academia Española de la Lengua define andas como “Tablero que, sostenido por dos varas paralelas y horizontales, sirve para conducir efigies”.

La primera mención en la Historia sobre estos elementos se encuentra en la Biblia. Según el Antiguo Testamento, Moisés mandó hacer, siguiendo las

directrices de Dios, el Arca de la Alianza con dos varas laterales para transportarla<sup>1</sup>.

Igualmente, en el Antiguo Egipto, Grecia y Roma hay menciones a procesiones en las que se transportaban imágenes de sus dioses con estructuras similares. Realmente éstas respondían a la necesidad de transportar de forma solemne un objeto.

Posteriormente, se usaron por los cristianos para sacar sus imágenes en procesión, manteniéndose hasta el día de hoy en España, principalmente en las zonas rurales. Como se ve en la siguiente imagen (*Figura 7*).



*Figura 7. Foto de unas andas tradicionales en La Pedraja de Portillo (Valladolid).*

Dichas estructuras, que constaban originalmente de un tablero de madera con dos varas paralelas que lo cruzaban, y que se transportaban a hombros, fueron evolucionando progresivamente atendiendo a las distintas necesidades de forma diversa en cada lugar, especialmente en el contexto de la Semana Santa, según se habló en el primer apartado.

Así, a partir del siglo XVI, con el surgimiento de los grupos escultóricos procesionales y el aumento del tamaño de las andas y por lo tanto del peso, los tableros se alargaron y se añadieron más varales para acoger más cargadores. Para apoyar en el suelo en los descansos, se utilizaban horquillas, palos de madera rematados en una U metálica en la que apoyaba el varal, a modo de patas de la estructura. Este modelo se mantuvo en Castilla y Aragón<sup>2</sup> hasta principios del siglo XX, cuando se modificó como se explicará posteriormente.

<sup>1</sup> Éxodo 25, 12-16; Números 4, 15; Reyes 8, 8; Crónicas 15, 15

<sup>2</sup> Estos territorios comprenden, a grandes rasgos, las Semanas Santas de Galicia, Castilla y León, Madrid, Castilla-La Mancha, Extremadura, Comunidad Valenciana, Murcia y algunas localidades de Andalucía.

La única Semana Santa que conserva este modelo original es la de Medina de Rioseco según se puede apreciar en la *Figura 8* (Valladolid)<sup>3</sup>.



*Figura 8. Fotografía de unas andas tradicionales de Castilla en Medina de Rioseco.*  
[11]

Estos tableros seguían siendo muy sencillos, solo con una moldura de madera como decoración. Sin embargo, en el siglo XVII, por el cambio de gusto del Barroco, en algunos casos se añadieron peanas y decoraciones doradas más recargadas, aunque se seguían transportando de la misma manera.

Por otro lado, en ciertos lugares de España, estos tableros pronto se modificaron radicalmente para ser transportados por el interior. Este es el caso de Sevilla (*Figura 9*), en la que cargan apoyando en las cervicales; o Cádiz o Cataluña en las que se carga a hombros, pero desde el interior (Miscelánea de Arte Sacro, 2017) [11].

Con la decadencia de la Semana Santa, la mayoría de los pasos de muchas ciudades abandonaron la carga a hombros debido a la falta de hermanos cofrades y comenzaron a procesionarse sobre plataformas con ruedas. Sin embargo, desde los años 80 hasta la actualidad, por el nuevo esplendor de la Semana Santa, en muchos lugares se ha vuelto a recuperar la carga a hombros, aunque de manera distinta, esta vez, a como se hacía tradicionalmente.

---

<sup>3</sup> Se debe diferenciar entre las semanas santas rurales, que aún conservan estas andas simples, y las urbanas (que incluyen también localidades que históricamente han tenido mayor población, aunque actualmente sean menores) que son las que evolucionaron.



*Figura 9. Modo de carga interior de Sevilla, “a costal”. [11]*

Concretamente, en el caso de Valladolid, esta evolución se sigue exactamente. Hasta principios del siglo XX, los pasos con muchas figuras se transportaban en tableros similares a los de Medina de Rioseco, a excepción de aquellos pasos titulares con una sola imagen que incorporaron grandes peanas barrocas. Ya en el siglo XX, por esta falta de hermanos de carga, todos los pasos se comenzaron a procesionar sobre ruedas. Finalmente, como se ha comentado en el párrafo anterior, con el resurgimiento de la Semana Santa a finales de siglo, las cofradías volvieron a recuperar la carga a hombros, pero no como era anteriormente, sino con un nuevo modelo que buscaba una mejor presentación y estética. Para ilustrar esta evolución, el mejor ejemplo es el paso de la Virgen de las Angustias de Valladolid.

Como se puede observar en la [Figura 10](#), hasta principios del siglo XX, la Virgen de las Angustias procesionaba sobre su peana barroca del siglo XVIII sustentada por un sencillo tablero con tres varales. Al no contar con patas, apoyaría en el suelo sobre las horquillas. Posteriormente, esta misma peana se colocó sobre la carroza, como se puede ver en la foto central, para, en 1992 estrenar el nuevo modelo de andas, que siguieron el resto de cofradías de la ciudad al recuperar este modo de procesionar.

En este nuevo modelo, los varales (3 ó 4) se insertan desde delante y detrás, fijándose entre sí en el centro. Para apoyar en el suelo, se colocan cuatro patas incorporadas en la estructura del paso, normalmente soldadas o atornilladas, cubriéndose con unas faldillas de tela para que no se vean.



*Figura 10. Evolución de las andas de la Virgen de las Angustias (Valladolid). De izquierda a derecha, andas primitivas, carroza y andas actuales. [11]*

## Capítulo 2. MATERIALES Y MÉTODOS.

En este apartado se presentarán las herramientas con las que se va a trabajar, es decir, las unidades de medida inercial o IMUs y las plantillas LoadSol. Se explicará el funcionamiento, con referencia a los inputs que reciben y los outputs que devuelven, la metodología de su uso, calibración y reajustes posibles necesarios para el procesamiento que se deberán llevar a cabo.

### 2.1. Sensores Novel GmbH LoadSol.

Las plantillas Loadsol, desarrolladas por Novel, son dispositivos diseñados para medir la carga y la distribución de presión bajo los pies durante diversas actividades como la marcha. Estas plantillas están equipadas con sensores de presión integrados que registran datos en tiempo real, proporcionando información detallada sobre cómo se distribuye el peso entre los pies. En este caso, se han utilizado para medir el reparto de cargas en los hombros de los hermanos de carga de una cofradía. Es posible este análisis debido a que las plantillas devuelven la fuerza resultante de toda la plantilla, por lo que no es necesario apoyar la superficie completa de esta y pueden ser utilizadas en los hombros de un cargador. Estas plantillas detectan la presión entre el hombro y la estructura, devolviendo esa fuerza resultante que ejerce el apoyo (cargador), para soportar el peso.

El procedimiento de análisis es simple. Mediante Bluetooth, estas cargas registradas llegan a una aplicación llamada, "LoadSol App", que la empresa ofrece junto a la compra de las plantillas, de manera que permite registrar datos dinámicos y precisos en tiempo real con una frecuencia de muestreo de 100 Hz. Todo esto es posible gracias a esta característica inalámbrica de los sensores, que permiten el monitoreo de varias plantillas a la vez que sincronizadas a distancia registran datos de una actividad real.

Para obtener medidas precisas, las plantillas necesitan ser calibradas. De esta manera, se introduce el peso en kg, N o lbs de la persona que va a llevarlas. En este caso, en vez de una persona, se introduce el peso de un listón de 25,4 kg del laboratorio de estructuras, que pueda ser cargado para el proceso previo a los registros.

Por otro lado, la señal de la fuerza que se va a registrar tendrá una resolución. En este caso, al ser una medida compleja con muchos valores, se utilizó una resolución de fuerza de 0,1 N, de forma que cada 0,1 N se registra un valor de

fuerza. Esta se elige dependiendo de la máxima fuerza que se va a cargar y de lo detallada que se pretenda dibujar la gráfica de reacciones de fuerza.

Una vez establecido esto se procede con la calibración. Primero se descarga la plantilla durante unos 3 segundos y se pulsa el botón de establecer “ZERO”. Seguidamente se carga la plantilla con el peso del listón en el hombro de los portadores y se intenta equilibrar lo más posible la viga sin tocarlo, de manera que no se balancee ni tenga ningún tipo de vibración. Cuando se alcance esta posición de equilibrio se dará al botón “LOAD”. Tercero, se realizará de nuevo el paso primero, y por último se pulsa en “DONE”.

Calibradas las plantillas, entonces se pueden comenzar a registrar fuerzas de reacción por medio de Bluetooth. Se muestra una imagen de estas plantillas en la [Figura 11](#).



*Figura 11, Imagen de las plantillas Loadsol.*

## **2.2. Unidades de medida inerciales (IMUs) Movella Xsens DOT.**

Las unidades de medida inerciales XSENS son dispositivos en los que se integra un acelerómetro 3D, un giroscopio y un magnetómetro para proporcionar una orientación 3D precisa. En este caso el interés de este sensor es el acelerómetro incorporado, que permite registrar la aceleración lineal de los cuerpos a los que se adhiera en tres dimensiones, con un sistema de coordenadas cartesianas que está fijado al sensor. Es decir, permite medir la variación de velocidad de un cuerpo triaxialmente. En la [Figura 12](#), se muestra el sistema de coordenadas del sensor en DOT:



Figura 12. Esquema del sistema de coordenadas para el acelerómetro triaxial.

Está calibrado de manera que X es positivo hacia el este, Y es positivo hacia el Norte y Z es positivo cuando apunta hacia arriba.

Estos dispositivos, pequeños e inalámbricos se conectan por medio de Bluetooth a la aplicación propia “Xsens DOT App”, de manera que lo hace apto para estudios anatómicos y biomedicina en el ámbito del análisis del ejercicio físico y del movimiento del ser humano, para lo cual han sido diseñados. Pero no solo eso, sino que también pueden ser usados en aplicaciones de este tipo, para registrar las aceleraciones de un cuerpo como una viga o una estructura en tiempo real, gracias también al sistema sin cables. Para este efecto, se utiliza un smartphone Vivo Y525G, en el que se irán registrando esas variaciones de velocidad para diversas frecuencias que se determinen.

Si se requiere el uso de varios acelerómetros, como en este caso, es importante que los datos de medición estén sincronizados temporalmente entre diferentes sensores ya que cada uno de ellos tiene su propio reloj. Todos los sensores están sincronizados a una base de tiempo común, por lo que, durante la sincronización, un sensor actuará como nodo raíz, mientras que los sensores restantes serán escáneres.

El sistema de procesamiento de las señales de los distintos parámetros que se pueden adquirir del sensor se puede observar en el siguiente diagrama:

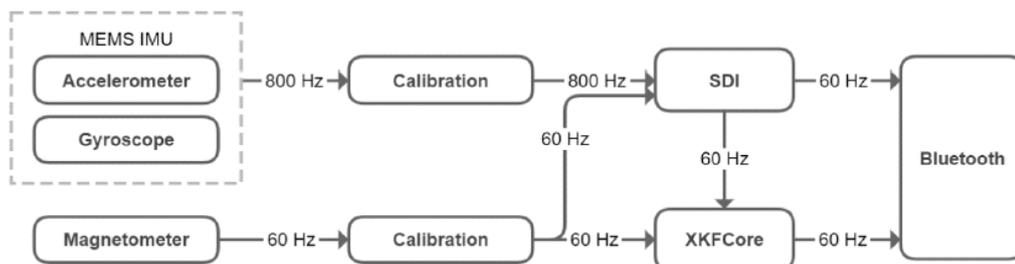
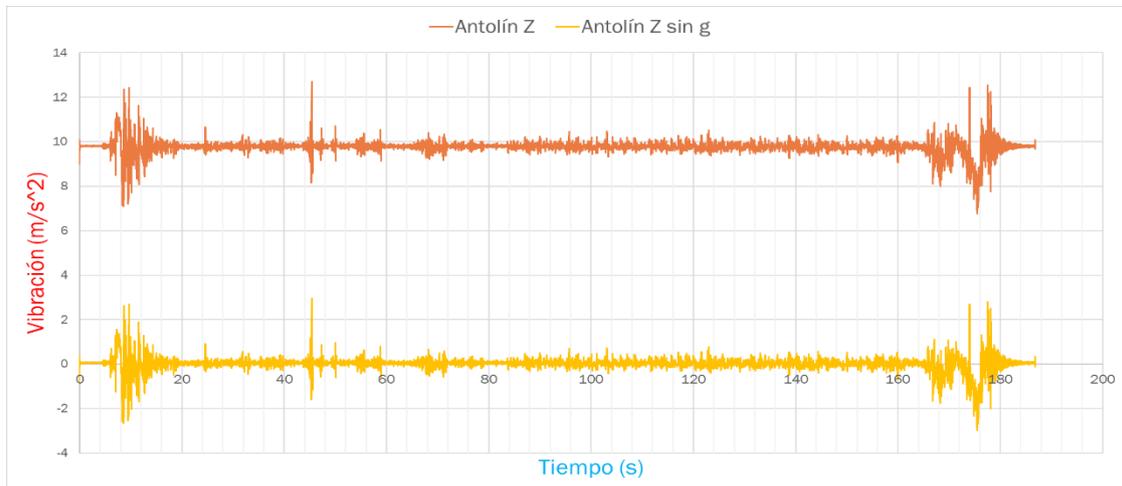


Figura 13. Diagrama de procesamiento interno de los sensores Xsens.

La integración strap down (SDI), es un método utilizado para calcular incrementos de velocidad (entre los otros, pero no son de interés para este estudio), integrando la aceleración del acelerómetro. Los datos de aceleración son muestreados y calibrados a una alta frecuencia (800 Hz) para mantener la precisión durante movimientos dinámicos como correr y saltar. Debido a la alta frecuencia de muestreo, los datos no pueden transmitirse directamente, por lo que se reducen, normalmente a 60 Hz por medio de este SDI. Posteriormente, se convierten las cantidades obtenidas del SDI en datos calibrados (por lo que no se necesita de calibración previa, están calibrados internamente), de aceleración ( $\text{m/s}^2$ ).

En cuanto se procede a las medidas se puede elegir la frecuencia de muestreo para grabar (esos 60 Hz del diagrama de la [Figura 13](#)). Cuanto más alta, menor pérdida de datos en tiempo real. En este contexto, la tasa de 120 Hz es requerida debido a la complejidad dinámica del estudio, que demanda una mayor cantidad de datos.

Por último, hay que tener en cuenta que los sensores de aceleración en el eje Z perciben la aceleración de la gravedad, por lo que para obtener unos datos reales que se puedan comparar con el resto de ejes, se necesita restar aproximadamente  $9,81 \text{ m/s}^2$  como se aprecia en la [Figura 14](#).



*Figura 14. Gráfica comparativa del mismo registro del acelerómetro en el eje Z. Superior lo registrado, inferior restando la aceleración de la gravedad.*

Entendidos los funcionamientos de ambos tipos de sensores todavía queda un problema por abordar. Se presenta la siguiente situación: existen dos cadenas de medición inalámbrica independientes controladas por el mismo smartphone mediante aplicaciones diferentes (Xsens y Loadsols). Debido a esta

configuración, resulta imposible iniciar la medición de ambos tipos de sensores simultáneamente. Además, todos los sensores del mismo tipo ya están sincronizados entre sí; por ende, el desafío radica en alinear las dos cadenas de medición inalámbricas independientes (Xsens y Loadsols).

Por lo tanto, se utiliza un disparador de sincronización (un golpe), detectado como un pico en las señales de fuerza (Loadsols) y aceleración (Xsens). Suponiendo que este disparador ocurre simultáneamente para todos los sensores (lo cual es cierto), se busca determinar el tiempo necesario para alinear las señales mediante Excel cortando la señal (es decir, disminuyendo el nivel de datos para hacerlas coincidir): este tiempo representa el retraso entre iniciar la medición en una cadena con respecto a la otra.

Finalmente, antes de poder buscar esa diferencia temporal, es necesario realizar un proceso de “resamplado” en los registros. Los sensores Xsens registran datos a una frecuencia de muestreo de 120 Hz, mientras que las plantillas lo hacen a 100 Hz. Por lo tanto, los datos de Xsens deben resamplearse a una frecuencia de 100 Hz para proceder con la comparación y alineación de las señales.



## Capítulo 3. DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS.

Se presentan dos registros que tratan de simular el comportamiento de unos hermanos de carga (siendo uno de los dos reales, aunque sin el número de cargadores usuales), en una procesión y poder analizar las inconveniencias que estos se pudieran encontrar.

### 3.1. Ensayo en viga con tres apoyos.

Antes de proceder con las andas al completo, se propone un estudio dinámico por medio de las plantillas “LoadSol” y de los sensores de aceleración “XSens”, que se usarán con una viga del laboratorio de estructuras para intentar comprender de manera más sencilla lo que podría estar ocurriendo en uno de los varales y tratar de aproximar así el estudio a la realidad, de la manera más parecida posible. Se propondrán tres apoyos, debido a que en una estructura al uso no siempre se es posible contar con un peso distribuido en el que se tengan los mismos cargadores delante que detrás (puede que haya dos delante y sólo uno detrás, por ejemplo). Además, ayuda a conocer qué pasa cuando la viga ya no es simplemente biapoyada y pasa a ser hiperestática.

Es decir, ¿qué ocurre si uno de los cargadores se desplaza en el eje Y del varal? ¿Qué pasa si uno es más alto que otro? ¿Qué ocurre si se implementa una almohadilla?

Este estudio pretende entonces otorgar una idea de cómo se distribuyen las fuerzas y las aceleraciones de los cargadores en un caso simple y qué conclusiones se pueden obtener al respecto.

El registro se ha recopilado durante 180 s y recoge las aceleraciones y las fuerzas ejercidas por los tres sujetos a lo largo del tiempo. La viga en cuestión se ilustra acto seguido en un croquis en 3D para una mayor visualización (*Figura 15*):

Esta viga está fabricada en madera cuya densidad es:  $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$ , y cuyo peso es de 85,05 kg como se explicará en el apartado siguiente (3.3).

De esta forma, los cargadores se mueven en la dirección de “Y”, habiendo uno en la parte delantera otro en el centro y otro más, en la parte trasera. Se puede ver en la *Figura 16* que al cargador trasero Álvaro, se le representará en verde para un mayor entendimiento visual, al del medio, Antolín, en naranja, y al delantero, en azul, Saúl.

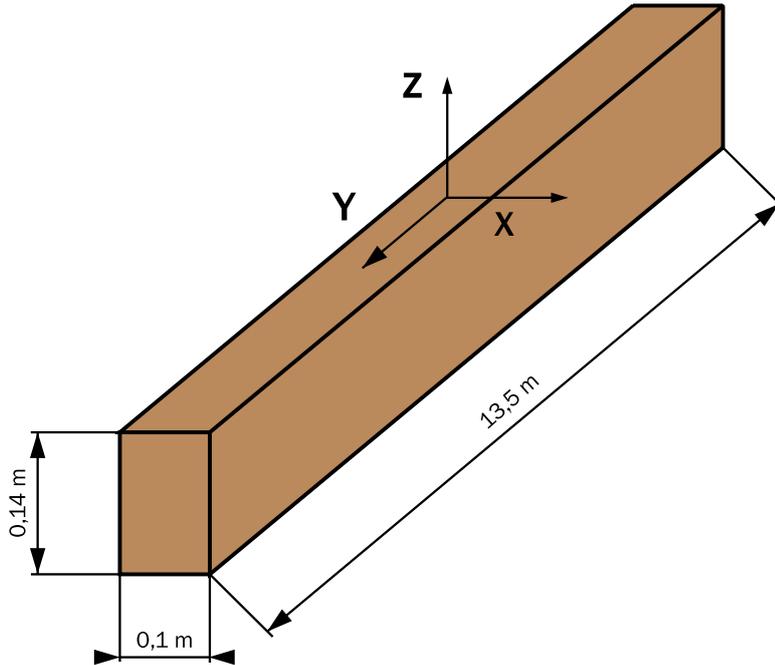


Figura 15. Croquis de la viga del laboratorio, con las medidas de la sección y el largo.

Se han posicionado los acelerómetros “XSens” y las plantillas “LoadSol” explicados en el apartado 3.1, en las posiciones indicadas para el estudio. Así, los primeros, se denominan por una combinación de FXL, teniendo en cuenta que el de detrás lleva el número 2 sustituyendo esa X (genérica), el del medio el 4 y el delantero el 6. Por su parte, los segundos se nombran con una B3, B5 y B7 correspondientemente.

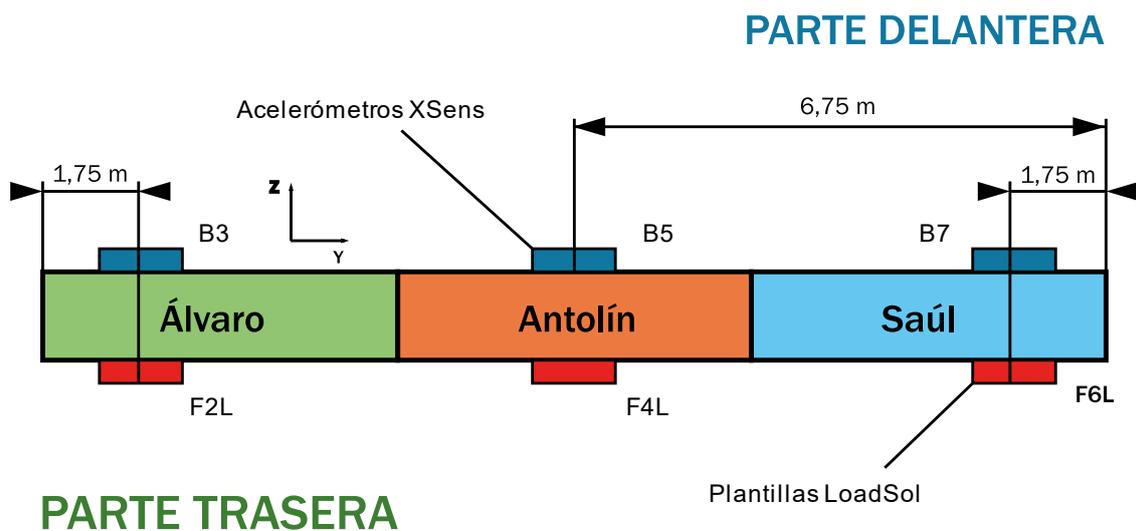


Figura 16. Viga en alzado mostrando a los sujetos con las medidas de colocación, las plantillas y los acelerómetros.

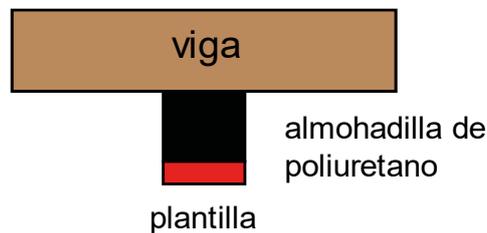
Se muestra también una tabla (*Figura 17*) con las estaturas de los diferentes sujetos medidas al hombro, para después analizar y/o simular la variabilidad de casos que se podrían dar en unas andas reales:

	Álvaro	Antolín	Saúl
Estatura al hombro (m)	1,46 + 0,08	1,570	1,640

*Figura 17. Tabla de distribución de alturas medidas hasta el hombro en metros de los tres sujetos.*

Saúl, es el más alto, seguido de Antolín, en el medio, y por último el Álvaro, al que se le colocó una almohadilla de 8 cm para asegurar que cargara peso.<sup>4</sup>

Esta almohadilla está hecha de poliuretano rígido, utilizado en elementos estructurales por sus propiedades de amortiguación, pero aportando cierta rigidez. Dicha almohadilla se colocó en el hombro del cargador, por encima de la plantilla de fuerzas. Es decir, entre la plantilla de Álvaro y la viga. Se muestra un croquis en la *Figura 18*:



*Figura 18. Croquis de la almohadilla puesta en el hombro de Álvaro.*

Por otro lado, se estableció con un metrónomo la frecuencia de paso, para marcar el ritmo de la marcha y proporcionar así un ensayo realista, como si el sonido del instrumento fuera el golpe del bombo. Esta se fijó, ajustando dicho metrónomo con una marcha procesional a 0,7 Hz. Además, si se observa el vídeo se puede conocer esta frecuencia calculando el número de pasos a lo largo de un tiempo, en este caso, se dan 7 pasos cada 10 s, o lo que es lo mismo, 42 pasos cada min.

<sup>4</sup> Esto puede influir a la hora de tomar medidas ya que al fin y al cabo es una espuma que se comprime y puede no devolver un resultado esperado. Sin embargo, en la realidad, en muchas hermandades se utilizan este tipo de almohadillas para forzar la altura de todos los hermanos y permitir así que todos carguen peso.

Se presenta una captura del vídeo grabado en el registro del laboratorio en la *Figura 19*:



*Figura 19. Captura de vídeo del registro con la viga del laboratorio.<sup>5</sup>*

También se puede observar una foto de cómo se colocaron los acelerómetros en la viga, según la *Figura 20*.



*Figura 20. Foto de la colocación de los IMUs en la viga.*

---

<sup>5</sup> A pesar de que los sujetos en la foto estén invertidos, no influye a la hora de los resultados, ya que el hecho de que los altos vayan delante y los bajos detrás es simplemente por gusto. Se demuestra en los análisis. Se propondrá el estudio como se indicó en la *Figura 16*.

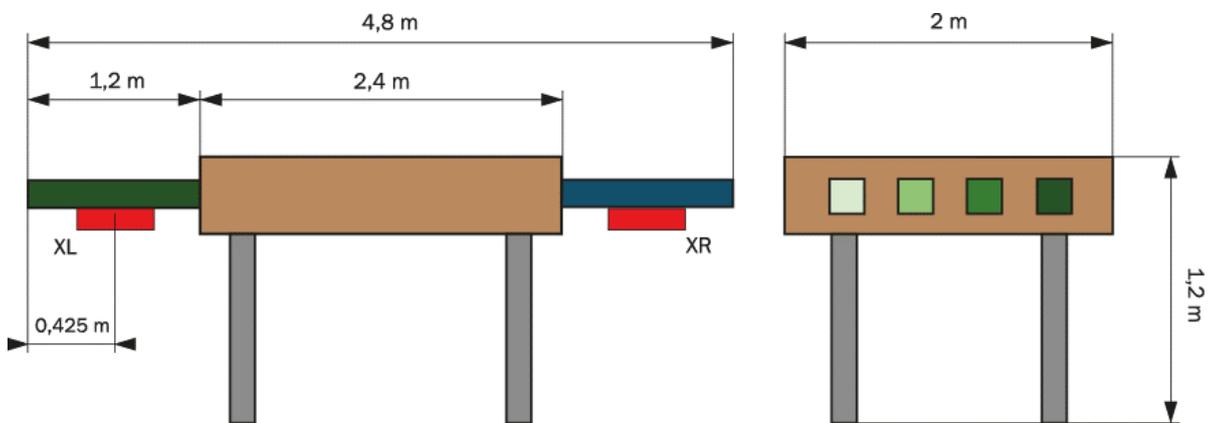
### 3.2. Ensayo sobre unas andas reales.

Concluyen los ensayos experimentales de esta prueba de concepto con el estudio de campo, en el que se realizó una medida dinámica por medio de las plantillas “LoadSol”.

Esta medida se recogió durante 120 s de prueba para intentar recolectar medidas reales de las cargas a las que podrían estar sometidos los hermanos de carga y la capacidad de estos para habituarse al peso de las andas para tan solo ocho cargadores y al ritmo del paso (al son de la música). Además, permite conocer la situación de cada persona debajo de la estructura y el porcentaje de fuerzas a las que están sometidas a lo largo del tiempo.

En resumen, se trata de realizar una prueba lo más realista posible con hermanos de distintas alturas para intentar aproximar la prueba de concepto a una procesión al uso y poder crear una línea de estudio que permita continuar con las investigaciones sobre este campo.

Se presenta un croquis de las andas (*Figura 21*) para ilustrar mejor lo que se va a ensayar:



*Figura 21. Croquis de las andas que se han utilizado para el registro.*

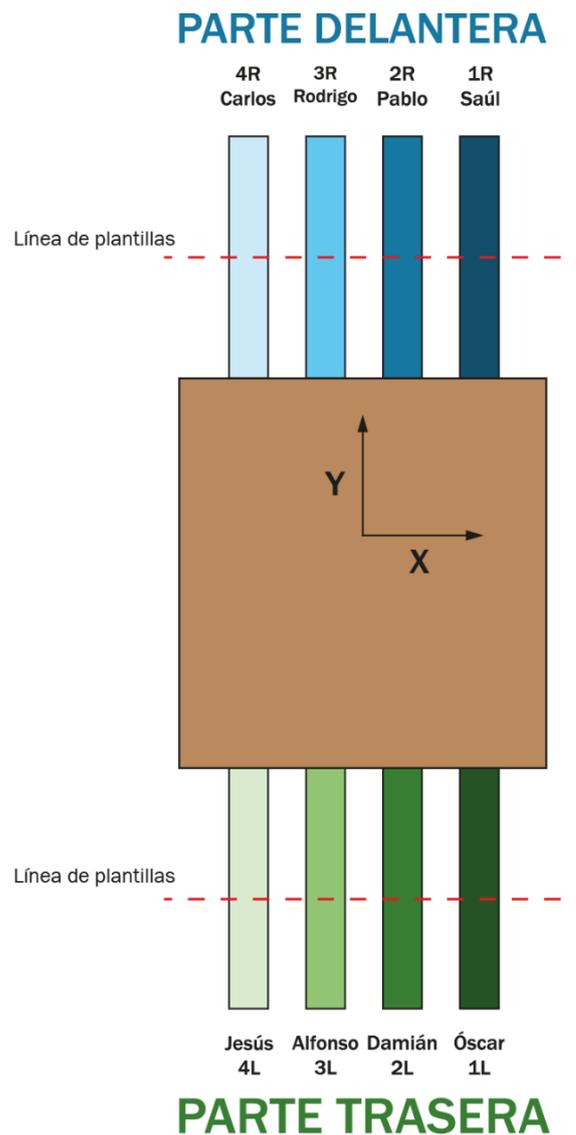
De esta forma, las plantillas, que están representadas por el recuadro rojo, están situadas en el medio del varal. En la estructura de andas, se tienen cuatro varales detrás y cuatro varales delante, además de ocho plantillas que llevan cada uno de los ocho hermanos de carga, como se ha comentado.

Las plantillas se denominan con un número del 1 al 4 y por una letra dependiendo de si es para los hermanos delanteros, R; o para los hermanos traseros, L.

Se expone en la *Figura 22* un croquis en planta para observar mejor la distribución de las plantillas y los cargadores<sup>6</sup>:

De esta forma, los hermanos de carga se han colocado de derecha a izquierda (si se está debajo del paso), de manera que el de la derecha del todo empieza en 1X hasta 4X. Los de delante, en tonos de azul, para distinguir mejor posteriormente las gráficas, y los de detrás, en tonos de verde.

Todos avanzan en la dirección de “Y”, lo que sería la marcha normal de la procesión.



*Figura 22. Estructura de andas en planta con la posición de los cargadores y sus plantillas.*

<sup>6</sup> Los sujetos de carga se llamarán por su nombre en este punto, a diferencia del apartado anterior, en el que se llamaban sujeto x, como signo de homenaje a los hermanos de carga y amigos que participaron en este trabajo de final de grado.

Se presenta una tabla en la *Figura 23* con las características de estatura de cada uno de los portadores como información adicional para observar cómo influye la altura en la marcha y la distribución de los pesos.

	Óscar	Damián	Alfonso	Jesús	Saúl	Pablo	Rodrigo	Carlos
Estatura al hombro (m)	1,500	1,510	1,490	1,480	1,640	1,580	1,560	1,600

*Figura 23. Tabla de distribución de alturas medidas hasta el hombro en metros de los hermanos de carga.*

Se puede ver cómo hay una distribución de alturas bastante variada, teniendo en cuenta que el más alto es Saúl, con 1,64 m y el más bajo Jesús, con 1,48 m. También hay una diferencia de unos 10 cm entre los hermanos de carga delanteros y los traseros (en una procesión, lo normal es que haya una cuadrilla de altos para llevar la parte delantera de la estructura, dependiendo del paso, y otra de bajos para la parte trasera; de manera que la talla mire al cielo con una inclinación aceptable, sin que parezca que está demasiado inclinada).

De la misma manera que antes, pero esta vez sin metrónomo, como se asistió a un ensayo real de la cofradía, el registro se ha hecho utilizando una banda real de semana santa, en la que los cargadores se incorporan a andar al ritmo de la marcha que suena.

Si se cuentan los pasos del vídeo, se puede ver como la frecuencia son 0,6 Hz esta vez. Es decir, 6 pasos en 10 s, o 36 pasos en un min.

En la *Figura 24*, se muestran algunas fotos realizadas en la nave donde la cofradía ensaya:



*Figura 24. Portadores traseros a la izquierda y los delanteros a la derecha.*

También se aprecia en la [Figura 25](#) una foto de cómo se colocaron las plantillas a cada uno de los hermanos de carga (por medio de una cinta de carroceros para que no resbalara a lo largo del registro).



*Figura 25. Plantillas “LoadSol” colocadas.*

### 3.3. Peso Estático.

Anteriormente se han expuesto los ensayos y el procedimiento para realizarlos, pero queda una cosa importante de definir: ¿cómo se pueden pesar unas andas procesionales?

Dado el tamaño y la complejidad de la estructura, obtener una medición precisa de su peso presenta ciertos desafíos logísticos y técnicos. Normalmente, este tipo de tareas se realizaría utilizando básculas industriales (*apartado 1.3.2*), que están diseñadas para manejar grandes cargas y proporcionar mediciones exactas. Sin embargo, el acceso a una báscula industrial puede ser complicado y costoso, además de requerir una logística considerable para trasladar la estructura hasta el lugar de pesaje.

Para superar estos desafíos y simplificar el proceso, se ha desarrollado una metodología alternativa que se basa en el uso de sensores domésticos o básculas comunes. Esta metodología, aunque menos convencional, permitirá obtener una estimación precisa del peso total de la estructura de una manera más accesible y económica.

El enfoque implica distribuir la estructura sobre múltiples básculas y sumar las lecturas obtenidas, asegurando que el peso está repartido de manera uniforme y que las mediciones son fiables. Esta técnica requiere una cuidadosa planificación y ejecución para garantizar la precisión de los resultados, pero ofrece una solución práctica y eficiente ante la imposibilidad de utilizar básculas industriales.

Con esta metodología, se pretende demostrar que es posible obtener mediciones precisas de pesos considerables utilizando herramientas más accesibles, lo que podría tener implicaciones significativas para proyectos futuros que enfrenten restricciones similares.

### 3.3.1. ¿Cómo pesar una viga esbelta?

En el marco del proyecto, es esencial determinar con precisión el peso de una viga esbelta. Este conocimiento es fundamental para asegurar la correcta distribución de cargas y la estabilidad de las andas, después, y demostrar que se puede pesar según lo pensado.

- Viga biapoyada.

Este problema puede compararse con el clásico problema de la viga biapoyada isostática en ingeniería estructural. En dicho problema, una viga soportada en dos extremos sufre una distribución de cargas que debe analizarse para asegurar que la estructura se mantenga estable.

El enfoque consiste en pesar la viga esbelta en secciones, utilizando múltiples básculas colocadas a lo largo de su longitud de manera que sirva de concepto para poder hacerlo después en unas andas al uso.

Antes de nada, se puede calcular el peso total de la viga de manera teórica:

$$p = \rho \cdot V$$

$$p = 450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (0,1 \cdot 0,14 \cdot 13,5) \text{ m}^3$$

$$p = 85,05 \text{ kg}$$

De esta manera, se presenta este problema simple según las características de la [Figura 15](#). En primer lugar, se muestra un croquis del modelado de la viga en SAP2000 (viga ab) ([Figura 26](#)), en el que se han restringido en el apoyo “a”

los tres desplazamientos UX, UY y UZ, además de los giros RX y RZ, dejando libre el movimiento en el plano Y. En el apoyo “b” sólo se restringe el desplazamiento vertical UZ. Es decir, un ejercicio de viga apoyada-apoyada móvil. (El ejercicio no cambia si se restringe el apoyo b como uno fijo normal, dado que el ejercicio en realidad se comporta como isostático al no tener fuerzas horizontales ejercidas sobre la viga).

Además, se necesita calcular el peso propio de la viga:

$$q = A \cdot \rho \cdot g$$

$$q = (0,1 \cdot 0,14)m^2 \cdot 450 \frac{Kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$q = 61,80 \frac{N}{m}$$

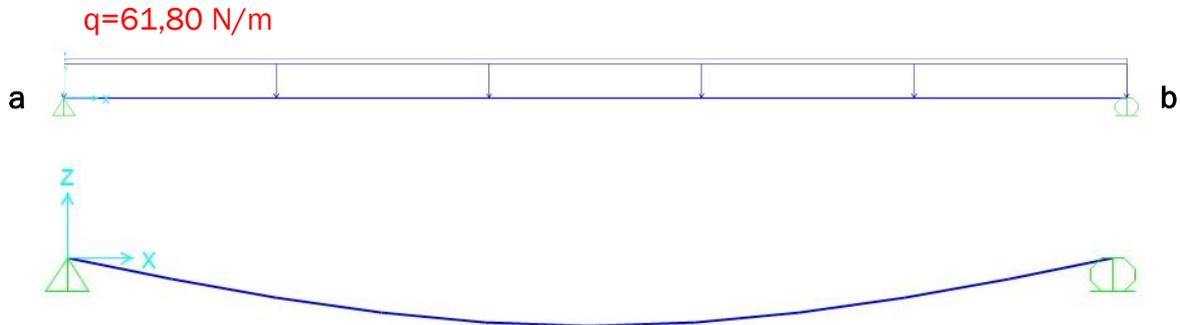


Figura 26. Viga biapoyada simulada en SAP2000 con su carga distribuida arriba y su deformada abajo.

Se expone el diagrama de cortantes en la *Figura 27* para observar la distribución de cargas (al ser un problema isostático simple, ambos apoyos tendrán la misma reacción):

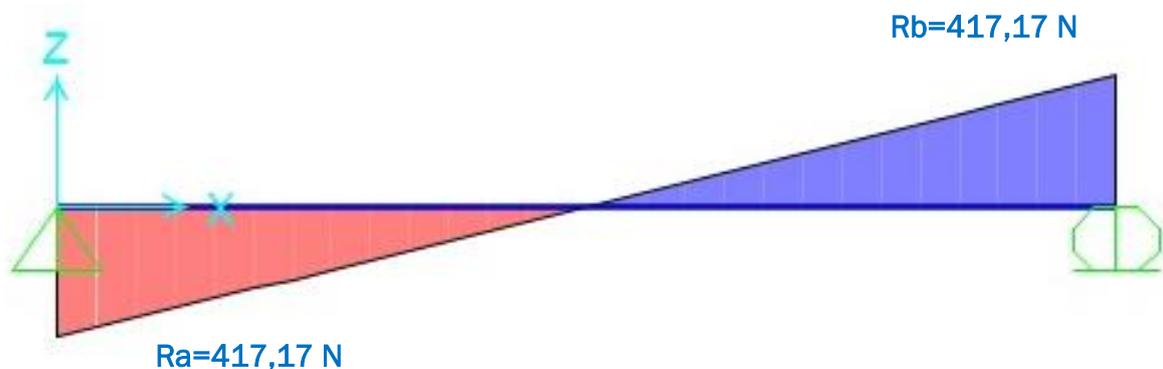


Figura 27. Diagrama cortante de la viga biapoyada con peso propio.

Ahora se observará qué ocurre cuando se le añade un desplazamiento prescrito en b (*Figura 28*), además del peso propio, (cabe destacar que el peso propio siempre está aplicado, aunque no se represente por simplificación de la imagen), por ejemplo. Este desplazamiento será de 3 cm que es lo que corresponde al grosor de la báscula:



*Figura 28. Incorporación de un desplazamiento prescrito de 0,03 m en b.*

El desplazamiento prescrito aplicado no cambia las reacciones. Tal y como se ve en la *Figura 29*. Sumando 0 N al total en cada reacción:



*Figura 29. Muestra de que la viga con desplazamiento no añade reacción.*

Por lo que al final, el resultado es el mismo que en la *Figura 27*. Si se pone un desplazamiento más grande, se seguirán obteniendo las mismas reacciones y nunca medirá la báscula de manera errónea, porque, en este caso, la estructura se desplaza al completo como sólido rígido.

Por lo que, si se pone una báscula primero en b y se anota el peso, y después se hace lo propio con el apoyo a y se suma, debería dar el peso total de la viga:

$$417,17 + 417,17 = 834,34 \text{ N}$$

Que si se pasa a Kg:

$$\frac{834,34 \text{ N}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \mathbf{85,05 \text{ kg}}$$

Justamente, se obtiene el peso teórico de la viga. El procedimiento es correcto y se puede pesar así.

Se puede comprobar, para futuros analistas, que el hecho de no colocar las básculas a la misma distancia de los extremos cambia el hecho de que la

báscula se pueda seguir pesando por partes (para este mismo caso en el que se dispone de dos apoyos), según la [Figura 28](#):



*Figura 30. Viga biapoyada con el punto b desplazado una distancia hacia la izquierda.*

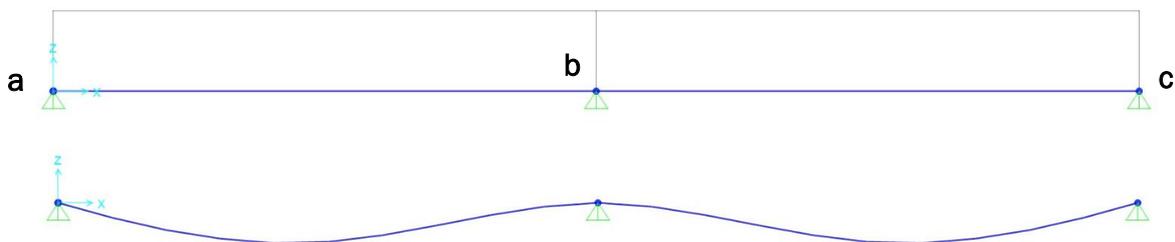


*Figura 31. Resultado de las reacciones con el apoyo b desplazado.*

Si se anota el peso en b, según el resultado de las reacciones mostrado por la [Figura 31](#) y después en a, se suman los valores, y se obtiene un peso de 9347 N.

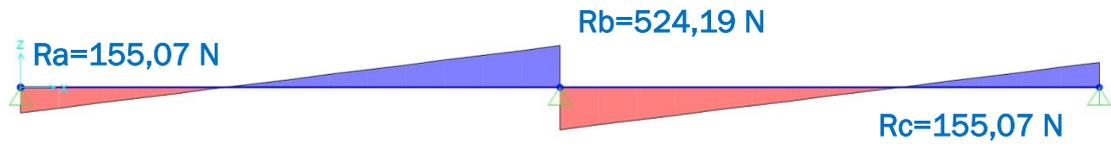
- Viga triapoyada.

Se quiere comprobar lo que ocurre cuando en un varal hay tres cargadores (que es la simplificación que se está haciendo), por lo que se pretende pesar la viga en tres tramos ([Figura 32](#)). En este caso, la estructura resulta ser hiperestática, por lo que el planteamiento es algo más complejo (como se ha dicho, la viga siempre está sometida a carga de peso propio):



*Figura 32. Viga triapoyada simulada en SAP2000 con su carga distribuida arriba y su deformada abajo.*

El diagrama cortante del ejercicio (sin más cargas que el peso propio ni desplazamientos prescritos) es el de la *Figura 33*:

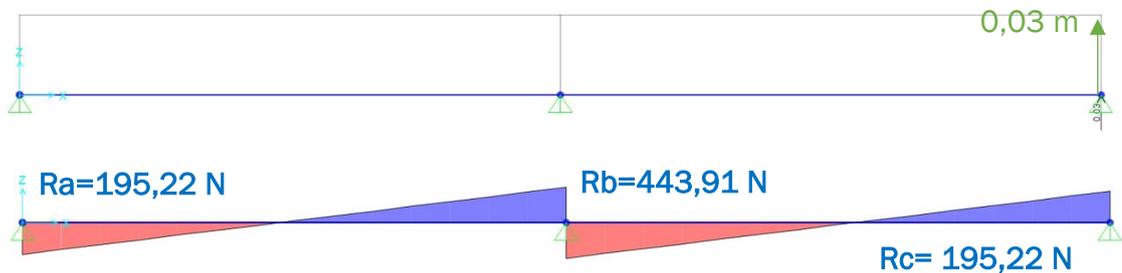


*Figura 33. Diagrama cortante de la viga triapoyada con peso propio.*

Las reacciones son iguales para los cargadores extremos, pero mucho mayor para el cargador central (está compensando la flexión de la viga en el centro). El peso total, es el peso de la estructura:

$$155,07 + 524,19 + 155,07 = 834,34 \text{ N} = 85,05 \text{ kg}$$

Se comprobará ahora (*Figura 34*) si se puede pesar por partes, poniendo la báscula primero en el apoyo c y anotando lo que marca:



*Figura 34. Viga triapoyada con desplazamiento prescrito de 0,03 m en c, arriba y diagrama cortante para este caso, abajo.*

La viga, sigue sumando el peso total y se alivia algo del peso del cargador central.

Ahora se pondrá la báscula en el apoyo b y se anotará lo registrado (*Figura 35*):



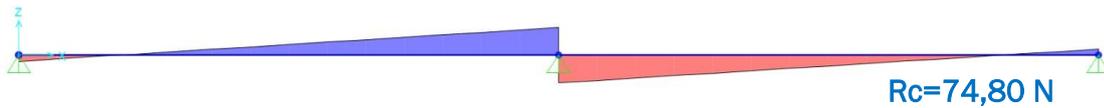


Figura 35. Viga triapoyada con desplazamiento prescrito de 0,03 m en b, arriba y diagrama cortante para este caso, abajo.

El peso total sigue siendo el mismo, pero ahora el que se encuentra más cargado es el central, y los laterales cargan menos que en el caso anterior.

Como se pretende pesar el total, midiendo en cada uno de los apoyos con la báscula se suma para conocer el resultado y compararlo con el peso teórico obtenido. Se suman lo que marcó la báscula en c, que por simetría marcará lo mismo en a y se suma lo que se obtiene en c:

$$195,22 + 684,74 + 195,22 = 1075,18 \text{ N} = \mathbf{109,60 \text{ kg}}$$

Se comprueba que no se puede pesar así la estructura porque sale más peso de lo que realmente debería dar.

Se propone pesar las andas incorporando unos tacos de cierta altura, como se muestra en la Figura 36, de manera que el centro de la viga, debido al peso propio, no apoye en el suelo, y se colocan dos básculas en cada extremo, como en el ejercicio de viga biapoyada. Así, la suma de ambas básculas tiene que sumar el peso de la estructura, como se ha demostrado:

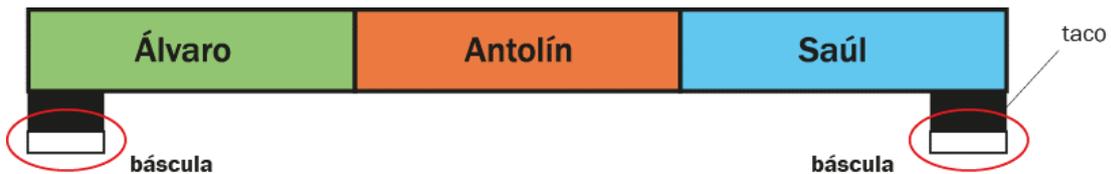


Figura 36. Croquis de la viga biapoyada con las básculas introducidas para realizar el registro de peso.

### 3.3.2. ¿Cómo pesar una estructura de andas reales?

Habiendo entendido lo que ocurre con el peso en un varal por medio de los ejercicios propuestos en dos dimensiones, se pretende conocer cuál es el peso real de las andas procesionales con las que se va a trabajar. Como se ha explicado anteriormente, es complicado conocer el peso real de una estructura tan grande a no ser que se cuente con básculas industriales o métodos más

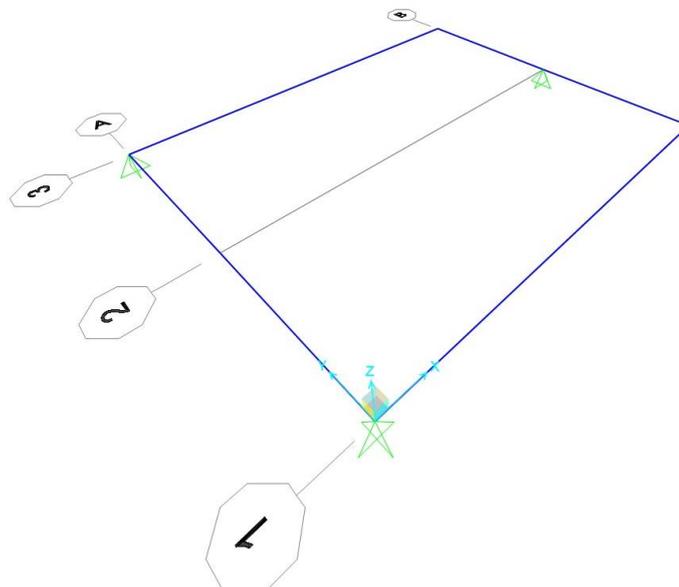
específicos para tal efecto. De esta forma, se propone un modelo simplificado utilizando el software SAP2000.

Las andas procesionales, estructuras grandes y a menudo complejas, pueden ser analizadas de manera efectiva mediante la simplificación de su geometría y condiciones de apoyo (los materiales empleados en este ejercicio serán en su completo, madera, al final la intención es demostrar el reparto de las cargas en la estructura, que pese más o menos no es lo más interesante en este apartado).

- Estructura de andas triapoyada.

En este caso, se consideran las andas como una estructura compuesta por cuatro vigas que forman un cuadrado como se puede observar en la *Figura 37*, simplificando los cuatro apoyos originales a tres.

El principio de funcionamiento es el mismo que en la viga con dos apoyos. Si se modela la estructura con tres apoyos fijos realmente, a efectos prácticos, es como si sólo uno de ellos lo fuera y los otros dos fueran móviles, al no contar con fuerzas horizontales; dejando así 6 reacciones que harían a dicha estructura isostática.

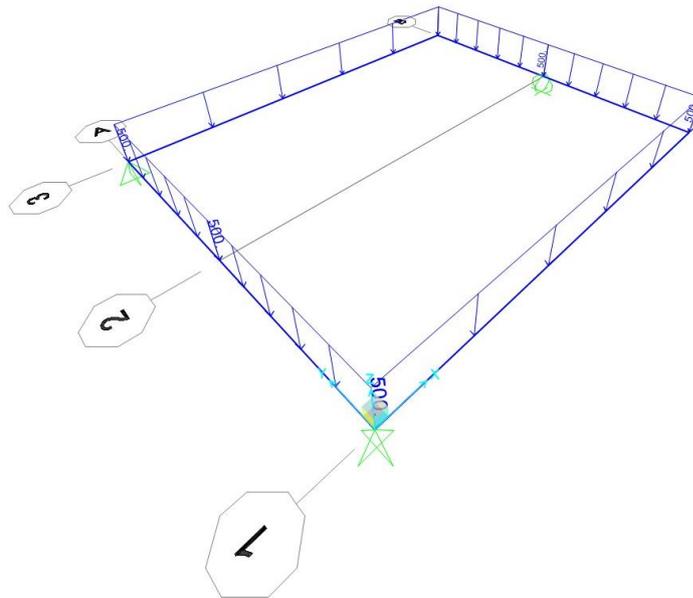


*Figura 37. Simplificación de las andas a una estructura con cuatro vigas y cuyas esquinas apoyan en uno de los laterales, mientras que en el otro solo apoya la parte central.*

Para ilustrar este enfoque, la estructura se apoyará en tres puntos, tal y como se ha explicado, reduciendo así la complejidad del análisis. En este modelo, se introducirá una carga distribuida de 500 N/m (es una carga arbitraria), lo cual servirá como ejemplo para demostrar que las andas pueden ser pesadas de esta manera, (en todos los casos está aplicada esta carga distribuida, aunque no se represente por simplificación). En total una carga de:

$$500 \cdot (2 \cdot 2 + 2 \cdot 2,4) = 4400 \text{ N} = 448,523 \text{ kg}$$

La elección de una carga distribuida se debe a la necesidad de simular la distribución del peso a lo largo de las vigas, como si fuera el peso propio de toda la estructura, lo que equivaldría a representar esta carga como una carga puntual aplicada en el centro de la estructura. Este punto es crucial, ya que es donde realmente recae el peso principal de las andas procesionales durante su uso. Se expone esta carga por medio de un croquis (*Figura 38*) y se muestran los resultados obtenidos (*Figura 39*):



*Figura 38. Croquis de la estructura 3d con tres apoyos y un peso distribuido a lo largo de la superficie con un valor de 500 N/m.*

Si no se introduce ningún desplazamiento prescrito, se observa cómo el peso se reparte de igual manera para los apoyos que están en la misma línea de acción y provoca una carga un poco mayor para el apoyo de la punta del triángulo, 2200 N contra 1100 N, dado por la *Figura 39*:

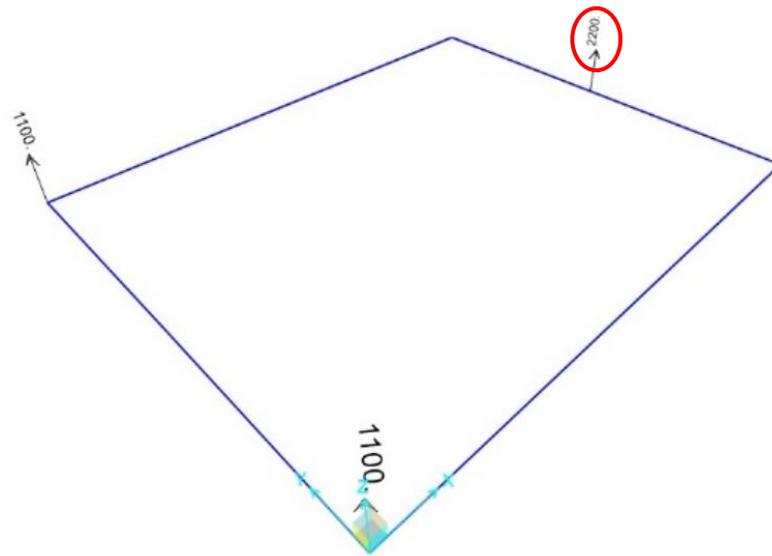


Figura 39. Reacciones de la estructura de andas con tres apoyos.

Si se introduce ahora la báscula en el apoyo opuesto a los dos que están en línea, modelándolo como un desplazamiento prescrito de 3 cm equivalente al grosor de la báscula, se puede comprobar en la [Figura 40](#) que no introduce ningún cambio al reparto del peso:<sup>7</sup>

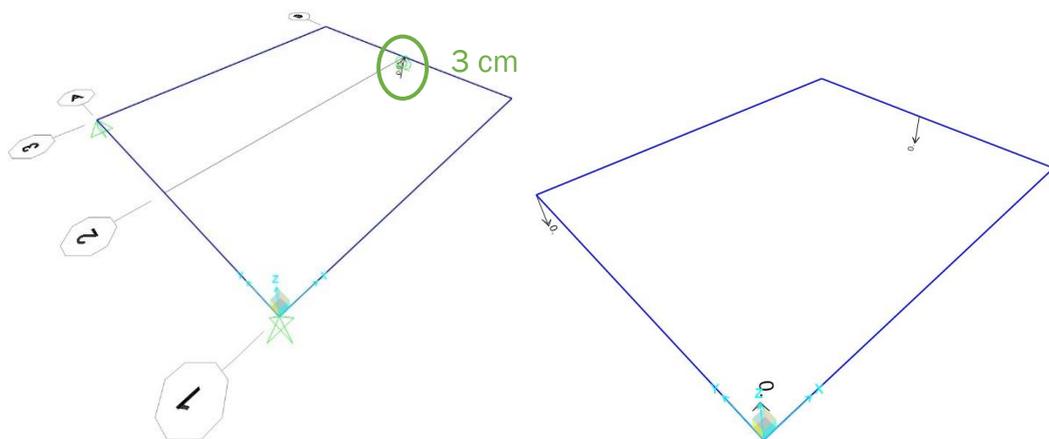


Figura 40. Reacciones introducidas por el desplazamiento prescrito.

De manera que, si se combinan las cargas del desplazamiento y las de la distribuida, el resultado obtenido es el mismo que en la [Figura 39](#). Se introduce

<sup>7</sup> En realidad, no importa en cuál de los apoyos se introduzca la báscula porque siempre saldrá lo mismo. Sin embargo, como en la realidad el peso no está igual de distribuido, se ha diseñado el experimento de esta manera para que al medir primero en un lado y luego en el otro, aplicando las mismas condiciones, se puedan captar esas pequeñas diferencias.

el diagrama de cortantes para observar de manera más visual lo explicado (Figura 41).

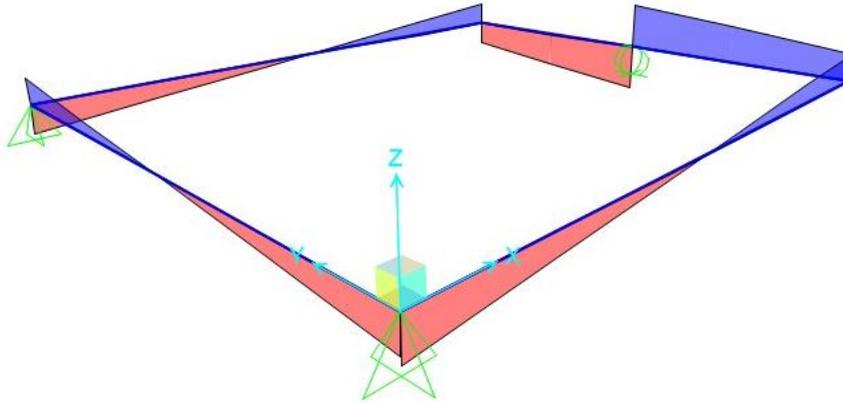


Figura 41. Diagrama cortante de la estructura en 3D con tres apoyos y un desplazamiento prescrito en uno de los apoyos.

En conclusión, es un método válido para pesar la estructura. Si se pone la báscula primero en la pata donde se indica el desplazamiento, y después se invierten las tornas y se suma el valor que marca la báscula se obtiene el valor del peso total de las andas:

$$2200 + 2200 = 4400 \text{ N} = \mathbf{448,980 \text{ kg}} \sim 448,523 \text{ kg}$$

Queda demostrado que con tres apoyos se pueden pesar unas andas, pero, la complicación de tener que unir dos patas de la estructura en un único apoyo se hace complicado y a veces, dependiendo de los materiales al alcance, imposible. ¿Se podrían pesar unas andas poniendo la báscula debajo de cada una de las 4 patas por separado mientras las otras tres están apoyadas?

- Estructura de andas con cuatro apoyos.

Se propone el mismo caso de cuadrilátero con el peso propio pero esta vez con apoyos fijos en cada uno de los lugares donde se encuentran cada una de las cuatro patas, de la siguiente forma, según la Figura 42:

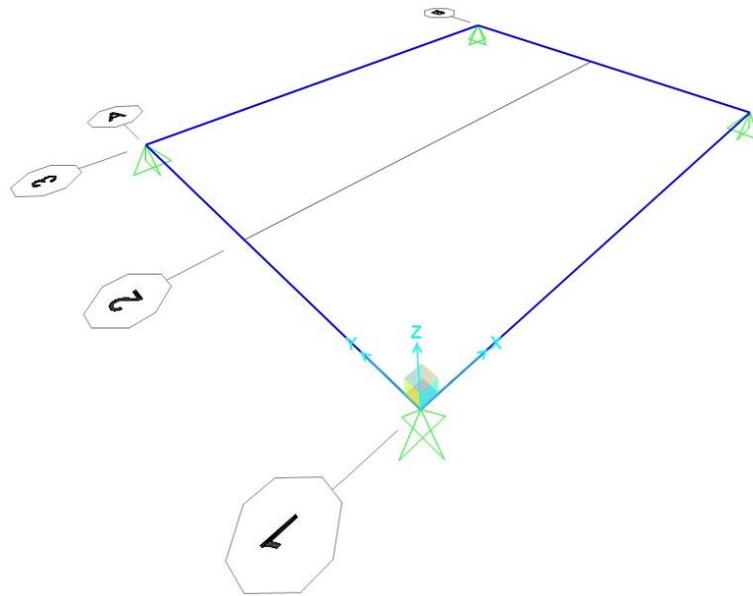


Figura 42. Croquis de las andas procesionales con cuatro apoyos fijos y la carga distribuida de 500 N/m.

Sin ningún desplazamiento, el análisis muestra cómo el peso se “equilibra” en cada apoyo (Figura 43). Esto también ilustra que, si no hay una diferencia de altura, todos los miembros de carga soportarían el mismo peso. Los 4400 N se reparten por igual en cada una de las patas.

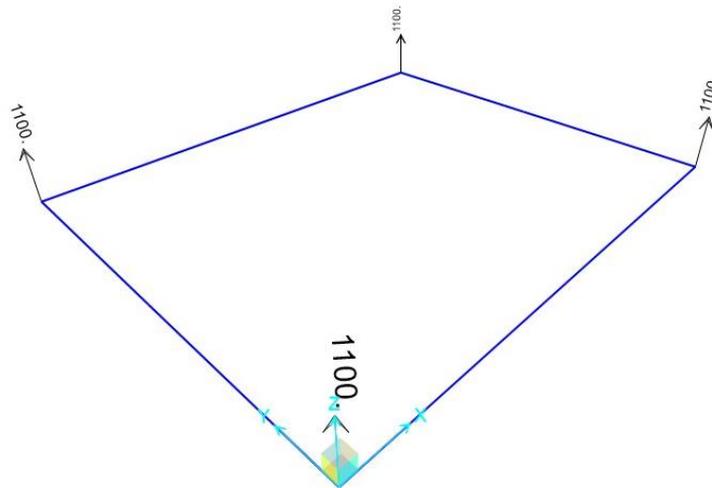


Figura 43. Esquema que muestra las reacciones en los apoyos cuando no hay desplazamientos prescritos.

Ahora se introduce (Figura 44) el desplazamiento de 3 cm de la báscula en el apoyo de la derecha del todo, por ejemplo.

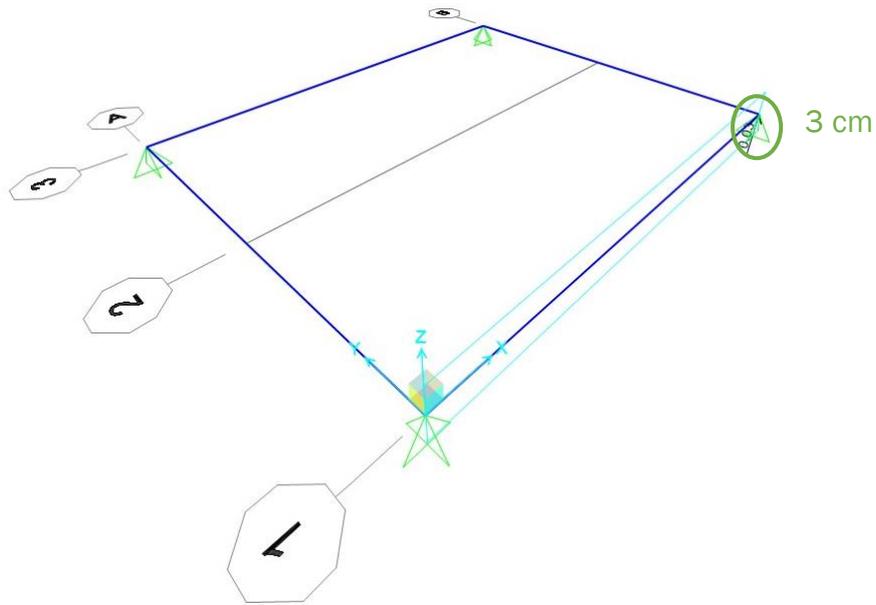


Figura 44. Esquema de las andas con el desplazamiento de 3 cm en la pata derecha.

Y las reacciones quedan de la siguiente manera, tal y como se puede apreciar en la Figura 45:

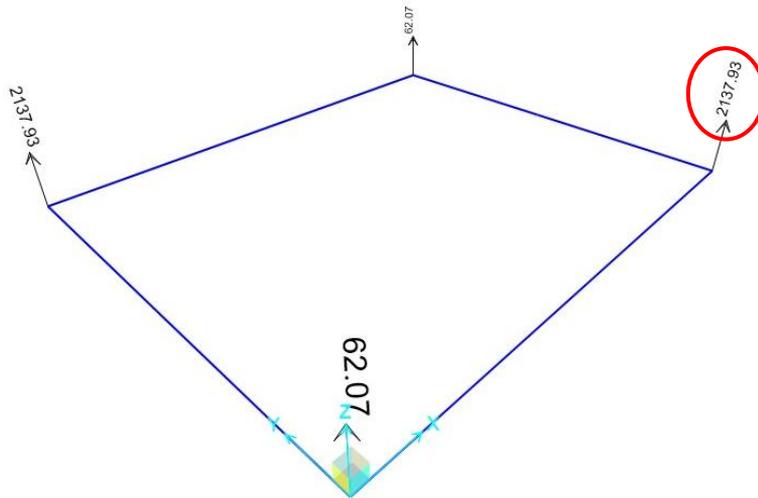


Figura 45. Reacciones tras poner la báscula en la pata derecha (según la imagen).

Así, la báscula soporta un peso de 2137,93 N para ese apoyo. Debido a la simetría, en cada una de las esquinas, cuando se sitúe la báscula, ésta va a devolver el mismo valor. Por lo que:

$$2137,93 + 2137,93 + 2137,93 + 2137,93 = 8431,72 \text{ N}$$

$$= \mathbf{860,380 \text{ kg}} \neq 448,523 \text{ kg}$$

El peso de las andas devuelto por la báscula se vuelve errático, aumentando su valor en casi el doble (1,916 veces concretamente el valor real de la estructura). En definitiva, no se pueden pesar así.

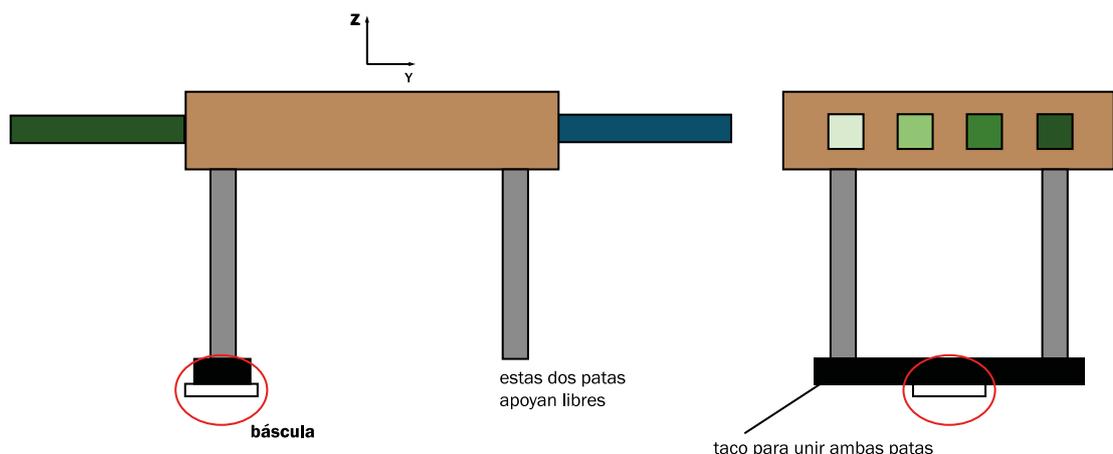
En conclusión y siempre bajo la “Hipótesis de pequeños desplazamientos”, los cuatro estudios realizados demuestran claramente cómo las diferentes configuraciones de apoyo en estructuras afectan su respuesta a los desplazamientos prescritos. Se analizaron dos grupos de estructuras:

Por un lado, la viga biapoyada y la estructura de andas en 3D con tres apoyos permiten que los desplazamientos prescritos sean absorbidos mediante un movimiento como sólido rígido. Esto significa que estas estructuras no necesitan deformarse para adaptarse a los desplazamientos, lo que minimiza los esfuerzos internos y las reacciones en los apoyos.

Por otro lado, la viga triapoyada y la estructura de andas en 3D con cuatro apoyos, no pueden absorber los desplazamientos prescritos sin deformarse. La necesidad de deformación resulta en cambios en las reacciones de los apoyos.

La explicación fundamental detrás de estas observaciones es que las primeras pueden moverse como sólidos rígidos para acomodar los desplazamientos prescritos, evitando así la deformación. Sin embargo, las segundas no tienen la misma libertad de movimiento y, por lo tanto, deben deformarse, lo que genera esfuerzos internos que influyen en las reacciones en los apoyos.

Por tanto, se introduce a continuación la metodología seguida para pesar la estructura: Se propone pesar las andas haciendo que dos de las patas estén unidas por un larguero longitudinal (*Figura 46*), de manera que queda una estructura en 3D con tres apoyos como la estudiada en el ejercicio de la *Figura 37*:



*Figura 46. Croquis de la metodología seguida para pesar las andas, a la izquierda el alzado y a la derecha el perfil izquierdo.*

De esta manera, la estructura con cuatro patas, hiperestática, (que no se puede pesar por separado en cada una de las patas como se explicó, a no ser que se tengan tres calzos a la misma altura que el instrumento de medida de peso, para cada una de las otras tres patas), se hace isostática y se coloca dicha báscula en el medio del larguero. Así las andas apoyan con sus dos patas delanteras y la tercera, que es la báscula, que mide el peso. Se anota lo que mide y a continuación se hace lo mismo con las patas traseras. Finalmente, sumando ambas medidas se obtiene el peso total de la estructura de andas.

## Capítulo 4. ADQUISICIÓN Y PROCESADO DE DATOS.

Se analizarán y se compararán los resultados de los datos recogidos en todas las pruebas de campo.

### 4.1. Peso estático de las estructuras.

En este apartado se pretende reflejar, según la metodología ya explicada en el apartado 3.3 el peso devuelto por la báscula en los ensayos realizados. De manera que sirvan para comprender los análisis fruto de los registros recogidos en las pruebas de campo.

#### 4.1.1. Registro 1. Peso de una viga esbelta (varal).

Habiendo explicado la forma de pesar una viga esbelta, se presentan los resultados de los pesos de ambas básculas obtenidos en el laboratorio como se indicó en la *Figura 36*:

	Peso 1 (kg)	Peso 2 (kg)	Peso 3 (kg)	Peso 4 (kg)	Peso 5 (kg)	Peso 6 (kg)	Media (kg)
Pata delantera	42,3	38,9	45,3	48,6	48,3	48,6	45,3
Pata trasera	45,7	45,7	36,2	45,2	35,9	35,5	40,7
Suma	88	84,6	81,5	93,8	84,2	84,1	86,0

*Figura 47. Tabla de los pesos recogidos en el laboratorio, junto a la suma total y la media de peso de ambos registros.*

Tras varias medidas (por mera comprobación de la veracidad de los resultados devueltos por la báscula), se obtiene una media para el peso obtenido en la parte de apoyo delantera, y otro para la trasera, que sumados dan un total de **86 kg** (*Figura 47*), un peso muy parecido al que debería pesar teóricamente la estructura, que es de 85,05 kg.

#### 4.1.2. Registro 2. Peso de una estructura de andas reales.

Según la metodología seguida, tal y como se muestra en la *Figura 46*, se han realizado un par de medidas para asegurar la fiabilidad del peso, obteniéndose los siguientes registros expuestos en la *Figura 48*:

	Peso 1 (kg)	Peso 2 (kg)	Media (kg)
Pata delantera	136	138,2	137,1
Pata trasera	141,5	143	142,25
Suma	277,5	281,2	279,35

*Figura 48. Tabla de los pesos recogidos en la prueba de campo, junto a la suma total y la media de peso de ambos registros.*

Se puede observar que en ambas medidas cada parte por independiente presenta un peso similar, cuya diferencia puede deberse a posibles errores de medida o errores de la unidad de medida, desniveles del terreno, etc. Por lo tanto, si se realiza una media de ambos registros y se suman los resultados se obtiene un peso total de la estructura de 279,35 kg, que pueden aproximarse a un peso de **280 kg** para las andas.

#### 4.2. Análisis dinámico de los datos registrados.

Se analizarán los datos obtenidos del procesado de los registros realizados en el laboratorio y el ensayo de andas.

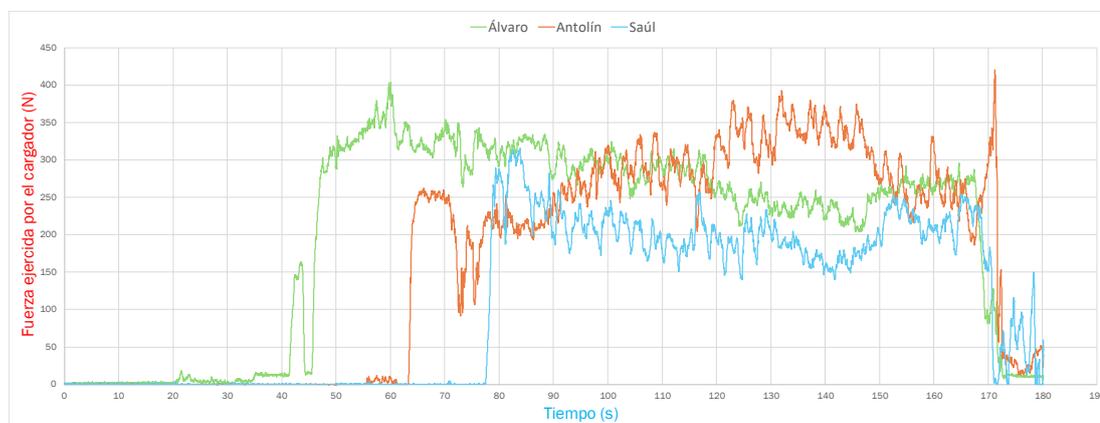
##### 4.2.1. Registro 1. Viga con tres apoyos.

- Análisis temporal del registro.  
FUERZAS.

Lo más interesante de esta gráfica es que los resultados aparentemente son correctos debido a la coherencia que se aporta. Al ser una gráfica que ilustra las fuerzas que ejercen los cargadores en los apoyos de la estructura a lo largo del tiempo del registro, es lógico pensar que, en un estado inicial, dicha estructura se encontraba en reposo y lo mismo ocurre al final, cuando se deposita en el suelo nuevamente. Lo cual se refleja en los datos de tal manera

que las fuerzas de los hermanos comienzan antes o después, pero comienzan en cero y terminan siendo cero.

Las plantillas han registrado de manera correcta los datos. Se muestra a continuación la gráfica general con el registro completo:



*Figura 49. Gráfica de la carga soportada por los cargadores a lo largo del tiempo completo del registro realizado.*

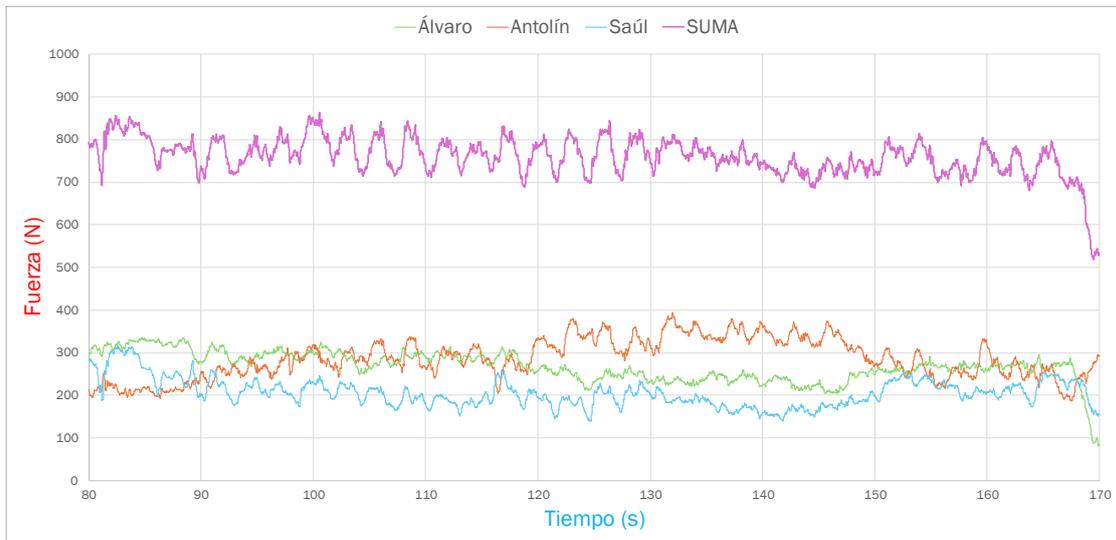
Se presentan los datos al completo en la [Figura 49](#) para observar cómo la carga fluctúa hasta que se estabiliza. Además, es curioso añadir a la argumentación de la correcta medida de los sensores el hecho de que perciben adecuadamente los distintos instantes en los que se han ido incorporando los cargadores a las andas, debido a que, al principio del ensayo, otro compañero iba colocando uno por uno las plantillas sucesivamente en la posición correcta.

Se ve la evolución de los portadores en los distintos colores, como ya se explicó en la [Figura 16](#), el cargador trasero, Álvaro, en verde, el central, Antolín, en naranja y el delantero, Saúl, en azul.

Cabe destacar que la fluctuación de fuerzas soportadas es debido a que se está realizando un estudio dinámico en el que no sólo interviene la fuerza, sino que influye la masa y la aceleración, por lo que la reacción de los apoyos debe de seguir la *Segunda Ley de Newton* de la siguiente manera:

$$R = \sum F + \sum m \cdot a$$

De esta forma, el estudio se realizará acotando la gráfica entre los tiempos 80 a 170 s, para despreciar todos esos momentos que pueden interferir en las estadísticas y limitar el estudio al movimiento de los cargadores al son del metrónomo, tal y como se aprecia en la [gráfica de la Figura 50](#):



*Figura 50. Gráfica de la carga soportada por todos los tres sujetos acotada en [80,170]. Se incluye resultante de todas las fuerzas llamada "SUMA".*

Se puede apreciar cómo la función que muestra los datos de la suma total de cada portador (en morado), equivale, en cada punto, aproximadamente al peso medido anteriormente de la estructura de andas, en torno a 840 N (se mostrará de manera más visible posteriormente en tablas). Esto indica que los datos registrados son aceptables y válidos para su análisis, es decir, tienen coherencia con la realidad.

De esta manera, se observa claramente la distribución de peso en la estructura. Dado que Saúl es la persona más alta de la cuadrilla, es lógico pensar que se está llevando la mayor parte de la carga. Sin embargo, en este caso es Antolín quien soporta la mayor de las cargas.

Es interesante comentar que no siempre se caminó en la misma dirección. Si se presenta la gráfica anterior sin la función de la suma (Figura 51), se pueden observar de manera más clara estos tres tramos.

En el primer tramo o lo que se ha llamado "marcha estática", que va desde [80, 100] s de registro, es un tramo en el que se caminó con la viga de manera lateral para salvar un obstáculo. Además, es una fase de adaptación en la que se empezó a coger el ritmo y se ve claramente en los contrastes tan elevados en las gráficas de los registros de cada uno. No es una parte muy estable hasta aproximadamente el segundo 90, en el que las fuerzas cargadas tienden hacia su nivel "estable". Se observa que Álvaro es el portador más cargado y el que se mantiene más estable. Mientras que Antolín va subiendo el peso que soporta, al contrario que Saúl, cuya tendencia es negativa. Es decir, el peso que

Saúl cargaba al principio empieza a trasladarse hacia Antolín, mientras Álvaro mantiene el paso.

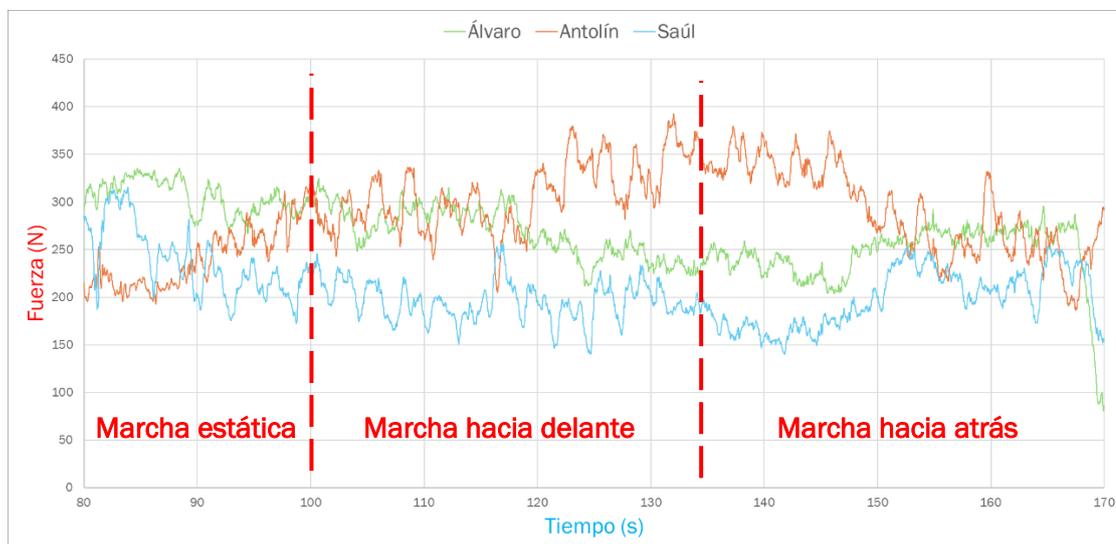


Figura 51. Gráfica de la evolución de la carga de los tres portadores a lo largo del tiempo del registro, acotado en el intervalo [80, 170]. En rojo, los tres tramos diferenciados.

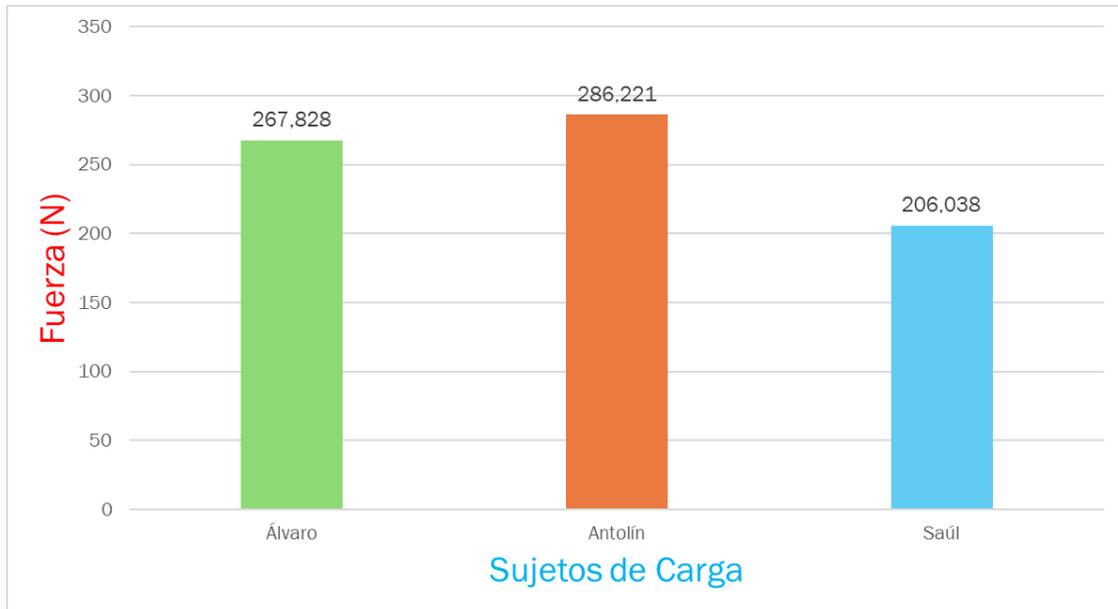
En el segundo tramo (100, 135] s, al caminar hacia delante, (lo que realmente es andar en procesión), se observa cómo las cargas son más estables y la tendencia lineal de los cargadores es más horizontal y sin tanta fluctuación. Poco a poco Antolín coge cada vez más peso, con lo que la relación entre su carga y el tiempo transcurrido es directamente proporcional, mientras que Álvaro, en esta parte, decae.

Saúl, por su parte, mantiene aproximadamente el peso, cargando, eso sí, menos que los otros dos compañeros, en torno a 180 N. Como diferencia observable, es que Antolín llega a cargar hacia el final de este tramo con casi la mitad del total del peso de la viga, sosteniendo en su pico unos 400 N.

Finalmente, el último tramo (135, 170] s, también es interesante de investigar, teniendo en cuenta que, en una procesión normal, cuando el paso entra en el templo, entra hacia atrás. ¿Influye en algo el hecho de caminar en sentido inverso?

Más o menos las cargas se mantienen en los tres portadores. Antolín, aunque al final del registro baja, conserva un peso de unos 350 N de media, Álvaro y Saúl, con una tendencia parecida, ambos suben aproximadamente al mismo ritmo, cargando el primero en torno a 250 N, y el segundo, unos 200, haciendo el total de 800 N aproximadamente, que es lo que pesa el varal.

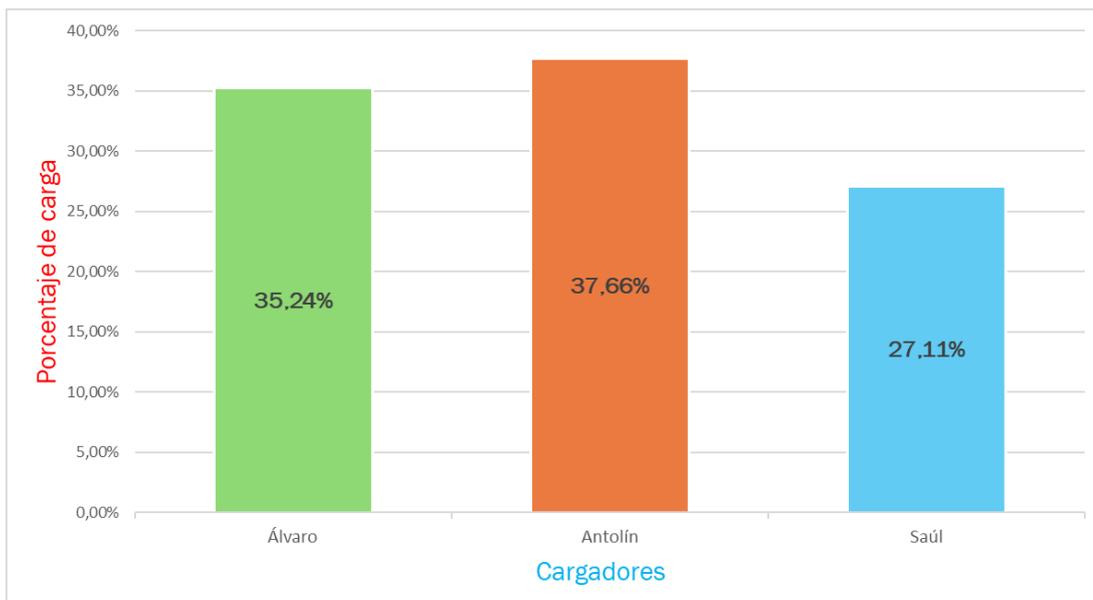
Se representan estos valores en un gráfico de barras que se muestra en la [Figura 52](#) para conocer las cargas medias soportadas por cada uno de los cargadores.



*Figura 52. Gráfica de la carga media soportada por cada hermano de carga.*

En este caso, a pesar de no ser Antolín el más alto, es el portador más cargado, con 286 N, seguido de Álvaro con 267 N y por último Saúl, con 206. Entre los tres suman 759 N, que sigue manteniendo aproximadamente el peso de la viga (hay que tener en cuenta que el peso varía con el tiempo y se ha cogido una media de cada uno de los registros de los portadores). A pesar de las diferencias, los datos registrados indican que no hay cargas muy dispares y más o menos los tres soportan un peso similar a lo largo del tiempo de ensayo.

El porcentaje de cargas con respecto al total es el mostrado en la [Figura 53](#). Si se dividieran las cargas equitativamente, cada uno de ellos debería cargar el 33,33 %, con lo que se concluye que Álvaro está prácticamente en su peso y Antolín y Saúl se disputan las cargas a intervalos. Normalmente, lo que ocurre es que Antolín compensa constantemente la carga que “deja” de soportar Saúl, la cual equivale a ese 5% que tiene el portador central de demasía, en naranja.



*Figura 53. Porcentaje de carga soportado por cada portador en relación a la carga total.*

También es interesante conocer qué es lo que ocurre con la dispersión de los datos y para eso, se muestra, a continuación, un “diagrama de bigotes”, también conocido como “diagrama de caja y bigotes” (*Figura 54*), que proporciona información sobre la distribución de un conjunto de datos y muestra estadísticas clave, como la mediana, los cuartiles y los valores mínimos y máximos.

Está compuesto por una caja central que representa el rango intercuartílico (IQR), que abarca desde el primer cuartil (Q1) hasta el tercer cuartil (Q3), y dos "bigotes" que se extienden desde la caja hasta los valores más extremos. Además, también se puede apreciar la distribución de datos atípicos encontrados en el registro que se comentará en las siguientes líneas.

Cuanto más grande sea la caja significa que el rango intercuartílico es más grande, por lo que los datos tienen una mayor dispersión en la mitad central de la distribución, es decir que los datos entre Q1 y Q3 están más dispersos y por lo tanto los valores están más alejados unos de otros, concentrándose lejos de la mediana.

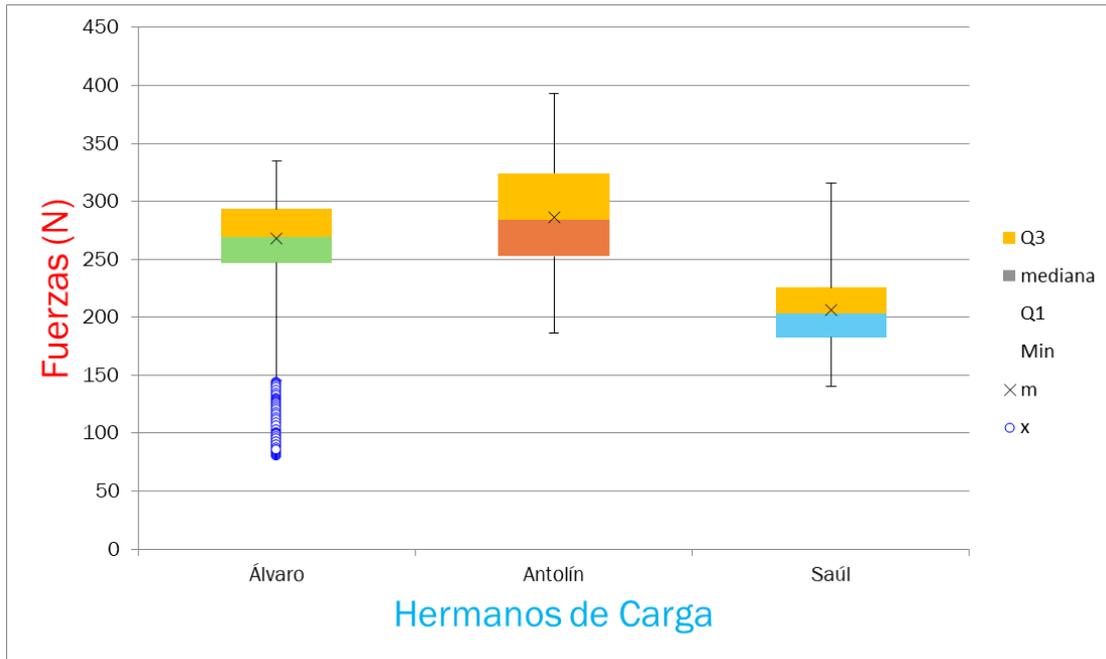


Figura 54. Diagrama de “Cajas y Bigotes” de la distribución de los datos de la viga.

Se introduce también una tabla resumen (Figura 55) con los datos numéricos obtenidos del gráfico:

	Álvaro	Antolín	Saúl
mínimo	145,123	186,490	140,280
Q1	246,852	252,374	182,511
mediana	269,098	283,866	203,447
Q3	293,240	324,110	225,466
Máximo	335,171	392,836	315,718
Media	267,828	286,221	206,038
Desviación	35,720	46,751	32,807

Figura 55. Tabla resumen de los diferentes datos estadísticos obtenidos del diagrama de “Cajas y Bigotes” de la viga.

En el caso de Álvaro, teniendo en cuenta que la mediana es la línea media entre el Q1 y el Q3, y la media es el aspa representada dentro de las cajas, se observa cómo esta última se encuentra por debajo de la primera, lo que significa que es una distribución sesgada negativamente, los valores se encuentran más dispersos hacia la izquierda del valor central. Es decir, que hay valores con mayor heterogeneidad en la parte de cargas bajas soportadas por este

hermano de carga, aunque es muy baja, apenas se nota. De hecho, al ser la caja estrecha y equidistante los cuartiles Q1 y Q3 de la mediana, indica que hay una concentración de los valores en el centro. Por eso prácticamente media y mediana coinciden. Este cargador registra muchas de las fuerzas en torno a dicha media, es decir, carga más o menos siempre parecido.

Es interesante comentar los círculos azules representados en el diagrama que indican los datos atípicos registrados en un cargador concreto. Cabe destacar que el IQR es una medida robusta de la dispersión que no se ve afectada por los valores atípicos, por lo que el hecho de que se encuentre una caja alargada puede significar que los datos tienen una amplia variabilidad, independientemente de los valores extremos. Es decir, que se observan en momentos puntuales cargas muy bajas alejadas de su mediana. Lo que se puede ver en valles grandes como el del segundo 170, por ejemplo (*Figura 56*).

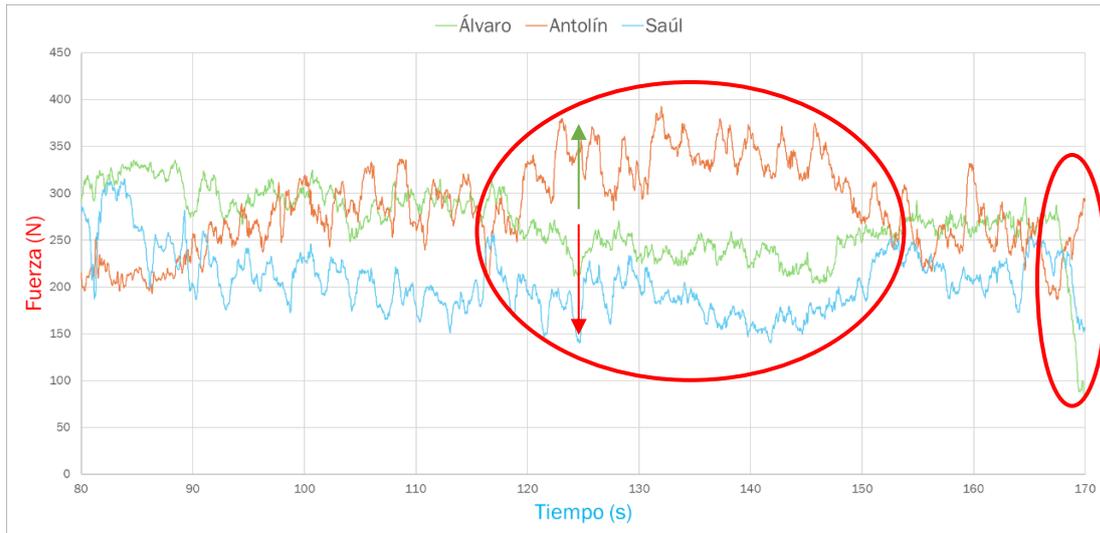
Por el contrario, en Antolín o Saúl, la media está por encima de la mediana, haciendo que, en este caso se produzca una distribución sesgada positivamente, hay mayor acumulación de datos dispares en las cargas altas. Donde mejor se observa es concretamente en Antolín, debido a que su Q3 está bastante alejado de la mitad (su caja es más ancha de la mitad para arriba), lo que indica una concentración de cargas altas, como se aprecia, sobre todo en el tramo que comprende [120, 145] s, donde la carga soportada es mucho mayor que en el resto de portadores, como ya se había comentado y los picos observados son de mayor amplitud.

Saúl, por su parte, tiene una caja bastante estrecha, lo que indica que las fuerzas soportadas son bastante similares (datos homogéneos y concentrados en el centro), pero, sin embargo, su máxima está muy por encima de su media de datos. Se observa en las gráficas cómo a veces parece que intenta compensar el déficit de fuerzas cargando en demasía, pero su media está un poco por debajo que el de los otros dos compañeros.

Se presenta de nuevo el gráfico de la *Figura 51* resaltando algunos datos importantes en la *Figura 56*, en la página siguiente.

Se puede observar también el principio de acción y reacción, en el momento en que el resto de portadores bajan, Antolín empieza a subir, y se ve en el círculo en rojo central de manera muy clara.

Si se observa el valle (mínimo) de Álvaro del segundo 170, como se había comentado, este cargador se encuentra portando 90 N de peso, mientras que Saúl carga unos 160 N y Antolín unos 280 N, justo el peso que dejan de cargar Álvaro y Saúl ( $170 + 90 = 260$ ) es aproximadamente lo que carga Antolín solamente.



*Figura 56. Gráfica de evolución de las fuerzas de los cargadores con detalles destacados.*

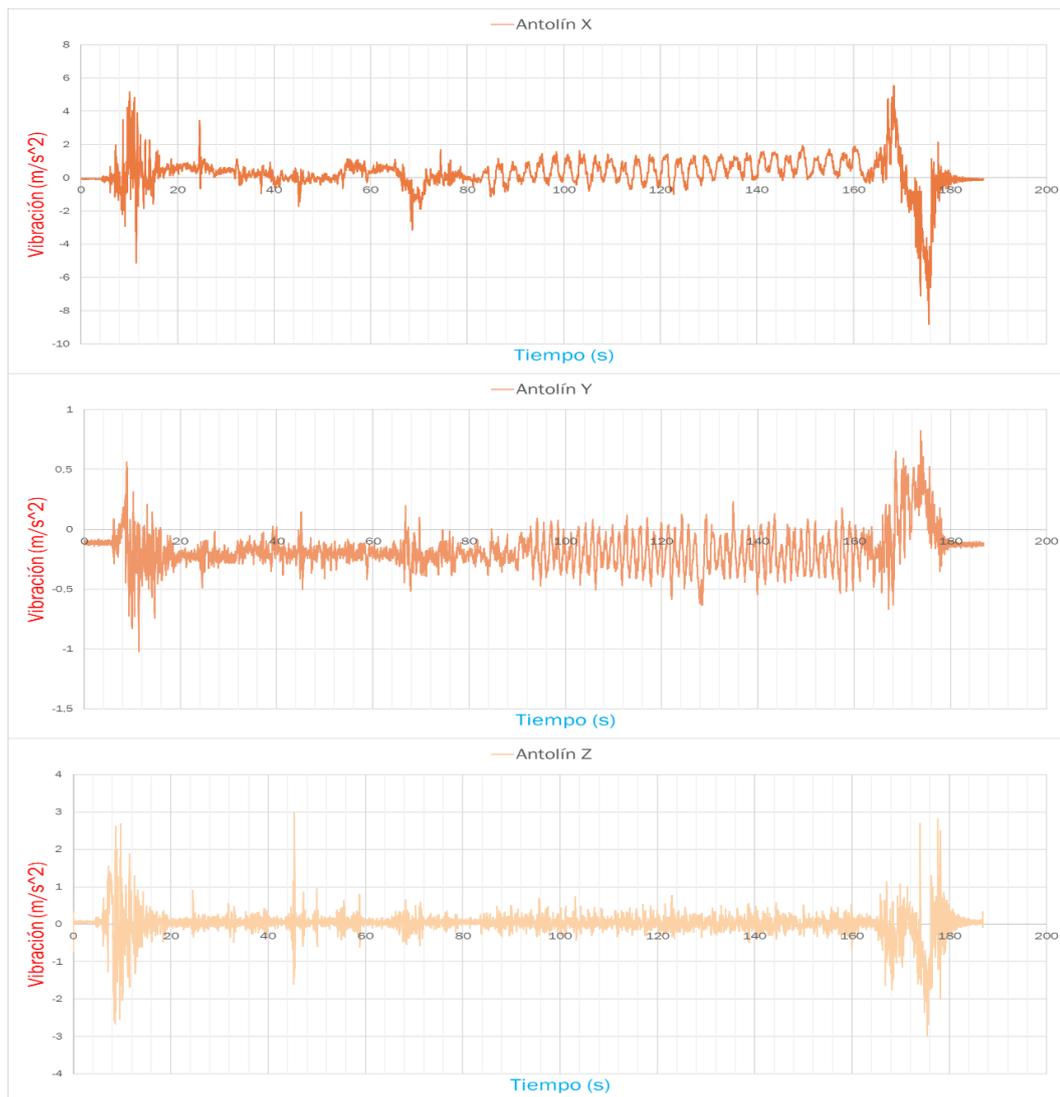
Por lo tanto, debido a que la caja de Antolín es demasiado alargada en las partes altas, se ha comprobado que hay partes en las que carga demasiado peso, que debería compensarse haciendo que Saúl pudiera cargar un mayor porcentaje de peso de las andas, dado que su media de carga es inferior, por ejemplo. En una procesión al uso, Antolín estaría más incómodo con el paso, mientras Saúl, podría seguir la procesión si tanto esfuerzo. Se necesita llegar a un compendio o aproximarse mucho, para repartir las cargas de manera equitativa.

Todos estos gráficos dan una idea bastante aproximada del grado de conformidad que los portadores podrían sentir a lo largo de una de estas marchas procesionales.

### ACELERACIONES.

Con este apartado de aceleraciones se pretende mostrar cómo evolucionan las velocidades a lo largo del tiempo del registro y conocer así el nivel de balanceo de los cargadores, además de los ejes en los que se producen más perturbaciones.

Para ello, se expondrán las gráficas de aceleración del cargador con más oscilaciones y mayor amplitud en la señal, para observar mejor los parámetros que se pretenden explicar. Bajo estas premisas, Antolín, cuyo registro está representado en la *Figura 57* va a ser el portador analizado.



*Figura 57. Gráficas de aceleración a lo largo del tiempo del registro del cargador Antolín. De arriba abajo, aceleración en X, en Y y en Z.*

Teniendo en cuenta que la dirección de avance es el eje Y, y que las oscilaciones producidas por el balanceo de los cargadores es el eje X, se observa cómo el ruido se genera sobre todo en este plano. Aumentando la amplitud para estos dos ejes.

En el eje X, se observa una marcada oscilación, dentro de lo normal, bastante regular, que corresponde claramente al movimiento de balanceo (perpendicular al movimiento lineal), producido al andar, mientras que en el eje Y se observan oscilaciones más irregulares, aunque de mayor amplitud, seguramente provocadas por el movimiento, a veces desacompañado de los hermanos de carga, que provoca una fuerza horizontal de “tira y afloja”.

Por su parte, en el eje Z, los pequeños picos son debidos a rebotes de la viga contra los apoyos a lo largo de la marcha, teniendo en cuenta que realmente

no funcionan como apoyos fijos, ya que, dentro de ellos pequeños desplazamientos, cuando uno de ellos carga más que otros, a veces, la viga se despega del apoyo, haciendo que, al volver apoyar esta con el hombro, se produzcan esas diminutas perturbaciones.

Estas gráficas, al igual que las de las fuerzas, demuestran de manera muy notable el ritmo regular producido por la marcha al compás a partir del segundo 80 hasta el 170. Antes de este intervalo, hay claras perturbaciones irregulares producidas por la colocación correcta, como se explicó, de las plantillas de uno en uno, el iniciar de la marcha, etc.

Si se comparan los tres ejes X de cada uno de los acelerómetros, se observa quién de los tres tiene el paso más marcado, con una oscilación más pronunciada y quién evoluciona siguiendo un ritmo más irregular. Para mostrar esto se representará la gráfica de la *Figura 58* acotada entre [80, 170].

Antolín es el que mayor amplitud tiene de los tres, con lo que su balanceo es más amplio que el del resto de cargadores, sin embargo, su ritmo es muy regular, lo que se puede observar en la forma de la gráfica, siguiendo una función muy similar a la sinusoidal. Por el contrario, en Saúl, por ejemplo, la función es más irregular, generando interrupciones más marcadas que lo alejan de un balanceo más “perfecto”. Aun así, el nivel de oscilaciones es menos elevado. Saúl percibe menos vibraciones en su hombro, con lo que sentirá una mayor comodidad a la hora de cargar.

Antolín es el que mayor amplitud tiene de los tres, con lo que su balanceo es más amplio que el del resto de cargadores, sin embargo, su ritmo es muy regular, lo que se puede observar en la forma de la gráfica, siguiendo una función muy similar a la sinusoidal. Por el contrario, en Saúl, por ejemplo, la función es más irregular, generando interrupciones más marcadas que lo alejan de un balanceo más “perfecto”. Aun así, el nivel de oscilaciones es menos elevado. Saúl percibe menos vibraciones en su hombro, con lo que sentirá una mayor comodidad a la hora de cargar.

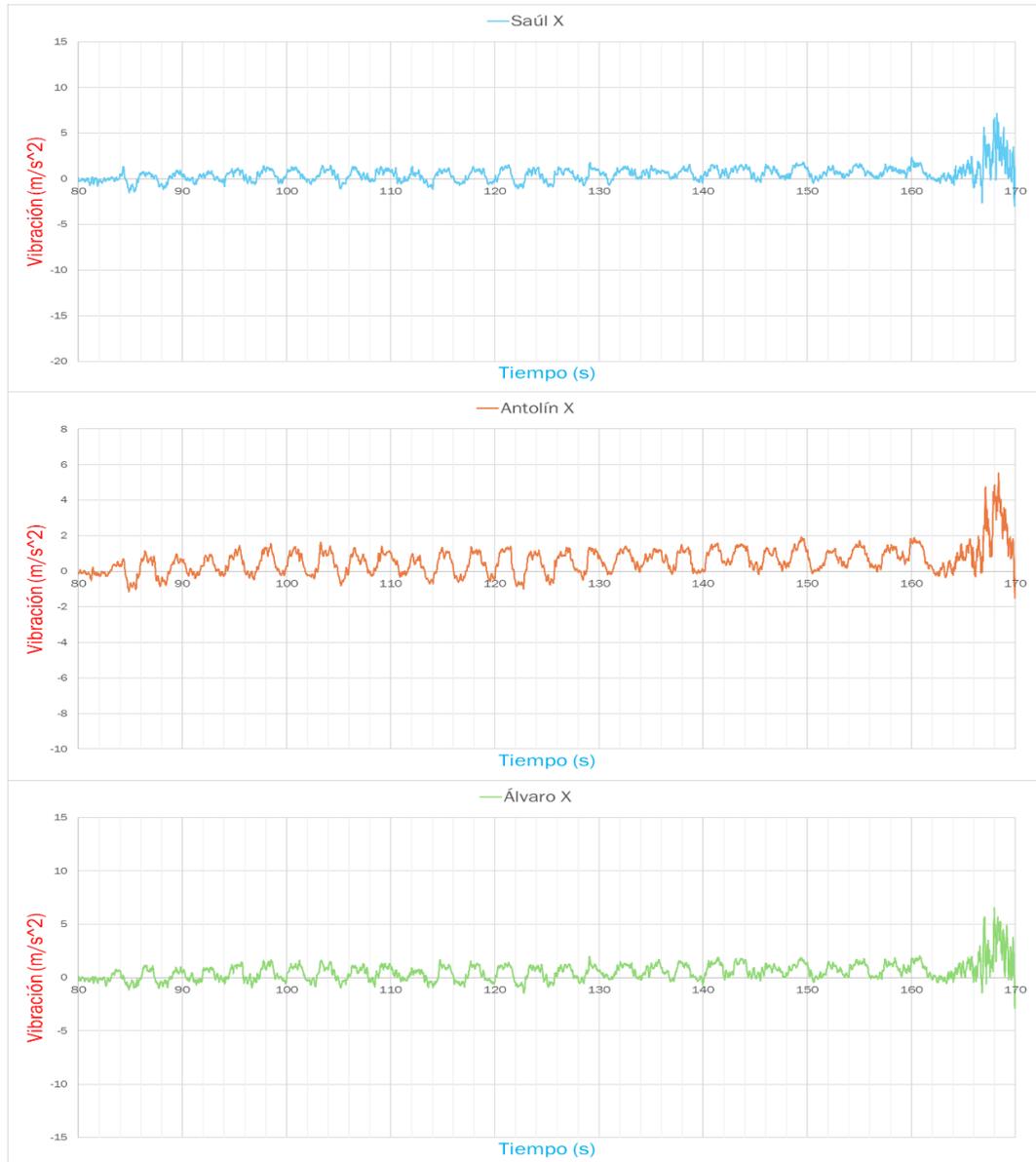


Figura 58. Gráfica de aceleraciones en X de cada uno de los cargadores acotada en [80,170].

- Análisis frecuencial del registro.

Se procede ahora a realizar un análisis frecuencial de los registros obtenidos a lo largo del tiempo por las plantillas. Mediante la Función de Transformada de Fourier se puede descomponer esta señal temporal en función de la suma de cada una de las ondas sinusoidales que la componen, cada una con su frecuencia determinada, de manera que se obtiene una gráfica que muestra, en este caso de estudio, las frecuencias de paso a las que se están moviendo cada uno de los cargadores en función de la amplitud.

De esta forma, se observa cómo a cada frecuencia de paso le corresponde una amplitud que indica la dominancia de frecuencias concretas. Es decir, si se puede encontrar una frecuencia de amplitud grande y además coincide que se da en cada uno de los diferentes cargadores, entonces esa será la frecuencia a la que los hermanos de carga están efectuando su paso.

Una foto representativa para explicar la FFT podría ser necesaria:

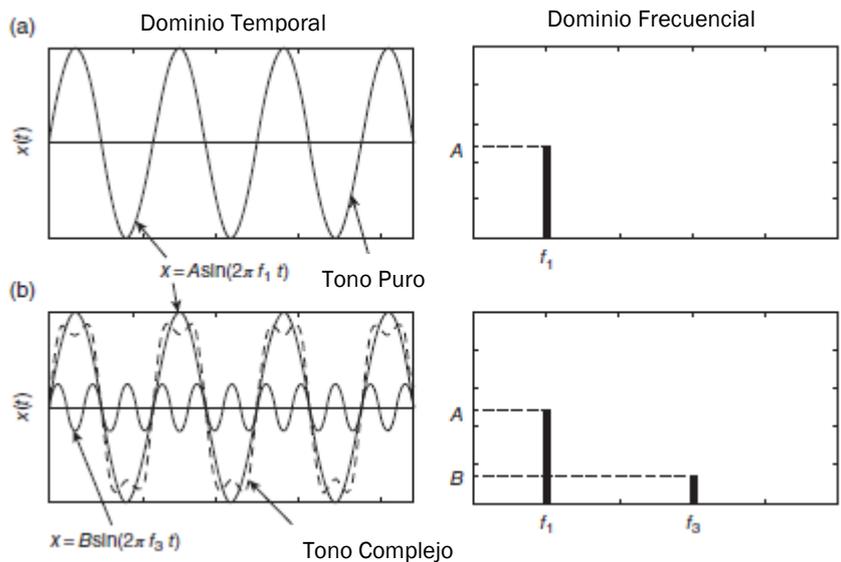


Figura 59. Representaciones en dominio del tiempo y frecuencia de (a) Tono puro y (b) Tono complejo (Malcolm & Arenas, 2021) [12]

Esto se da para una señal simple, con lo que, cuanto más complicada la señal más complicada será la representación en frecuencia. Al tratarse de una medida discreta, en la que se registran fuerzas que se recogen como una señal que es medida en muchos puntos específicos a intervalos regulares, como milisegundos; la función que se representa tiene una forma algo más compleja y continua de la que se representa en la Figura 59.

El hecho de que la FFT represente una función con amplitud alta en bajas frecuencias y se vaya atenuando según crece el eje de las abscisas, indica que las frecuencias bajas son dominantes y, por lo tanto, son aquellas que se dan de manera más marcada que el resto, siendo representativas del registro. En términos físicos, esto quiere decir que las fuerzas aplicadas tienen una variación lenta en el tiempo, con cambios graduales en lugar de fluctuaciones rápidas. Es decir, que, al ser el sentido de la marcha lento, los pasos que se dan son también lentos y por lo tanto no deberían ser representativas altas frecuencias. Se puede ver de manera clara en la Figura 60, cómo a medida que se avanza en el eje X, la amplitud de la señal tiende a cero.

Se van a estudiar las gráficas frecuenciales de cada uno de los tres portadores:



Figura 60. Gráfica frecuencial de las cargas de Álvaro, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos.

Como se ha explicado, hay predominancia a frecuencias muy bajas y se atenúa para altas frecuencias, de ahí que la gráfica sea estable en cero al final.

En el caso de Álvaro (*Figura 60*) se presentan unos picos a muy bajas frecuencias, del orden de 0,03 Hz, con amplitud alta, lo que indica que hay una predominancia grande para ese valor, lo que pasa que es una frecuencia muy pequeña y se puede suponer despreciable. Es una perturbación puntual que se da cada mucho tiempo, debido a que:

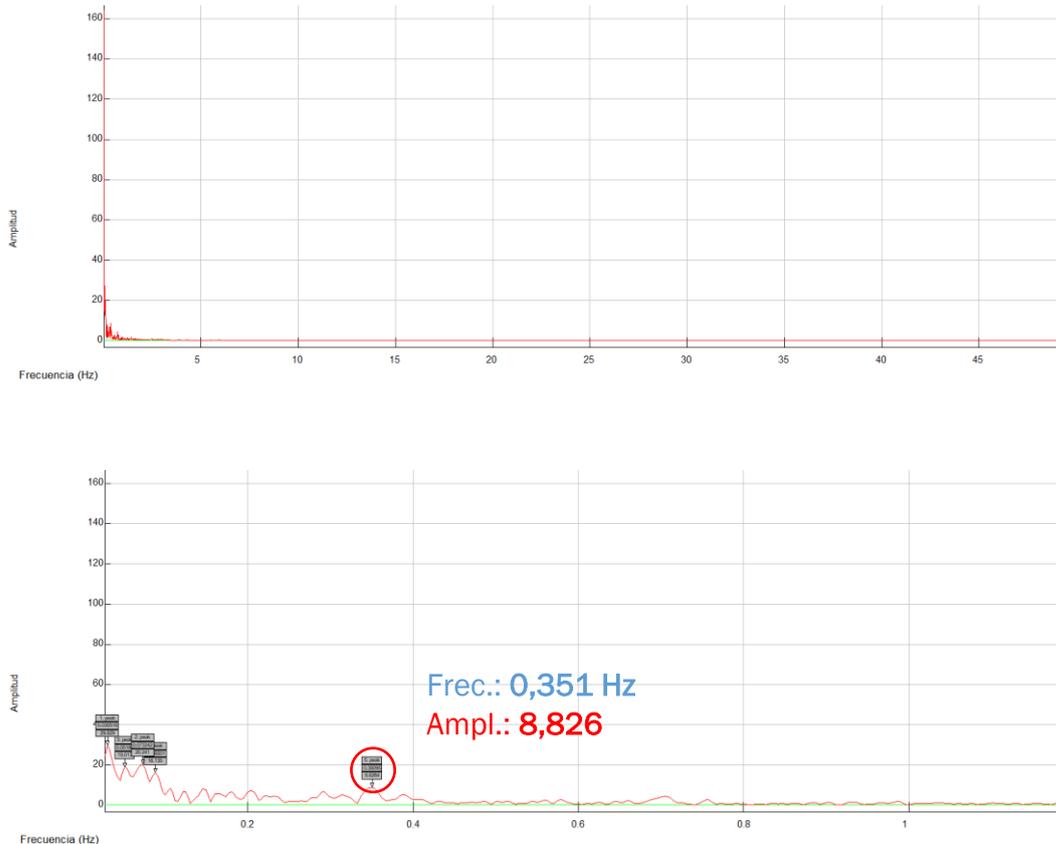
$$f(\text{Hz}) = \frac{1}{T(\text{s})}$$

Cuanto más pequeña es la frecuencia, mayor es el periodo para el que se da dicha perturbación.

Observando los demás casos, y teniendo en cuenta que la frecuencia del estudio era 0,7 Hz exactos (se utilizó un metrónomo), la frecuencia que se busca es justamente la mitad (se explicará al final de este apartado). Es decir, la “frecuencia de oro” para este estudio es de 0,350 Hz.

En este caso, ni si quiera se aproxima a esta frecuencia. La amplitud es mucho más baja y se observa que es predominante la de 0,101 Hz (su amplitud es algo más del doble de la que se da en 0,35 Hz), por lo que este portador no se mueve al ritmo del metrónomo según esta gráfica. De hecho, va mucho más lento, provocando una desestabilización en los demás portadores. O eso parece según los datos registrados en las plantillas.

Antolín, por su parte (*Figura 61*), avanza a un ritmo adecuado si se desprecian los picos de muy bajas frecuencias por lo anterior mencionado. Uno de esos picos con mayor amplitud es justo la frecuencia buscada y no se presentan otras frecuencias predominantes alrededor de esta. Este pico además es muy llamativo.



*Figura 61. Gráfica frecuencial de las cargas de Antolín, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos.*

Lo mismo ocurre con Saúl (*Figura 62*), una de sus frecuencias con mayor amplitud es la de 0,345 Hz, que está muy cerca de la buscada, por lo que también es capaz de continuar con el ritmo impuesto. Sin embargo, hay otra frecuencia predominante cerca, a 0,238 Hz, lo que significa que no en todo momento consigue continuarlo, haciendo su marcha más lenta en algunas ocasiones.



*Figura 62. Gráfica frecuencial de las cargas del Saúl, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos.*

Se expone una tabla resumen de las frecuencias de cada portador para realizar un pequeño comentario final en la siguiente *Figura 63*:

	Álvaro	Antolín	Saúl
Frecuencia (Hz)	0,101	0,351	0,345

*Figura 63. Tabla con la distribución de frecuencias de cada sujeto según las plantillas.*

Esta tabla de frecuencias, sin embargo, origina un clima de dudas. El hecho de ser únicamente tres cargadores en un único varal hace bastante difícil la

posibilidad de que uno de ellos vaya tan descoordinado con respecto a los otros dos. Lo más interesante de todo es que este cargador, Álvaro, llevaba una almohadilla que le cubría la altura restante. No solo son usadas estas espumas para calzar sino también para amortiguar. Según muestra la gráfica de la Figura 60 el valor de la amplitud para la frecuencia de 0,35 es prácticamente 0. ¿Es posible que la almohadilla haya amortiguado las vibraciones para la frecuencia de paso, o es que simplemente este cargador no sigue el paso?

Se comprueban entonces los acelerómetros en la dirección perpendicular al movimiento, (el eje X) y se observa si esta frecuencia aparece:

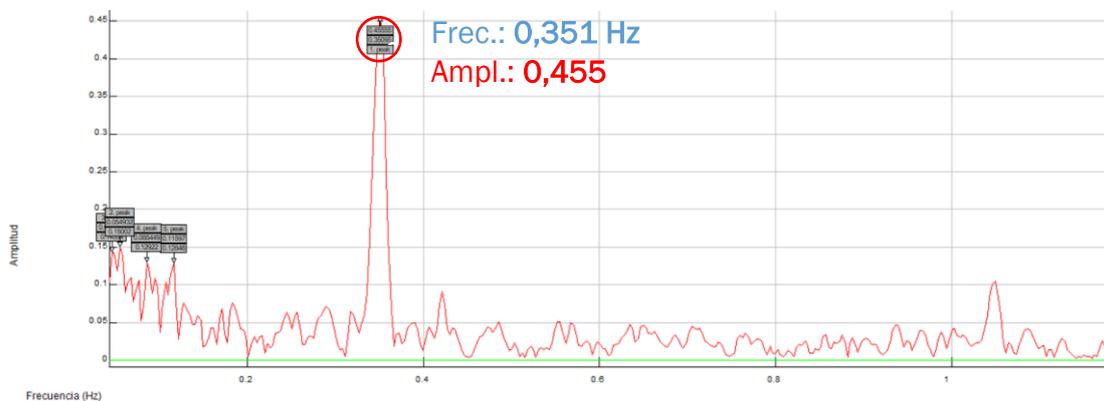


Figura 64, Gráfica frecuencial de los registros para el IMU en el eje X.

Claramente, el pico más alto es justo el buscado, como se aprecia en la Figura 64, y la relevancia es muchísimo más grande que en el resto de la gráfica, ya que no hay máximos alrededor con la misma magnitud.

Esto quiere decir que la almohadilla no sólo hace que Álvaro consiga cargar peso al nivel de sus compañeros, sino que también sirve para que el hermano de carga no perciba demasiadas vibraciones o botes que puedan ocasionarse en el camino de la procesión y lesionarlo o que produzcan una fatiga más pronta del mismo, es decir, la almohadilla absorbe las perturbaciones y estabiliza la función.

Por lo que, lo que parecía que el portador no estaba yendo a buen ritmo, resulta ser todo lo contrario. La almohadilla, si se estudia correctamente, podría ser una solución a tener en cuenta en futuras investigaciones.

Se puede comprobar que con el resto de aceleraciones en X, la frecuencia de 0,35 se encontrará también, de manera notable (Figura 65):

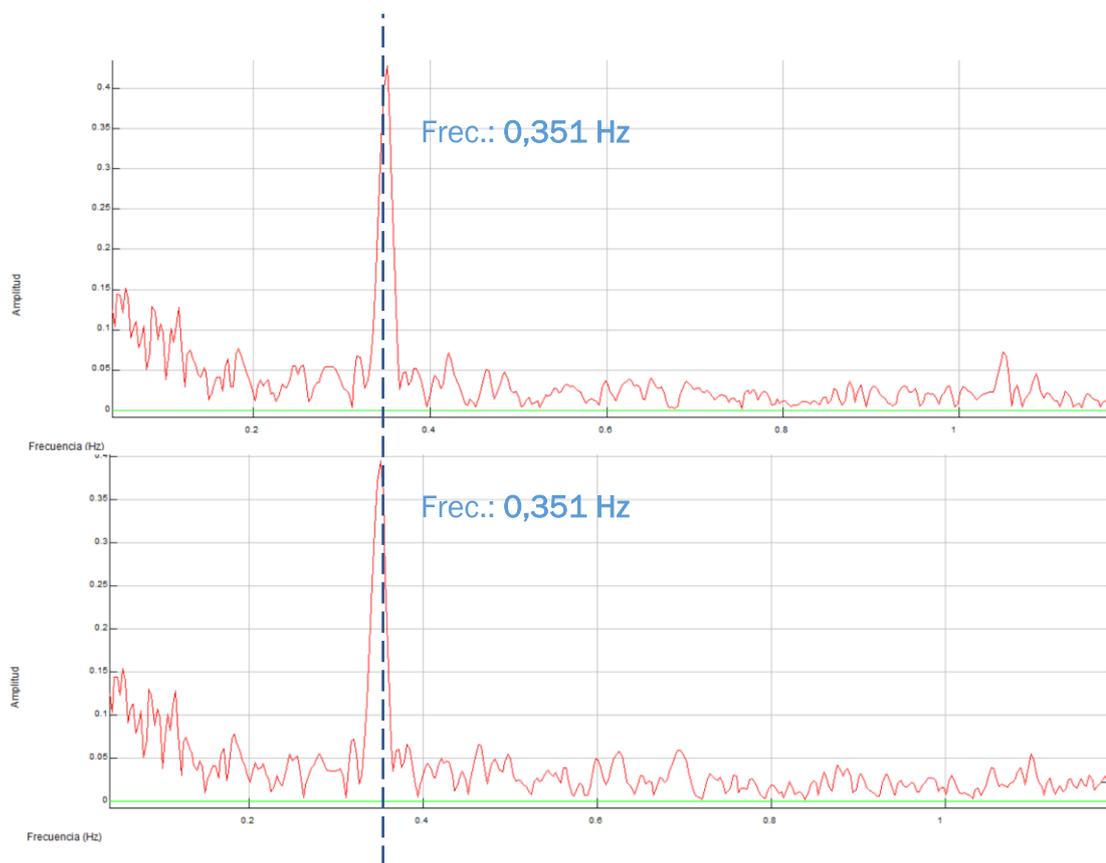


Figura 65. Arriba gráfica frecuencial de Antolín. Abajo la de Saúl.

En definitiva, la frecuencia exacta de carga es la de la *Figura 66* siguiente:

	Álvaro	Antolín	Saúl
Frecuencia (Hz)	0,351	0,351	0,351

Figura 66. Tabla de frecuencias reales y definitivas de los tres cargadores.

Claramente, los valores de 0,350 Hz están muy marcados y se demuestra que la aceleración describe de manera mucho más precisa y notoria la frecuencia de paso. Así, como se había comentado, el metrónomo marcaba 0,7 Hz por lo que justamente el doble de frecuencia no es una coincidencia, y se puede explicar sencillamente si se tiene en cuenta que la plantilla “LoadSol” registra las cargas a lo largo del tiempo con respecto a su referencia, que es el punto en el que está colocada; en este caso, el hombro. Por lo que, en lo que el hombro realiza un recorrido completo (ida y vuelta), equivale justamente el periodo que se completa tras dos pasos. Por lo tanto, cuando se dan dos pasos, para el hombro es como si solo se hubiera dado uno.

Se muestra una tabla resumen (*Figura 67*) con los datos más importantes de este primer registro:

		PORTADOR TRASERO	PORTADOR CENTRAL	PORTADOR DELANTERO	TOTAL
		Álvaro	Antolín	Saúl	SUMA
ANÁLISIS TEMPORAL	Media (N)	267,828	286,221	206,038	760,087
	Desviación Estándar	35,720	46,751	32,807	44,644
	Máximo (N)	335,171	392,836	315,718	864,536
	mínimo (N)	145,123	186,490	140,280	519,275
	% carga	35,24%	37,66%	27,11%	-
ANÁLISIS FRECUENCIAL	Frecuencia (Hz)	0,351	0,351	0,351	-
				MEDIA	0,351

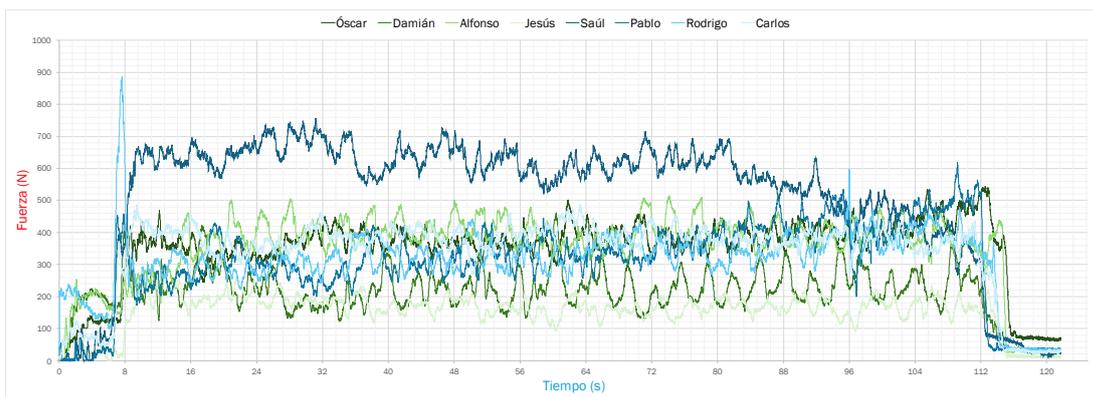
*Figura 67. Tabla resumen con todos los datos obtenidos del registro 1.*

#### 4.2.2. Registro 2. Andas reales.

- Análisis temporal del registro.  
FUERZAS.

A continuación, se describen los análisis que se desprenden de los datos recogidos por medio de gráficas y tablas que ilustrarán convenientemente las explicaciones aportadas.

En primer lugar, se muestra la tabla general con los datos de todos los cargadores a lo largo de todo el tiempo en el que se han recogido los datos del estudio en cuestión, ilustrados en la *Figura 68*.



*Figura 68. Gráfica de la carga soportada por los cargadores a lo largo del tiempo completo del registro realizado.*

Los datos, son aparentemente correctos, igual que se comentó en el apartado anterior (4.2), al comenzar en cero, debido a que en el inicio las andas se encontraban en reposo, en el suelo. Después, se producen las perturbaciones del inicio de carga, la regulación durante el caminar de los portadores y finalmente las perturbaciones últimas que indican, como se aprecia en la caída de las fuerzas soportadas, el fin del registro, volviendo a cero al ser depositadas de nuevo en el suelo.

Las plantillas han registrado de manera correcta los datos.

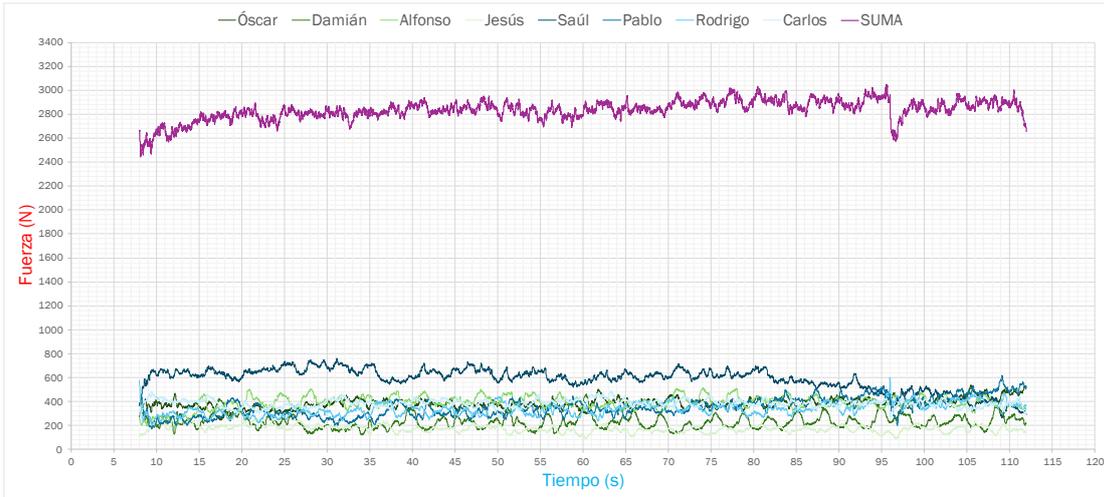
Se puede observar, además, cómo fluctúan las cargas soportadas a lo largo del tiempo por los cuatro hermanos de carga que van en la parte trasera (en tonos de verde, en orden de derecha a izquierda vistas las andas en planta: Óscar, Damián, Alfonso y Jesús), y las que soportan los cuatro de la parte delantera (en azul: Saúl, Pablo, Rodrigo y Carlos), tal y como se mostró en el apartado 3.2.

Se ilustra esta gráfica con el registro completo para visibilizar el porqué del corte entre los segundos 8 y 112 que se mostrará a continuación, (Figura 69).

Claramente, al principio y al final del registro se producen medidas anómalas que intervienen de forma desfavorable en las estadísticas obtenidas de este estudio, provocadas por el tiempo transcurrido hasta la colocación correcta del hombro (si fuera el caso de haber posicionado, ese cargador, dicho hombro de manera errónea); el hecho de que algunos portadores no han cogido el ritmo del paso o quizá por motivos de incorporación tardía de algunos hermanos al principio, entre otras causas. Y lo mismo ocurre con la descarga irregular producida por el mismo hecho al final; por ejemplo.

Se muestra entonces la gráfica general con los límites temporales establecidos en [8,112], como se ha dicho, para analizar este registro:

Se puede apreciar cómo la función que muestra los datos de la suma total de cada portador (en morado) (Figura 69), equivale, en cada punto, aproximadamente al peso medido anteriormente de la estructura de andas (se mostrará de manera más visible posteriormente en tablas). Esto indica que los datos registrados son aceptables y válidos para su análisis, es decir, tienen coherencia con la realidad.



*Figura 69. Gráfica de la carga soportada por todos los cargadores (delanteros y traseros), acotada en [8,112]. Se incluye resultante de todas las fuerzas llamada “SUMA”.*

De esta manera, se observa claramente la distribución de peso en la estructura, denotando, como podrá apreciar el lector, que el que más peso sostiene es el hermano de carga Saúl.

En puntos posteriores se demostrará la coherencia de este dato. Dado que Saúl es la persona más alta de la cuadrilla, es lógico pensar que se está llevando la mayor parte de la carga, lo cual se refleja en los resultados.

Hay que indicar que el estudio se realizó buscando una variedad de personas con diferentes alturas para intentar simular en un estudio, en el que solo se poseen ocho plantillas, cómo podría comportarse este reparto de cargas en una procesión de verdad, en la que se tienen diversas alturas difíciles de cuadrar para conseguir un reparto uniforme del peso. Cargando así a unas personas más que a otras, lo cual se pretende reflejar y analizar en este estudio

Se puede ejemplificar el estudio solamente con los hermanos que cargan en la parte trasera, según la *Figura 70*, en la página siguiente:

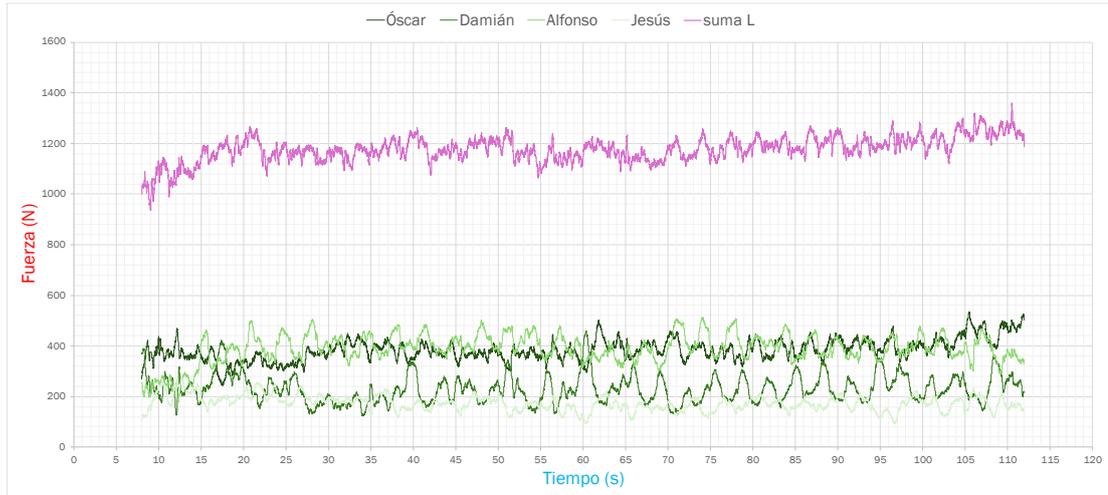


Figura 70. Gráfica de la carga soportada por los hermanos de carga de la parte trasera que llevan las plantillas "LX". Se añade la resultante de las fuerzas que ejercen en la vanguardia de la estructura llamada "Suma L".

En este caso, la resultante de las fuerzas de los hermanos de la parte trasera suma en torno a 1100 N. Y de igual manera, con los hermanos que cargan en la parte delantera (Figura 71):

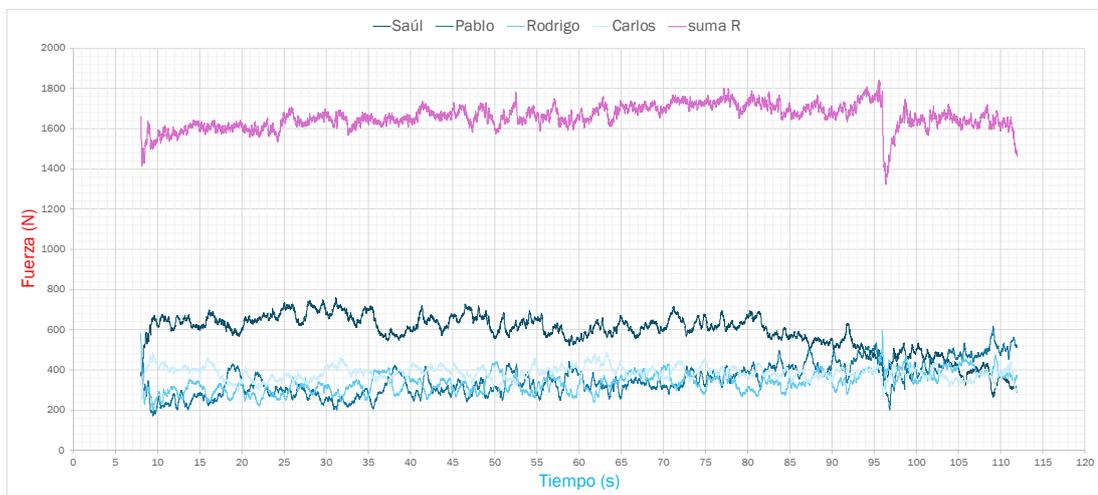


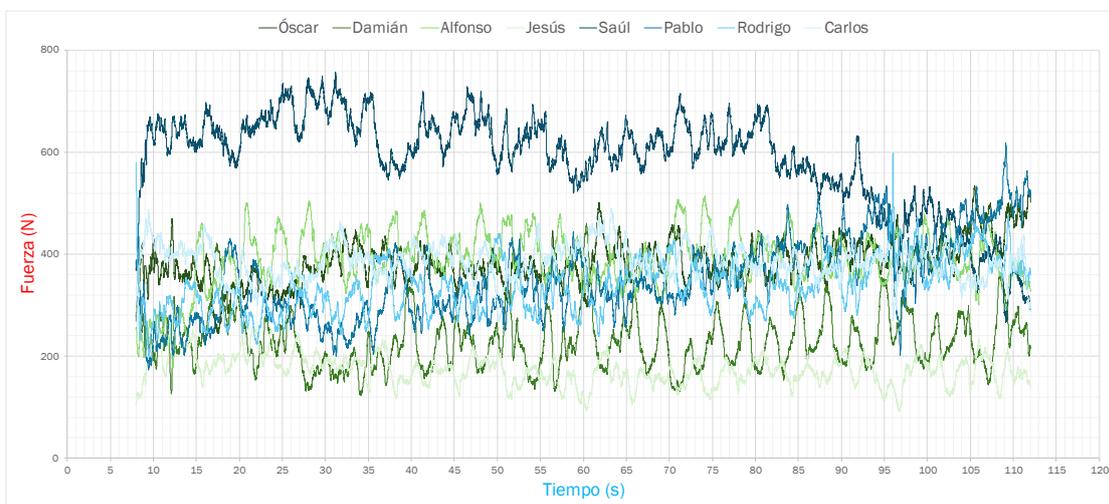
Figura 71. Gráfica de la carga soportada por los hermanos de carga de la parte delantera que llevan las plantillas "RX". Se añade la resultante de las fuerzas que ejercen en la vanguardia de la estructura llamada "Suma R".

La suma de los hermanos de la parte delantera resulta ser en torno a 1600 N. Que junto con los hermanos en la vanguardia suman un total de en torno a 2800 N que es aproximadamente el peso que se obtuvo de la estructura.

Gracias a estos datos se puede ver también que la parte delantera está más cargada que la trasera, alrededor de 500 Newtons de demasía. También cabe destacar que los portadores delanteros eran del orden de 10 cm de media más altos que los traseros, con lo que soportan más carga, debido a lo explicado en el apartado 3.3.1. y que se explicará con mayor detenimiento en las conclusiones.

Este podría ser un ejemplo claro de una distribución irregular de cargas entre los portadores que podrían provocar fatigas o lesiones. Las cuales conllevarían a un desarrollo anormal y agri dulce de la procesión.

En la [Figura 72](#), se muestran los datos de las fuerzas sin la suma total para ver con mayor claridad la gráfica acotada:



*Figura 72. Gráfica de la carga soportada por todos los cargadores (delanteros y traseros), acotada en [8,112].*

Se pueden ordenar los portadores de mayor carga soportada a menor carga, siendo Saúl el primero de la lista, seguido de Alfonso, Carlos, Óscar, Pablo, Rodrigo, Damián y el que menos carga, Jesús.

Si se exponen estos resultados por medio de un histograma, como en la [Figura 73](#) se observa claramente la repartición de las cargas:

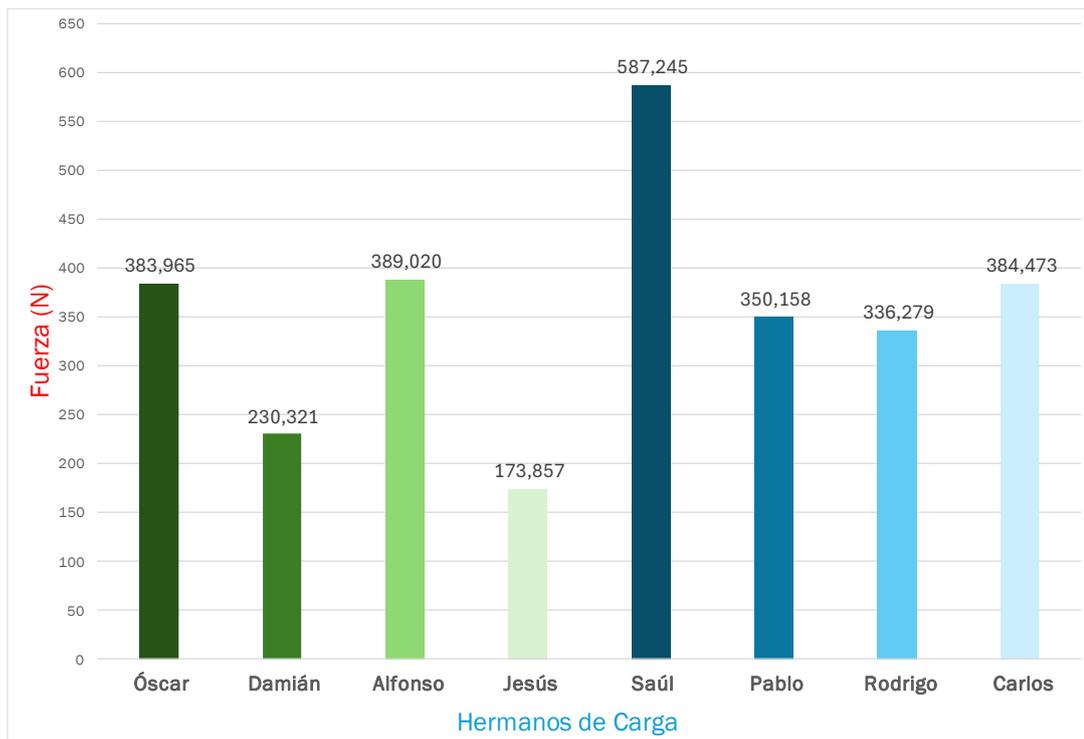
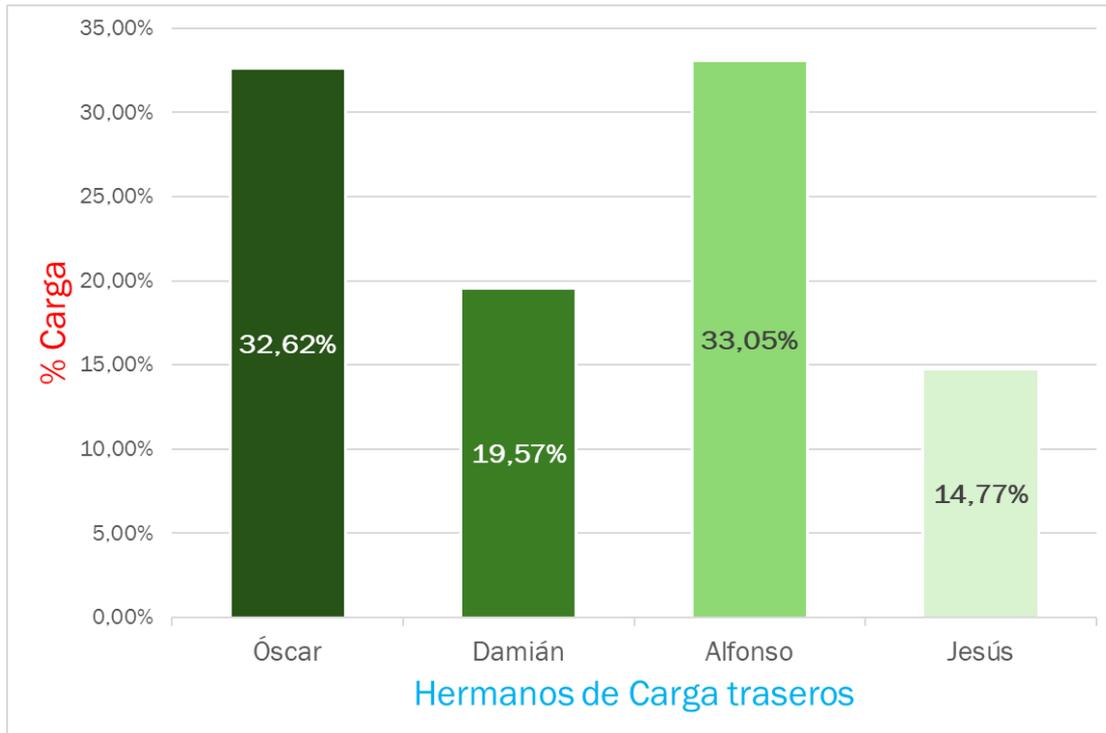


Figura 73. Gráfica de la carga media soportada por cada hermano de carga.

Este hecho no debería producirse bajo ningún concepto en el desarrollo de una procesión. Concretamente hay una diferencia muy clara entre el hermano más y los dos menos cargados que podrían situarse fuera de la normal. El resto siguen aproximadamente un peso usual y aceptable. Hay que tener en cuenta que habitualmente no hay solamente ocho cargadores debajo de unas andas, sino que son 32. Por lo que los resultados de las fuerzas son algo exagerados para que una sola persona cargue durante 4 h (lo que sería un recorrido de media), pero sirven para ilustrar los objetivos.

También se puede mostrar más claramente el porcentaje de carga que soportan los hermanos por medio de gráficos de barras. Así, proponiendo una visualización por zonas:



*Figura 74. Porcentaje de carga soportado por cada hermano de carga de la parte posterior de la estructura en relación a la carga total trasera.*

En la parte de atrás (*Figura 74*), los portadores más cargados son claramente Óscar y Alfonso, que soportan entre ambos de manera similar el 60% del peso de la estructura. Mientras que Damián y Jesús apenas sostienen entre los dos el 35%. Esto, por unos motivos u otros, hace que el peso no esté repartido por igual y por tanto habrá dos hermanos que tendrán más dificultades para continuar con el ritmo impuesto.

En la parte de delante, exceptuando el caso particular de Saúl (*Figura 75*), los otros tres portadores cargan un porcentaje similar, sumando entre los tres en torno al 65%, haciendo que éste cargue con un 15% más que el resto, al igual que los compañeros traseros, que cargan en torno al 33% (con respecto a sus compañeros traseros) (*Figura 74*). Y, por lo tanto, también tendrá dificultades para soportar la marcha normal.

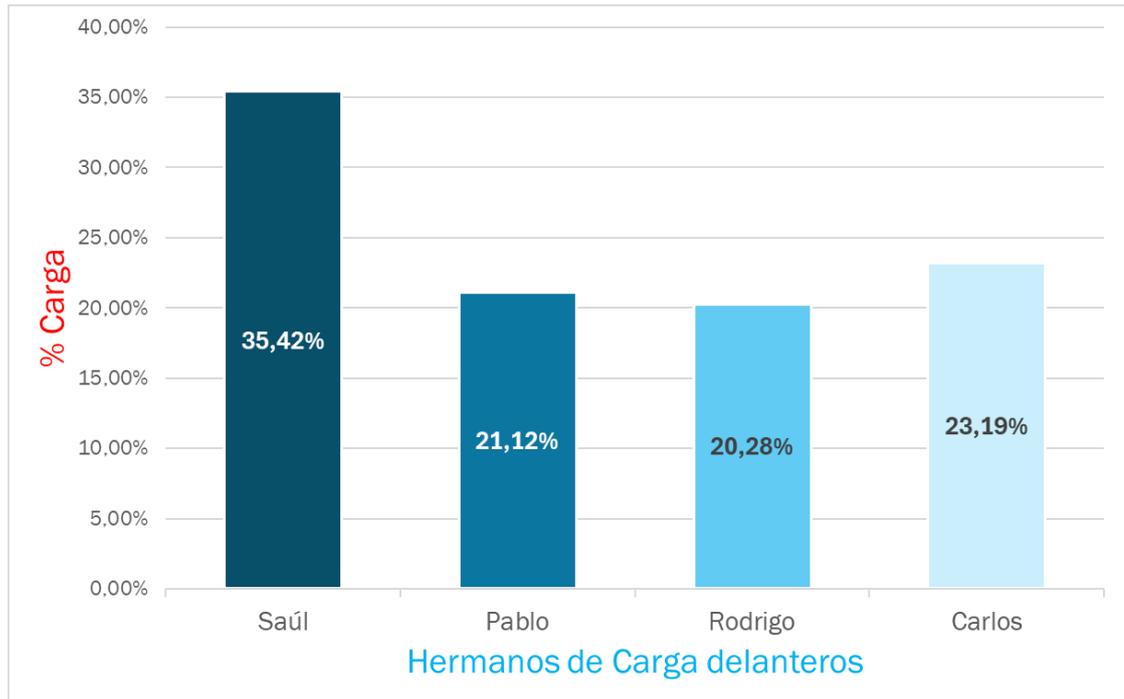


Figura 75. Porcentaje de carga soportado por cada hermano de carga de la parte anterior de la estructura en relación a la carga total delantera.

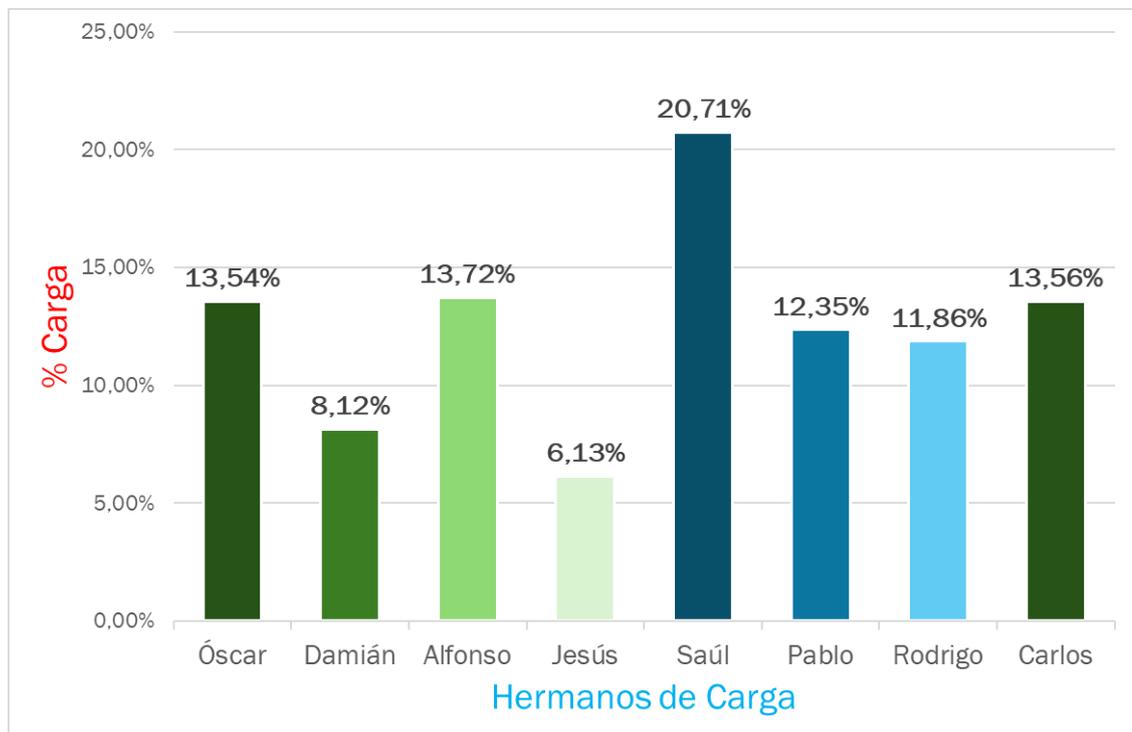
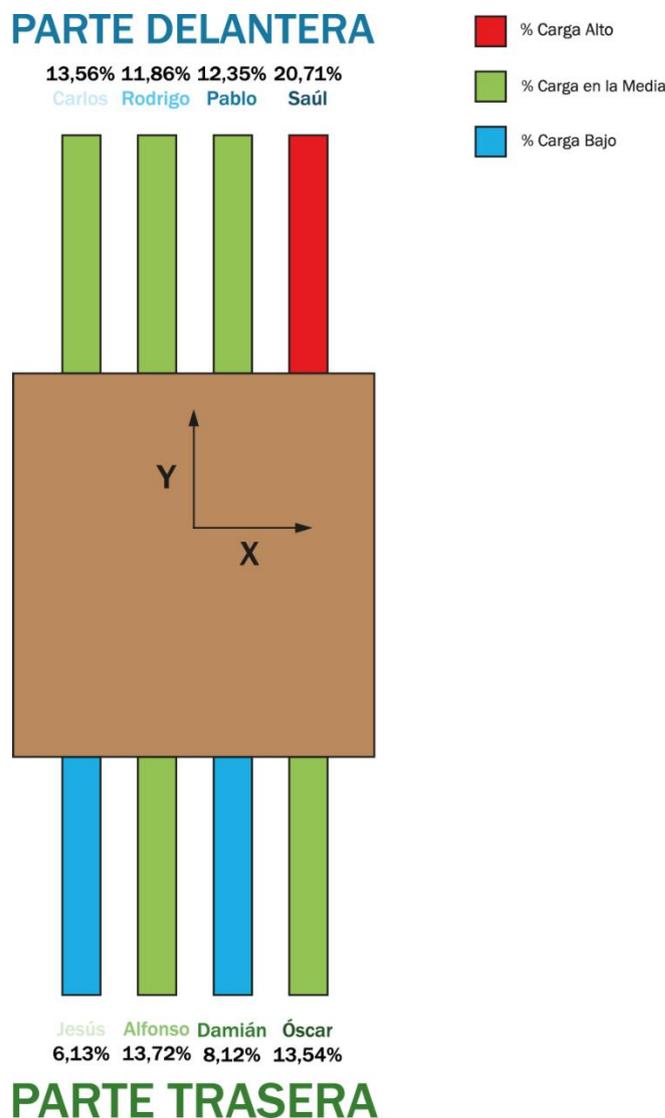


Figura 76. Porcentaje de carga soportado por cada uno de los hermanos de carga que componen la estructura en relación a la carga total.

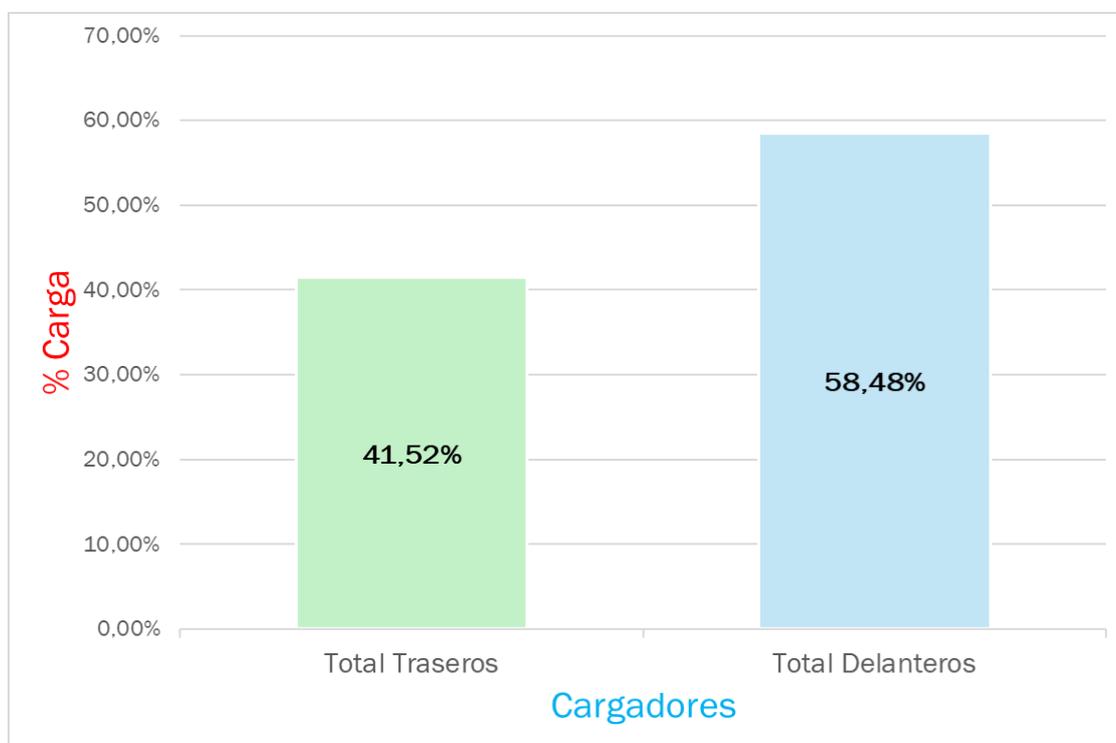
Si se habla de porcentajes individuales con respecto a toda la cuadrilla (*Figura 76*), indistintamente de si se encuentran delante o detrás, teniendo en cuenta que una carga repartida implicaría que cada hermano debería portar un 12,5% del peso total de la estructura; el hermano más cargado se encuentra soportando un 8.21% de demasía, y el menos cargado, con un déficit de 6.37 %. De esta manera, entre el menos y el más cargado hay una diferencia de un 14.58%; lo que implica el peso que debería cargar una sola persona (12,5%) más un 3% extra solamente de diferencia. (Evidentemente, como ya se ha comentado, es tan solo una prueba de concepto y no son unos registros que deberían darse de manera habitual si se registrara una procesión).



*Figura 77. Croquis con el reparto de cargas en cada varal con el porcentaje de carga sobre el total de cada uno de los hermanos.*

Se aprecia que hay un claro reparto en una proporción aproximada de dos a dos para la parte trasera, soportando porcentajes similares Damián y Jesús con un 7,125% de media y por otra parte Óscar y Alfonso con un 13,63% (estos dos apenas tienen una diferencia notable), estando ambos en posiciones alternas como se puede ver en la *Figura 77*. Y además es curioso que sostienen también el mismo porcentaje con los tres cargadores delanteros que no son Saúl, cuya media es 12.59%, resultando en total estos cinco, una media de 13%.

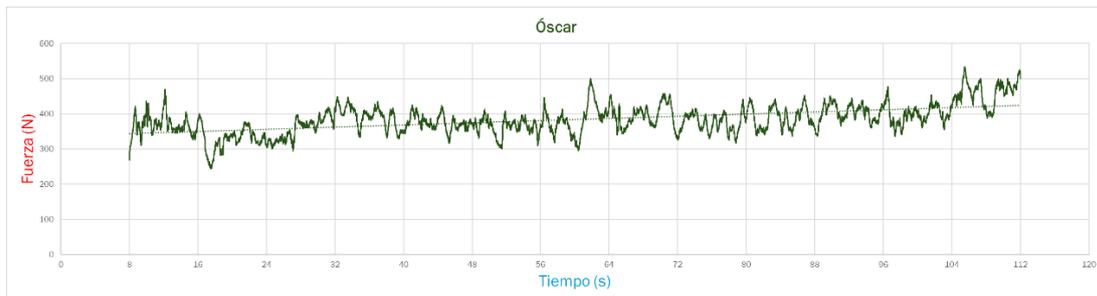
En definitiva, los hermanos de carga Óscar, Alfonso, Pablo, Rodrigo y Carlos están aproximadamente en la media ideal de 12.5% desviándose cada uno de ellos en apenas un 1%, mientras que los otros tres se encuentran fuera de los valores típicos.



*Figura 78. Porcentaje de carga soportado por los hermanos delanteros vs los hermanos traseros.*

Finalmente, se puede ver en la *Figura 78* cómo la parte delantera soporta un 16.96% más de peso que la trasera y esto probablemente se deba al desfase de altura provocado principalmente por el hermano Saúl, el hermano más alto de todo el equipo.

Si se profundiza en el estudio y se expone de manera más clara la gráfica de las fuerzas a lo largo del tiempo de cada uno de los hermanos de carga se obtiene lo siguiente; (teniendo en cuenta que se muestra cada portador con su tendencia lineal, la cual demuestra la relación existente entre las cargas y el tiempo transcurrido que como se apreciará, varía en función de la persona):



*Figura 79. Gráfica de la fuerza (N) soportada por Óscar a lo largo del ensayo.*

En el caso de Óscar, mostrado en la *Figura 79*, que es del grupo de los traseros, es capaz de soportar en torno a 380 N aproximadamente de forma constante a lo largo del tiempo. Como la línea de tendencia es bastante plana indica que no hay mucha relación entre el tiempo transcurrido y la fuerza con la que los portadores empujan la estructura verticalmente y hacia arriba, lo que sería el “eje Z”, propiamente dicho.

Es difícil encontrar, para un registro tan corto, la relación exacta entre estas dos variables, que, de estar relacionadas, tendría sentido argumentar: cuanto mayor sea el tiempo que una persona está realizando un ejercicio, menor es la fuerza con la que podrá resistir el peso de la estructura, por motivos de cansancio, pérdida de energía y/o por el estado anímico de motivación. Es decir, debido al desgaste mental y físico de la persona.

Como suele ocurrir en una procesión, se generan altibajos en estas relaciones, dependiendo de la voluntad del hermano y el momento en el que se encuentre.

En este caso, dicha tendencia es ligeramente positiva, con lo que hay una relación proporcional entre el tiempo que pasa y la fuerza que ejerce Óscar, de tal manera que termina soportando un peso mayor que al principio del registro. Se podría decir que ha aumentado su resistencia, cogiendo fuerzas y/o motivación o que en el transcurso del registro otros hermanos no cargan de igual manera que al principio, aliviando ese peso de sí mismos consciente o inconscientemente que, inmediatamente, se reparte cargando más a Óscar.



Figura 80. Gráfica de la fuerza (N) soportada por Damián a lo largo del ensayo.

Damián (Figura 80), por su parte, tiene una tendencia bastante estable en todo el registro (luego se hablará de los picos elevados, es decir, del ruido), cargando aproximadamente 230 N y manteniendo ese empuje desde el principio hasta el final.

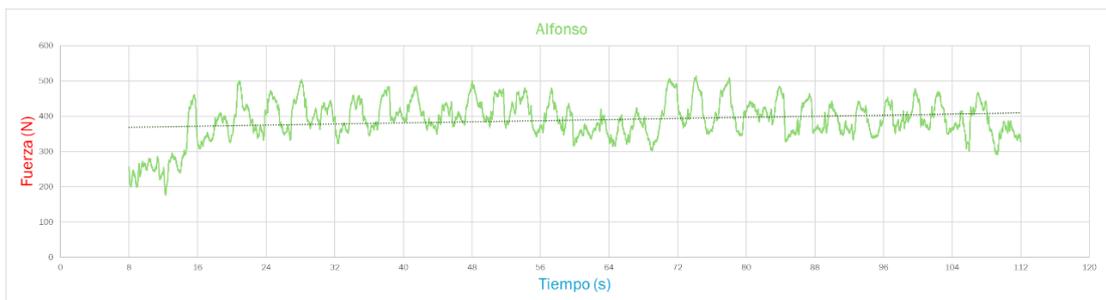


Figura 81. Gráfica de la fuerza (N) soportada por Alfonso a lo largo del ensayo.

Alfonso (Figura 81) se encuentra en los 390 N y tiene una evolución parecida a la de Óscar. Es decir, carga uniformemente durante el ensayo.

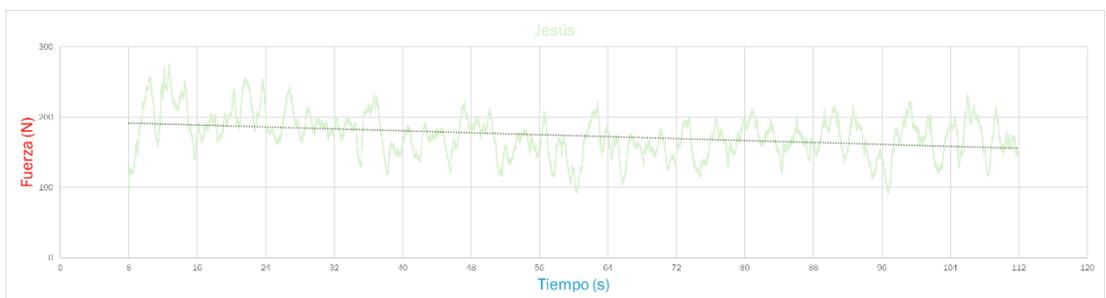


Figura 82. Gráfica de la fuerza (N) soportada por Jesús a lo largo del ensayo.

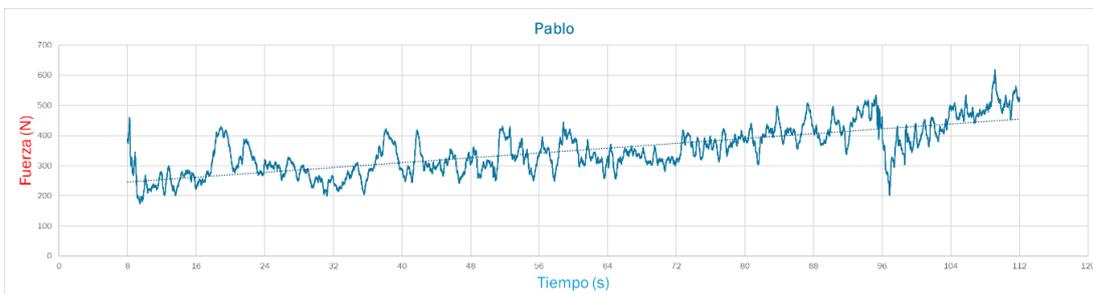
Jesús, al contrario que sus compañeros traseros, se encuentra en una franja inferior de fuerzas, en torno a 170 N, que, además, en este caso, la tendencia de la [Figura 82](#) muestra una proporción inversa entre el tiempo y la fuerza ejercida. A medida que pasa el tiempo, tiene mayores dificultades para cargar con el peso. Lo que hace que esa carga que “libera” se reparta, provocando un incremento del peso que sostienen otros hermanos.

Y de ahí la diferencia que se explicaba con Óscar entre el principio y el final del registro, por ejemplo, en la [Figura 79](#).



*Figura 83. Gráfica de la fuerza (N) soportada por Saúl a lo largo del ensayo.*

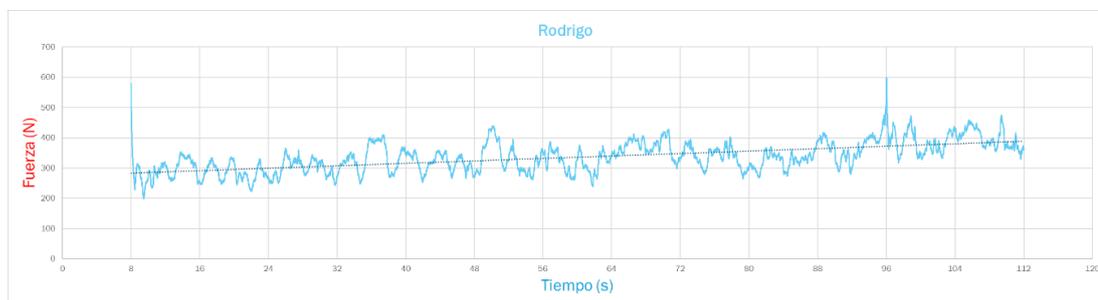
Saúl ([Figura 83](#)), se encuentra en torno a 590 N, lo que le hace el hermano que más peso soporta, pero, al estar tan cargado y muy por encima de la media, hace que su tendencia sea bastante negativa llegando al final del ensayo a caer en picado los últimos 20 s hasta un peso soportado de unos 350 N. Peso que, como se ha dicho anteriormente, se repartirá y pasará a ser cargado por el resto de compañeros, como se demuestra en concordancia con el resto de gráficas.



*Figura 84. Gráfica de la fuerza (N) soportada por Pablo a lo largo del ensayo.*

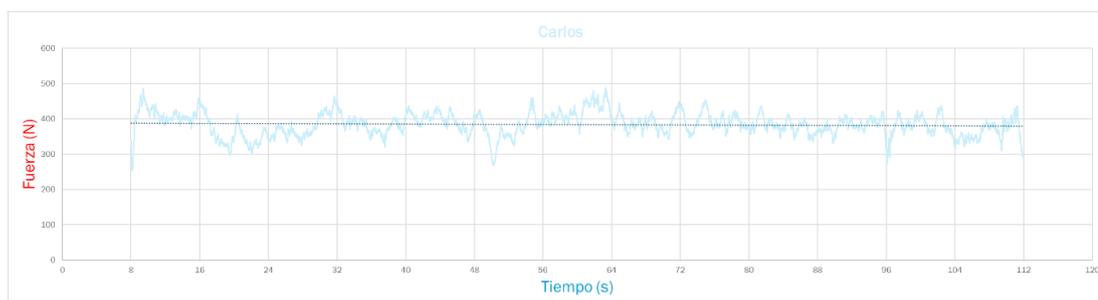
Pablo se sitúa en los 350 N en la [Figura 84](#) y su tendencia es muy positiva. Claramente está soportando en los últimos 20 s una parte importante del peso

decreciente cargado por Saúl (*Figura 83*), entre otros. Situándose casi en los 550 N al final del ensayo.



*Figura 85. Gráfica de la fuerza (N) soportada por Rodrigo a lo largo del ensayo.*

Rodrigo (*Figura 85*) carga unos 340 N de media y se ve cómo su evolución es también algo positiva. Soporta más peso al final del registro que al principio.



*Figura 86. Gráfica de la fuerza (N) soportada por Carlos a lo largo del ensayo.*

Por último, en la *Figura 86*, Carlos sostiene un peso aproximado de 390 N que carga uniformemente a lo largo de todo el ensayo, teniendo la línea de tendencia más plana de todos los compañeros de carga. Lo que significa que el peso que soporta a lo largo de todo el registro es prácticamente constante. Esto podría indicar que Carlos se encuentra en una posición cómoda y sostiene el peso en las mismas condiciones desde el principio hasta el final.

Se procede pues, a estudiar los datos obtenidos del diagrama de bigotes, reflejados en la *Figura 87*. En esta gráfica, se puede ver cómo se distribuyen los datos registrados, los cuales se pueden resumir en la tabla de la *Figura 88* que se expone a continuación:

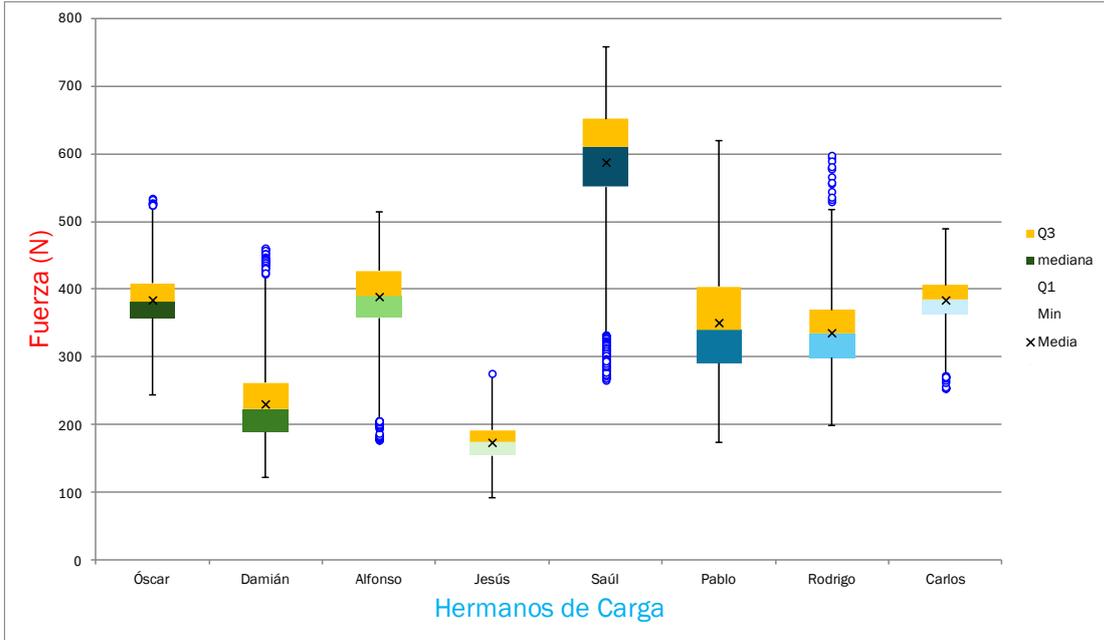


Figura 87. Diagrama de “Cajas y Bigotes” de la distribución de los datos de las andas.

	Óscar	Damián	Alfonso	Jesús	Saúl	Pablo	Rodrigo	Carlos
mínimo	244,067	122,803	177,280	91,996	266,204	173,197	198,559	253,536
Q1	356,668	189,400	358,142	153,930	551,446	290,500	298,376	363,972
mediana	381,475	223,498	389,648	173,725	609,596	339,238	334,085	384,356
Q3	408,456	261,954	427,349	192,000	651,347	403,564	369,072	405,916
Máximo	521,672	421,260	514,000	273,800	757,300	619,200	517,632	489,200
Media	383,965	230,321	389,020	173,857	587,245	350,158	336,279	384,473
Desviación Estándar	42,323	54,597	56,440	30,070	92,834	78,616	49,799	32,853

Figura 88. Tabla resumen de los diferentes datos estadísticos obtenidos del diagrama de “Cajas y Bigotes” de las andas.

Como ya se explicó, cuanto mayor es la caja, mayor dispersión de los datos.

Así se puede ver en el caso de Saúl, por ejemplo, cuya desviación estándar además es la mayor de todas, lo que significa que el registro del peso soportado a lo largo del ensayo no es uniforme, teniendo una gran diferencia entre ellos. A mayores, tiene uno de los mínimos más bajos de todo el registro en comparación con su media, lo que indica, como ya se demostró con la línea de tendencia de la Figura 83, que el peso soportado va disminuyendo con el tiempo. No obstante, al haber tenido que sostener un peso tan elevado a lo largo del ensayo, es normal que baje hasta el rango de los 300 N hacia el final, teniendo en cuenta que es la media que deberían portar cada uno de los hermanos.

Así se demuestra también la gran diferencia entre la media y la mediana, al contrario que otros cargadores cuyos valores coinciden. En este caso, la media está por debajo de la mediana, lo que quiere decir que hay valores con mayor heterogeneidad en la parte de cargas bajas soportadas por este hermano de carga.

Por otro lado, Pablo tiene lo contrario a Saúl, una dispersión mayor de los datos en cargas altas, haciendo que el rango mediana-Q3 se alargue hacia arriba, teniendo uno de los valores máximos más grandes en comparación con su media. De esta forma, hay datos de cargas altas registradas, que se alejan mucho del valor central. Esto es una clara representación de lo que ocurre en la *Figura 84*. Así, su desviación estándar también es alta.

Hay una explicación física sencilla para estos datos tan variables entre estos dos cargadores, por ejemplo, y es que el peso que libera Saúl al final del ensayo es probablemente cargado por Pablo para compensar este desequilibrio en las cargas de la estructura.

En otros casos como los apreciados en Carlos o Jesús, la caja, además de ser estrecha, tiene la media y la mediana colocadas aproximadamente en la misma posición, lo que pone a disposición el hecho de que estos dos cargadores mantienen un peso muy uniforme a lo largo del registro, teniendo datos muy concentrados alrededor del centro, sin cargas muy sobresalientes tanto hacia arriba (cargas muy altas en comparación a su media), como hacia abajo (cargas muy bajas).

En definitiva, cuanto más concentrada esté la caja de cada uno de los hermanos, mejor mantienen el peso a lo largo de una procesión y significa que han aguantado uniformemente sin muchos cambios el ritmo de la misma. Por lo tanto, al no haber picos muy alejados de su rango central quiere decir que se han encontrado cómodos a lo largo de todo el camino, sin haber tenido periodos de mucho sufrimiento o de mucho alivio. Lo contrario, incurriría en una desestabilización de las cargas que provocaría un estado de “discomfort” en el estado general de la cuadrilla.

Se estudiarán, por último, los datos atípicos o “outliers” observados en el gráfico y se compararán con los compañeros que los tengan más elevados. Posteriormente, se hará una comparación general.

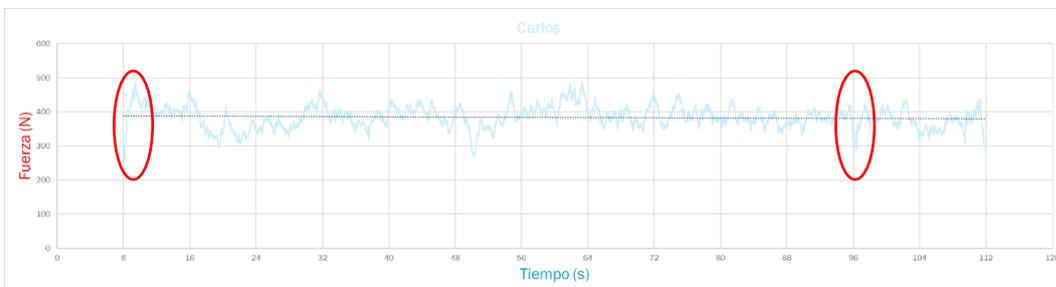
En el caso de Rodrigo hay una concentración de “outliers” por encima de su valor máximo que indican que, aunque 517 N es el valor máximo dentro del rango principal de los datos, hay varias observaciones que son significativamente mayores a este valor. Esto sugiere que hay una variabilidad extrema en las fuerzas soportadas por Rodrigo. Es decir, se han dado dentro de su registro de fuerzas, eventos poco comunes pero reales, donde ha

soportado fuerzas muy superiores a la media, lo que indica que hay picos de fuerza que Rodrigo ha soportado en ciertas ocasiones. De hecho, esto se puede ver si se vuelve a exponer su gráfica, destacando dichos picos que se desvían de su media, como en la *Figura 89*:



*Figura 89. Indicación de picos de fuerza y otras anomalías registradas en Rodrigo.*

Por el contrario, si se recuerda la gráfica de Carlos, se demuestra todo lo anterior, denotando cómo ahora los datos se encuentran más concentrados alrededor de la línea media (*Figura 90*). Y, a mayores, no se perciben picos tan elevados para esos puntos, por ejemplo; aunque tampoco de manera general:



*Figura 90. Indicación de picos de fuerza y otras anomalías registradas en Carlos.*

Lo que sí se observa, por otro lado, es el efecto de acción y reacción que se explica a continuación. Cuando en el segundo 8 Rodrigo aumenta repentinamente la carga, es porque compensa la fuerza de otro cargador, como puede ser Carlos, y lo mismo para el 96, entre otros.

Por lo que se puede demostrar de manera clara y concisa este principio percibido debajo del paso.

Así, siempre que uno de los portadores experimenta un pico de fuerza, entonces, otro en el mismo segundo o en las inmediaciones de ese instante, experimenta un valle para el mismo tiempo en la gráfica.

Se ve perfectamente en el caso del hermano más cargado (*Figura 91*), cuyas cargas soportadas a lo largo del trayecto varían de manera más ejemplar:



*Figura 91. Indicación de picos de fuerza y otras anomalías registradas en Saúl.*

Se pueden ver con mayor profundidad estos dos instantes de tiempo para estos tres casos comparados, como se puede apreciar en la *Figura 92* por tener la mayor concentración de datos atípicos según el diagrama de la *Figura 87*.

Son dos picos muy claros que demuestran lo anterior. Como se puede apreciar, para el segundo 8, cuando Rodrigo genera un pico, dicho pico de fuerza es compensado por Saúl y Carlos, cuya suma ( $375+253=628$ ), es aproximadamente la sobrecarga de Rodrigo (566 N), y lo mismo ocurre para el segundo 96, cuando las depresiones de Saúl y Carlos vuelven a sumar aproximadamente el peso que carga Rodrigo en demasía ( $318+270=588$ ). En este caso es bastante preciso.

En definitiva, cuando por un motivo concreto, dos de los hermanos descargan parte de su peso, otro de los portadores experimenta un aumento, en estos casos notable, del peso que soporta. Por lo que los valores atípicos ofrecen información importante para el confort general en las andas.

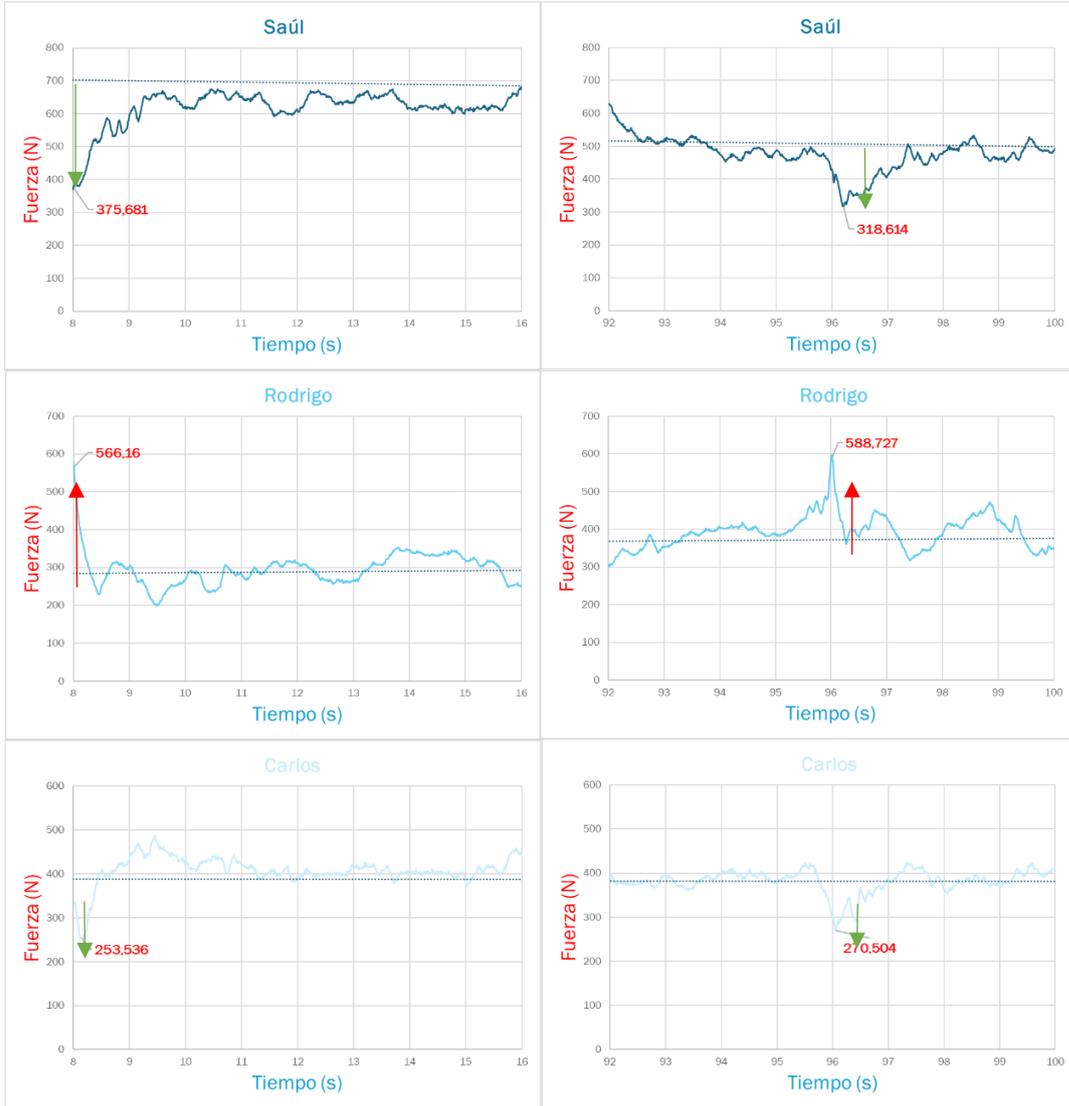


Figura 92. Comparativa entre las gráficas de Saúl, Rodrigo y Carlos para los tiempos mencionados de 8 segundos a la izquierda y 96 a la derecha.

En la parte trasera, otro caso con valores bastante atípicos, que se alejan de la mediana son los de Damián (Figura 93), que tiene un pico específicamente alto:

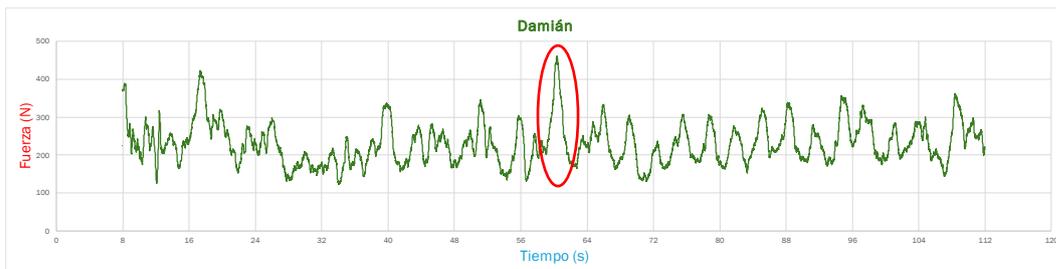


Figura 93. Indicación de picos de fuerza y otras anomalías registradas en Saúl.

Y lo mismo ocurre con otros cargadores y para otros casos. Si además se ponen el resto en común para observar estas anomalías, tal y como se indica con sendas rectas a trazos en la *Figura 94*, se puede observar, así, de manera genérica que, para el instante de tiempo 8 s, Saúl y Carlos se encuentran descargados, como ya se había comentado, mientras que Damián y Alfonso, además de Rodrigo, se encuentran cargados. También hay un pico máximo para Pablo, y por su parte, Óscar y Jesús están descargados.

En el segundo 96 los que se encuentran cargados son Óscar, Damián, con un pico relativamente grande, Alfonso (aunque no excesivamente como sus compañeros), y Rodrigo destacan. Y, por el contrario, Jesús se descarga, Saúl y Pablo también se descargan de sobremanera y Carlos lo mismo.

Para el caso de la subida de Damián en el segundo 60 se observa cómo, al ser un valor muy lejos de la media, está cargando un porcentaje alto del peso de las andas, liberando a los demás de la carga, ya que todos presentan un valle en ese instante.

Así, las cargas fluctúan, se reparten y las andas se equilibran cargando en mayor o menor medida a unos y otros dependiendo de los inconvenientes a lo largo del tiempo. Pero es interesante denotar que cuanto más concentrados estén los valores y menos picos presenten, menores serán las fluctuaciones del peso que experimentarán los hermanos de carga.

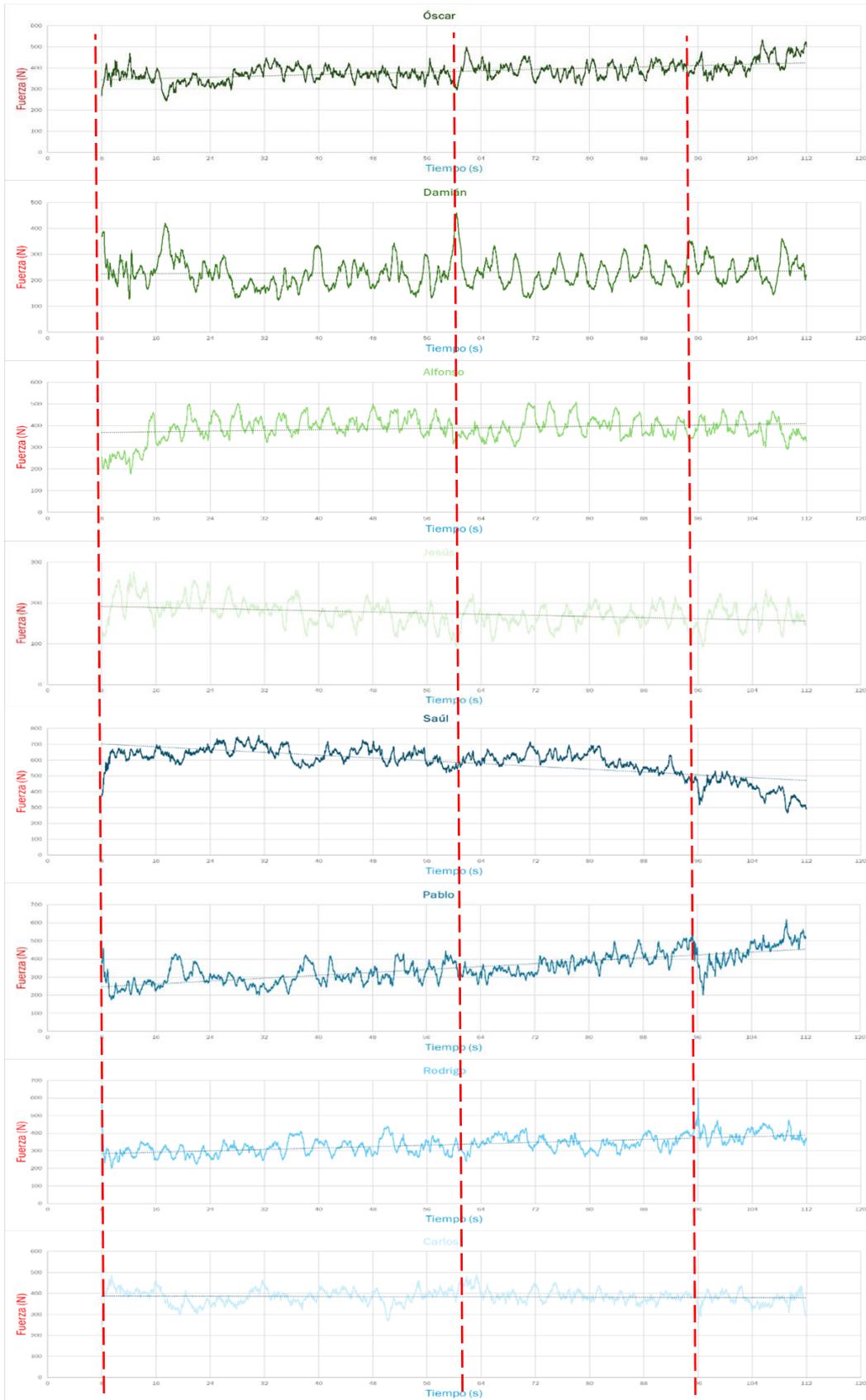


Figura 94. Comparativa general de todas las gráficas de fuerzas.

- Análisis frecuencial del registro.

Como ya se comentó en el apartado anterior, la representación en frecuencia permite conocer el ritmo con el que los hermanos de carga avanzan en el tiempo y si van o no coordinados, dependiendo de su amplitud, que marca las frecuencias dominantes. La lógica indica que, al ser una marcha procesional, el ritmo es marcado y lento, por lo que se deberían observar picos con amplitud grande en las bajas frecuencias.

Observando las gráficas de manera global está claro, como se había dicho, que el ritmo de paso se mueve entre frecuencias bajas. A juzgar por los 5 picos más altos de cada una de las gráficas, siempre se repite la frecuencia de 0,3 Hz. Esta frecuencia se llamará frecuencia de paso. Lo que quiere decir que se dan 3 pasos por cada 10 s de registro, o, como se tratará de explicar al final de este epígrafe, 3 recorridos completos del hombro (ida del hombro con el primer paso y la vuelta a su posición original del hombro con el segundo paso), en 10 s.

Se puede observar la frecuencia de paso obtenida de cada uno de los cargadores en la *Figura 95* que se presenta a continuación.

	Óscar	Damián	Alfonso	Jesús	Saúl	Pablo	Rodrigo	Carlos
Frecuencia (Hz)	0,324	0,311	0,305	0,299	0,305	0,287	0,305	0,299

*Figura 95. Frecuencias de paso obtenidas de cada uno de los hermanos de carga.*

Todos los portadores tienen uno de sus picos más altos en torno a la frecuencia de 0.304 Hz (si se realiza la media). Pero algunos presentan fluctuaciones o eventos que es necesario explicar.

Se presentan así las gráficas en frecuencia de cada uno de los cargadores en el orden habitual:



*Figura 96. Gráfica frecuencial de las cargas de Óscar, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos.*

En el caso de Óscar, en la *Figura 96*, la función de transferencia se estabiliza muy pronto, prácticamente, a partir de 1 Hz ya no hay amplitudes remarcables en la señal, son prácticamente cero.

Para observar mejor estos picos, se amplía la gráfica global para acotar el rango en el que se dan las frecuencias del ensayo: [0,1'2] (lo mismo se hace con el resto).

Se muestran los 5 picos más altos para conocer las frecuencias más predominantes en el ritmo del cargador y como cabría esperar, la de mayor amplitud es la frecuencia observada en el resto de los portadores, la de 0,3 Hz. Y además es preciso destacar que el siguiente pico inferior tiene una amplitud de 8,972; una amplitud 6 unidades por debajo de la máxima, lo que quiere decir que la distribución de frecuencias se concentra en 0,3 Hz. Esto se puede traducir en que Óscar se mueve al ritmo la mayor parte de tiempo.



Figura 97. Gráfica frecuencial de las cargas de Damían, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos.

Damián (Figura 97) tiene una distribución más irregular de las frecuencias, es decir, no hay una sola que se marque más que el resto, que sería lo óptimo. Se presentan picos en 0,2 o 0,23; frecuencias muy cercanas a la frecuencia de paso y con amplitud similar. Es decir, Damián no siempre lleva el paso en el ritmo adecuado, puede ser debido a variaciones del terreno, despistes propios, vibraciones que puedan generar otros cargadores, etc.

Pero es importante denotar que su máximo es 0,311 Hz, por lo que su paso se podría considerar adecuado.

En el caso de la Figura 98 es muy claro que la frecuencia más repetida es la frecuencia de 0,305 Hz, ya que presenta una amplitud muy superior al resto, que se acercan mucho más a cero. Por lo que Alfonso presenta un ritmo muy marcado de las andas.



*Figura 98. Gráfica frecuencial de las cargas de Alfonso, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos.*

Jesús por su parte, puesta su gráfica en la *Figura 99*, de la página siguiente, lleva un ritmo similar a Damián, con un reparto de las frecuencias en las que no sólo destaca la frecuencia de paso sino también las del orden de 0,150 y 0,120 Hz; con amplitudes similares a la de 0,3 Hz. De hecho, el pico máximo se da para 0,140 Hz, pero su diferencia con la amplitud de la frecuencia buscada no es muy cuantiosa.

Esto significa que ha perdido el paso en contables ocasiones. Además, curiosamente, estos dos portadores también tienen distribución de cargas similares en el estudio realizado sobre las fuerzas soportadas. Quizá el hecho de que sean los dos que menos carga soportan influye a la hora de poder seguir el ritmo a los demás, al no percibir de manera tan notable el caminar de la estructura de andas.

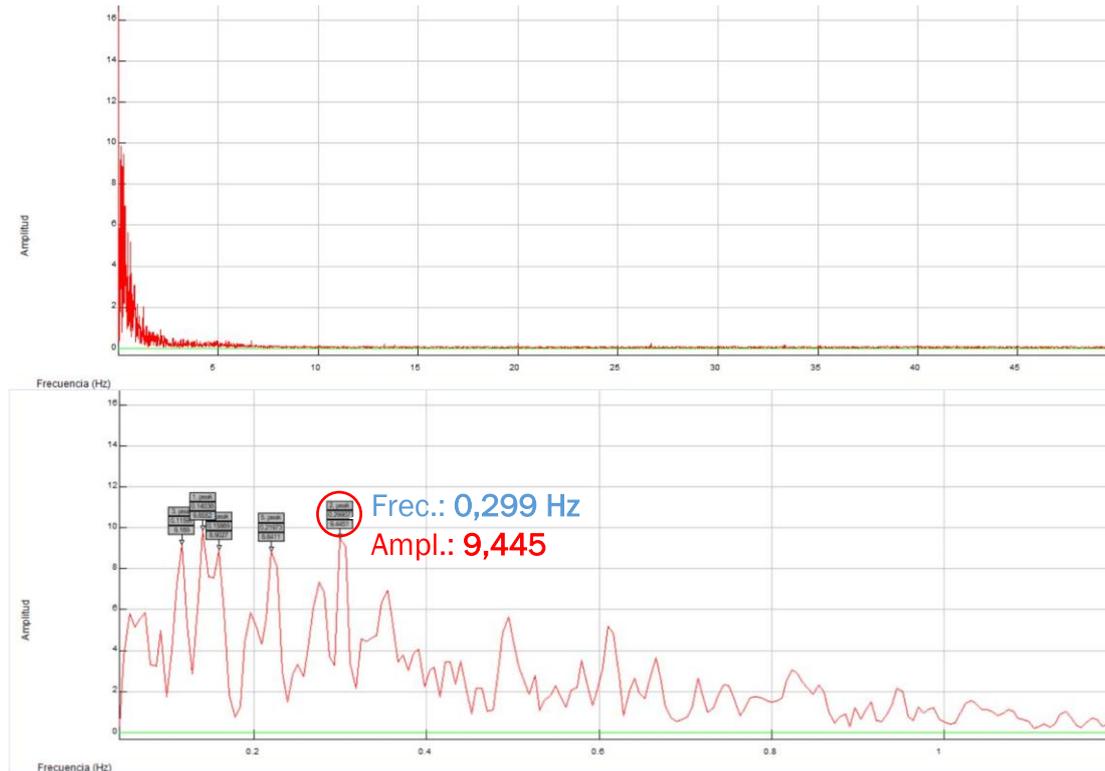
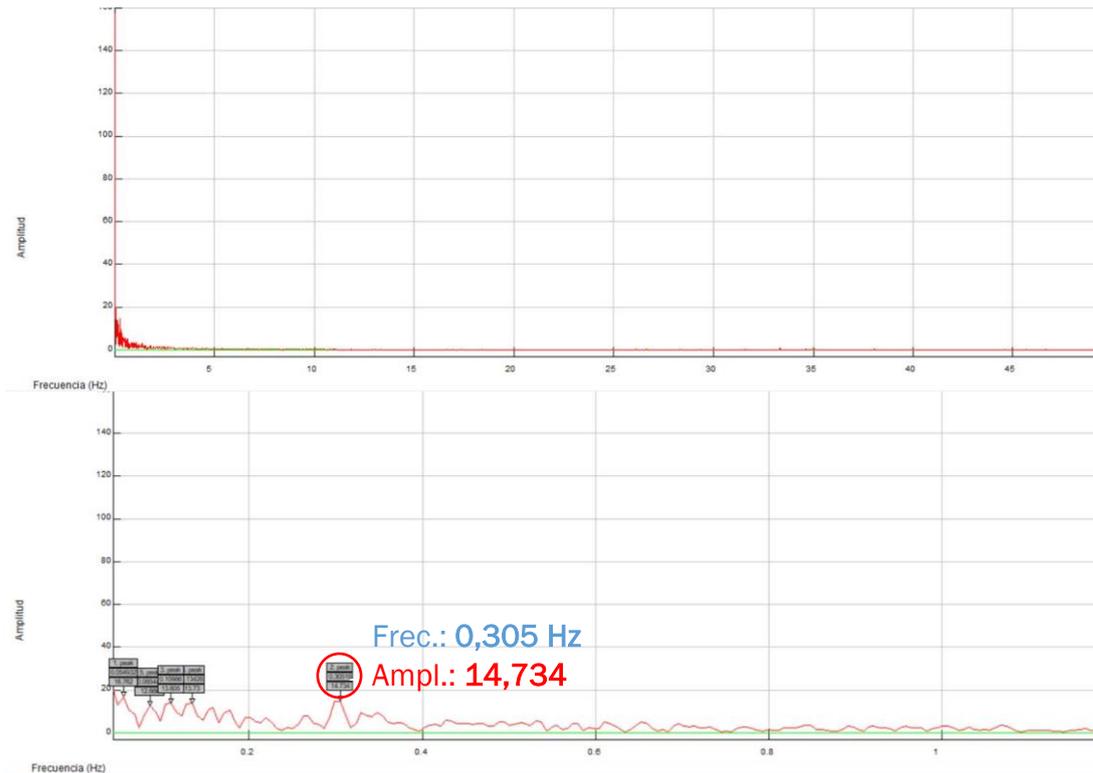


Figura 99. Gráfica frecuencial de las cargas de Jesús, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos.

Para el caso de Saúl en la [Figura 100](#), ocurre algo parecido al caso anterior. Su pico máximo no se da en la frecuencia buscada, si no que se da para un valor de 0,055 Hz, pero apenas hay diferencia de amplitud con la de 0,3 Hz. Además, es una frecuencia tan baja que puede deberse a alguna pequeña vibración en la plantilla, por ejemplo. Pero se considera despreciable por darse a muy bajas frecuencias, igual que se explicó en el apartado anterior del caso de la viga con tres apoyos.

El problema es que hay otras frecuencias también importantes del orden de 0,13, como se ha visto en casos anteriores. Por lo que hay un rango de frecuencias que se excitan entre 0,12-0,23 debido a obstáculos en el terreno u otras causas que comparten algunos portadores entre sí.



*Figura 100. Gráfica frecuencial de las cargas de Saúl, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos.*

También tiene sentido el hecho de que al cargar tanto peso el portador se desequilibre con más frecuencia, haciendo que su ritmo no sea constante y pierda el paso de vez en cuando.

No obstante, también aparece con gran intensidad la frecuencia de 0,3 Hz que se busca en todos los casos.

Lo mismo ocurre con Pablo (*Figura 101*), que también excita de manera predominante las frecuencias de 0,120 o 0,140 Hz. La máxima se da a 0,061 Hz, por lo que no debería de ser importante a nivel de ritmo en las andas (lo mismo que ocurre con Saúl), es despreciable; y de nuevo, vuelve a aparecer la frecuencia de 0,287 Hz que domina el rango frecuencial e indica que Pablo también sigue el paso.

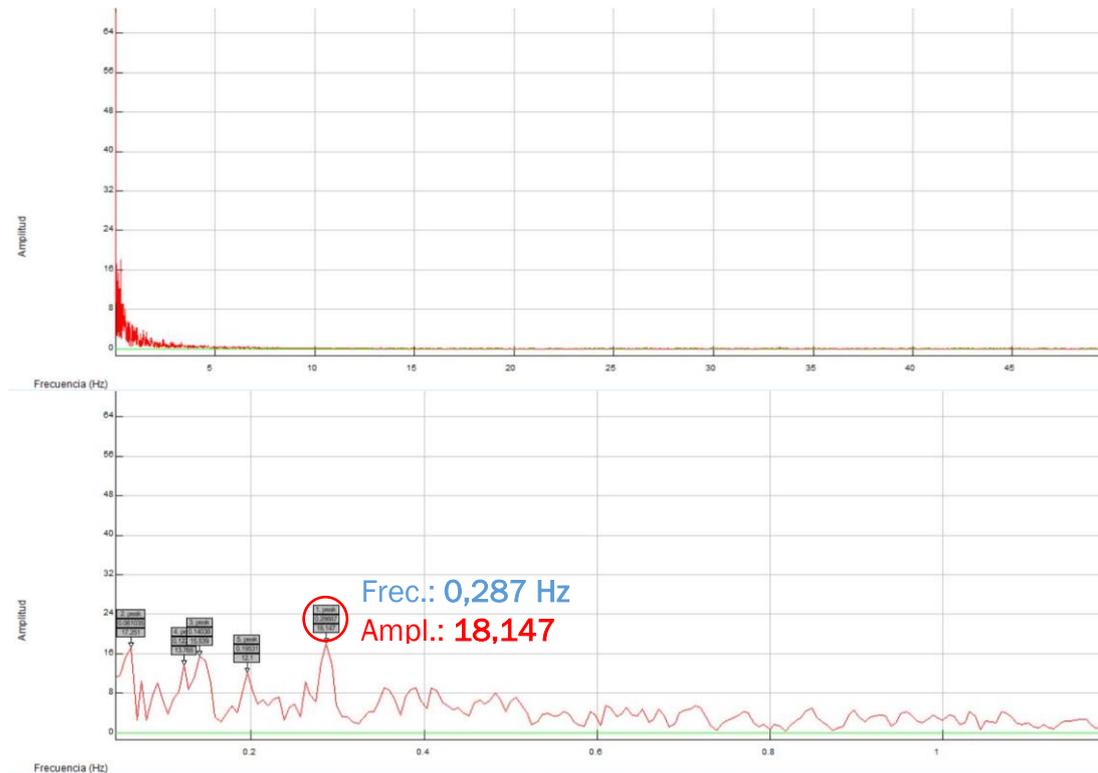


Figura 101. Gráfica frecuencial de las cargas de Pablo, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos.

Rodrigo, representado en la [Figura 102](#), al igual que Alfonso ([Figura 98](#)), presenta un pico elevado en la frecuencia de 0,305 Hz, por lo que se mantiene bastante acorde al ritmo.

También se observa cómo se excitan las frecuencias en torno a 0,130 Hz que se dan en casos anteriores, aunque ahora, con mucha menor amplitud con respecto a la búsqueda.



*Figura 102. Gráfica frecuencial de las cargas de Rodrigo, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos.*

Y, por último, Carlos, cuya gráfica es la mostrada en la *Figura 103*, también presenta el pico en torno a 0,060 Hz que se aprecia en algunos hermanos, pero se considera despreciable también. Se observan las recurrentes frecuencias de 0,100 y 0,126 Hz. Pero lo importante es que vuelve a aparecer la “frecuencia de oro”, a 0,299~0,3 Hz a la que se mueven todos los Hermanos de Carga.

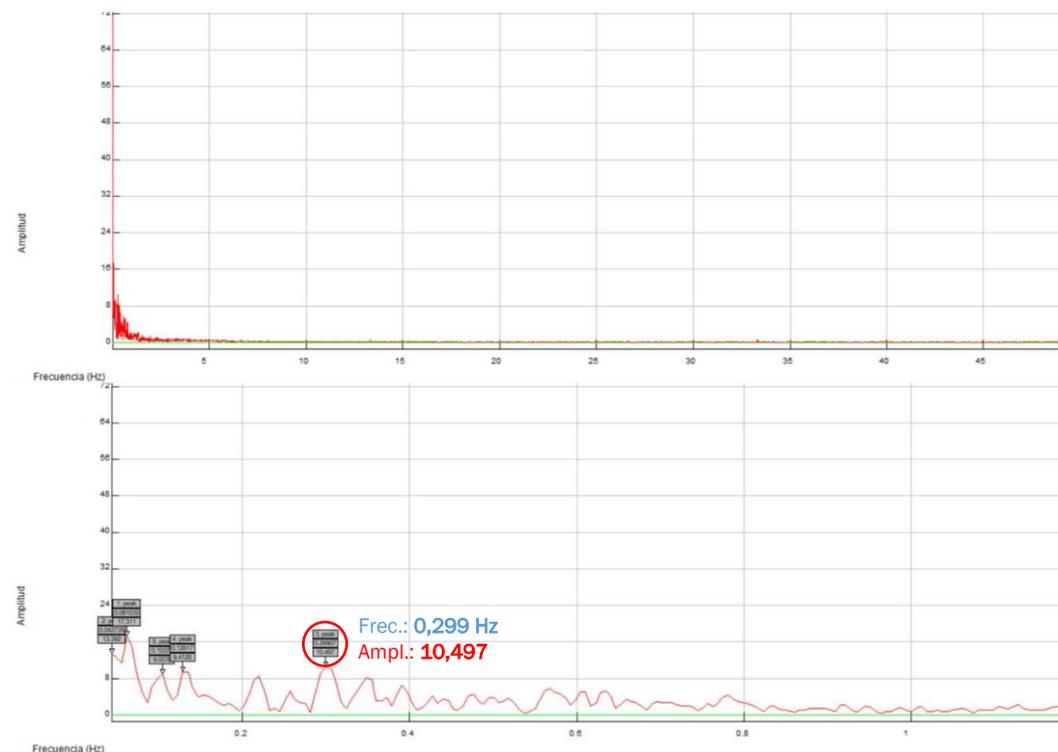


Figura 103. Gráfica frecuencial de las cargas de Carlos, arriba rango completo, abajo rango aumentado para observar los máximos.

Se muestra un resumen en forma de croquis de lo recogido en cuanto al análisis frecuencial en la [Figura 104](#):

Los hermanos de carga Rodrigo y Alfonso tienen unas gráficas con la frecuencia determinada y predominante, por lo que están avanzando a un ritmo correcto. Se puede observar esta relación con la distribución de fuerzas, ya que son dos de los cargadores que se encontraban portando la media de peso (12,5% aproximadamente).

En Jesús y Damián se detectan muchos picos de alta amplitud que no coinciden con la frecuencia de paso, es decir pierden más de lo habitual el ritmo, pero dentro de un rango, van al paso marcado.

Carlos y Saúl por su parte, pierden el paso de vez en cuando, pero los 0,3 Hz siguen presentando relevancia.

Óscar se mantiene en torno a la frecuencia de paso porque la amplitud es muy alta, pero va un poco más rápido de lo que debería, al desviarse de la media de frecuencias del resto de compañeros.

Por último, Pablo, se podría clasificar como rojo debido a que presenta varias frecuencias predominantes, y además la frecuencia buscada es algo más baja

que la del resto de los hermanos de carga, por lo que se acerca al ritmo, pero va más lento que los demás.

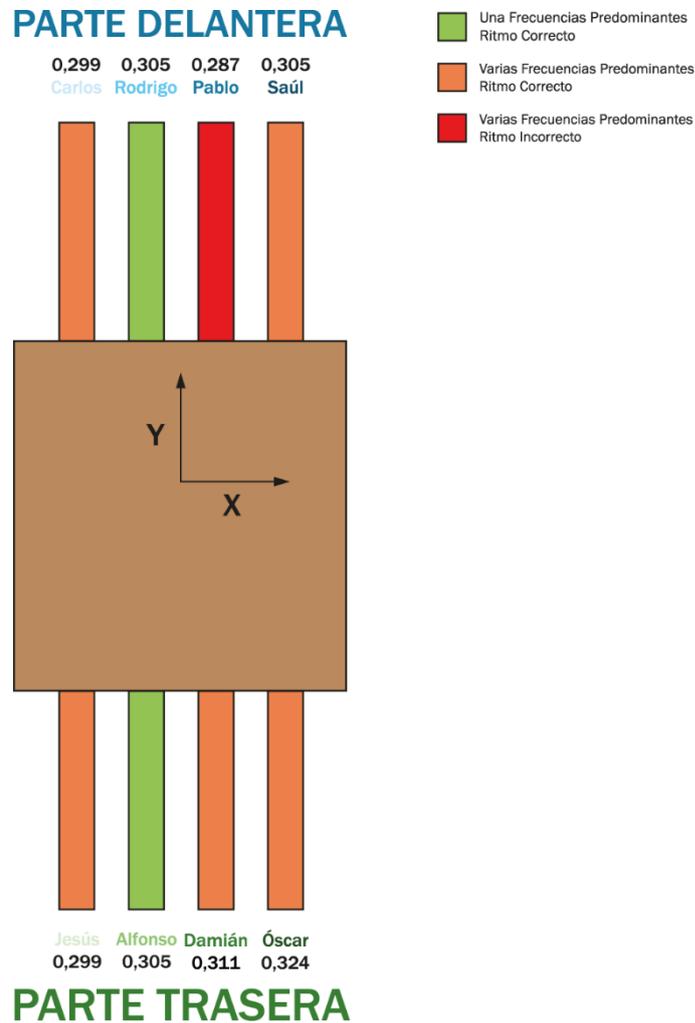


Figura 104. Croquis mostrando las frecuencias de cada uno de los portadores en relación con el número de frecuencias predominantes.

En la *Figura 105*, se muestra una captura del vídeo tomado durante el registro de las andas con los portadores de la cofradía, para que el lector pueda observar cómo se desenvuelve el entorno de un ensayo real y aprecie de forma más tangible la prueba de campo realizada.



Figura 105. Captura de vídeo tomada del vídeo del registro.

Como se intentó explicar al principio de este apartado (“Análisis frecuencial del registro”), si se cuentan los pasos que los Hermanos de Carga dan a lo largo de un tiempo definido salen exactamente el doble. Es decir, se pueden contar 6 pasos en 10 s, lo que deja una frecuencia de 0,6 Hz.

Vuelve a ocurrir lo mismo que en el caso de la viga triapoyada, el hombro va la mitad de lento de lo que van los pasos, porque, como ya se explicó, un recorrido completo del hombro implica medio recorrido de pasos. Es decir, que en realidad la frecuencia es de 6 pasos por cada 10 s, y es la velocidad real a la que avanzan los cargadores.

Se presenta, finalmente, una tabla con el resumen de todos los datos obtenidos en el ensayo en la siguiente *Figura 106*:

		HERMANOS DE CARGA TRASEROS				HERMANOS DE CARGA DELANTEROS				TOTAL		
		Óscar	Damián	Alfonso	Jesús	Saúl	Pablo	Rodrigo	Carlos	SUMA L	SUMA R	SUMA TOTAL
ANÁLISIS TEMPORAL	Media (N)	383,965	230,321	389,020	173,857	587,245	350,158	336,279	384,473	1177,163	1658,154	2835,317
	Desviación Estándar	42,323	54,597	56,440	30,070	92,834	78,616	49,799	32,853	49,889	59,318	82,079
	Máximo (N)	521,672	421,260	514,000	273,800	757,300	619,200	517,632	489,200	1360,298	1839,909	3049,520
	mínimo (N)	244,067	122,803	177,280	91,996	266,204	173,197	198,559	253,536	935,032	1323,988	2446,578
ANÁLISIS FRECUENCIAL	% parciales	32,62%	19,57%	33,05%	14,77%	35,42%	21,12%	20,28%	23,19%	41,52%	58,48%	-
	% TOTALES	13,54%	8,12%	13,72%	6,13%	20,71%	12,35%	11,86%	13,56%	-	-	-
	Frecuencia (Hz)	0,324	0,311	0,305	0,299	0,305	0,287	0,305	0,299			
												MEDIA
												0,304

Figura 106. Tabla resumen con todos los datos obtenidos del registro 2.



## Capítulo 5. RESULTADOS.

En el presente trabajo de fin de grado, se han abordado algunas de las diversas temáticas relevantes dentro del campo de mecánica de sólidos y estructuras aplicadas a unas andas procesionales de Semana Santa.

A lo largo de este estudio, se han analizado algunas problemáticas encontradas en las procesiones en lo referente a portar un paso procesional con el objetivo de tratar de hacer un estudio que sienta las bases sobre la ergonomía y comodidad de los hermanos de carga en una procesión. Tras un exhaustivo proceso de investigación y análisis, se ha logrado extraer una serie de conclusiones significativas que se detallan a continuación. Estas conclusiones no solo sintetizan los hallazgos más relevantes, sino que también ofrecen una reflexión crítica sobre lo estudiado. A continuación, se presentan las conclusiones derivadas de este análisis, destacando los aspectos más relevantes y proponiendo posibles líneas de investigación futura.

### 5.1. Conclusiones.

Dicho esto, y habiendo estudiado y analizado los casos planteados, los resultados que se desprenden del trabajo son los que siguen:

- (1) Se ha pesado la viga (varal) obteniéndose un peso de 86 kg tras seis pruebas y efectuando una media. Los resultados son aceptables al tenerse un peso muy similar en el apoyo delantero y trasero. Por su parte, el grupo estructural de las andas tiene un peso total de 279.35 kg, observándose también que el peso que devuelve la báscula al colocarse en el apoyo delantero y el trasero es muy parecido.

Se concluye que el peso es la suma total de los registros de ambas básculas denotando que los desplazamientos producidos por el espesor de las básculas y tacos no modifican las reacciones en los apoyos cuando se considera una estructura isostática.

- (2) El varal cargado por tres personas ofrece una idea de cómo se mueven los sistemas de cargas a lo largo de un registro. Las conclusiones se dividen en tres partes:

Fuerza. En cuanto a las fuerzas, es importante saber, por comprobación de la veracidad del estudio, que la suma de los registros de fuerzas de cada uno de los portadores da el total del

peso de la estructura lo cual concuerda con el registro de dicho peso obtenido en el apartado anterior.

Las gráficas de las fuerzas dinámicas fluctúan de manera distinta dependiendo del paso que se esté siguiendo (hacia delante, hacia atrás o en parado), obteniéndose que, cuanto mayor es la fluctuación, mayor es la diferencia de confort percibida en el registro. Es decir, si el hermano tiene una tendencia lineal lo suficientemente recta (una relación proporcional entre la fuerza ejercida y el tiempo que transcurre), y acotada entre unos máximos y unos mínimos no muy distanciados, entonces significa que, si la carga que están soportando está en la media de lo que deberían portar idealmente, entonces la ergonomía será lo suficientemente buena para resistir de manera más aceptable una procesión.

Además, se observa el principio de acción y reacción en múltiples ocasiones teniendo en cuenta que lo que deja de cargar uno lo carga otro, haciéndose un reparto de las cargas provocando unas reacciones mayores o menores en los distintos apoyos para compensar el peso de la viga.

En cuanto a peso soportado se refiere, en este caso, el cargador más alto no es el que más carga, lo cual tiene sentido, teniendo en cuenta que el centro de gravedad se encuentra en el centro de la viga, por lo que la disposición de los apoyos al colocar justo a uno de los portadores en ese centro provoca un reparto de pesos tal que los laterales se encuentran mucho más descargados. Si los laterales se acercaran o desplazaran hacia el centro de gravedad, empezarían a cargar más peso, liberando poco a poco a este cargador central. Si además se le añade el hecho de que es una viga muy larga, este efecto se acrecienta. Además, si se tiene en cuenta que la viga no es ideal, seguramente tenga una deformación debido al peso propio, provocándole un pequeño grado de concavidad, resultando en que la altura de apoyo de Antolín esté algo por debajo del resto de portadores. Es decir, es como si Antolín fuera, en realidad, el más alto del grupo.

Aceleración. Cuanto mayor es la fluctuación y más amplitud tenga la señal, significa que las vibraciones en ese apoyo son más grandes resultando en una perturbación que está siendo introducida a las andas y que puede hacer que desestabilice el paso y las cargas del resto de cargadores.

Antolín es el que presenta más aceleración, pero sin embargo su función es bastante periódica, mientras que Saúl por ejemplo se acelera de forma más irregular, lo que también indica la forma de caminar de este hermano de carga.

Frecuencia. Si se obtiene la FFT de cada una de las gráficas temporales de fuerza se observa que todos los hermanos caminan a la mitad de la frecuencia del metrónomo, producido porque la plantilla registra una vuelta completa del hombro como un periodo, mientras que los pasos dados en un balanceo de hombro son dos (y lo que siguen la frecuencia de 0,7 Hz del metrónomo son en realidad los pasos).

Lo más interesante de este análisis es observar el efecto de la almohadilla, apenas pudiendo registrar la frecuencia de paso en la FFT de las fuerzas verticales debido a la amortiguación, pero provocando un pico muy destacable si se realiza la FFT de las aceleraciones, exactamente para el valor de 0,35 Hz en el eje X (eje de balanceo y por lo tanto de mayor aceleración).

La almohadilla, por lo tanto, amortigua las perturbaciones verticales que pueden ser molestas para el cargador, pero permitiendo, sin embargo, la posibilidad de continuar el ritmo sin perder el paso.

- (3) Se pueden obtener conclusiones similares a las del punto anterior, en base a los objetivos.:

Fuerza. El análisis del comportamiento de las cargas y su reparto en unas andas procesionales, las cuales contaban con ocho cargadores y ocho plantillas para registrar las fuerzas, ha revelado varios hallazgos significativos. Se observó que las cargas fluctúan en función de la acción individual de cada cargador, es decir, se redistribuyen las cargas de acuerdo con los principios de acción y reacción. Esto implica que todos los cargadores soportan el peso de la estructura en mayor o menor medida, dependiendo de la actividad de cada uno. Como en el caso anterior, la suma de todas las fuerzas individuales suma el peso de la estructura obtenido con las básculas.

El estudio identificó que Saúl es el cargador que soporta la mayor carga, representando un 20,71% del peso total de la estructura. Este valor es significativamente superior al porcentaje óptimo esperado, que debería ser del 12,5% por cargador. En orden

descendente de carga soportada, se encontraron los siguientes cargadores: Alfonso con un 13,72%, Carlos con un 13,56%, Óscar con un 13,54%, Pablo con un 12,35% y Rodrigo con un 11,86%. Se observó que Saúl, siendo el más alto del grupo, genera un desequilibrio en la distribución de la carga, afectando a Damián y Jesús, hermanos de la cuadrilla trasera, quienes soportan un 8,12% y un 6,13% respectivamente.

Adicionalmente, se ha determinado que la parte delantera de las andas soporta un 16,96% más de peso en comparación con la parte trasera. Este hallazgo resalta un desequilibrio significativo en la distribución de las cargas a lo largo de la estructura.

En conclusión, el análisis evidencia que Saúl carga en demasía, en promedio, roza el peso que debería corresponderle a un solo cargador. Este desequilibrio, inducido por la altura de Saúl, provoca una distribución desigual de las cargas, mientras que los otros cinco cargadores (Alfonso, Carlos, Óscar, Pablo y Rodrigo) mantienen una distribución de carga relativamente equilibrada en comparación con el valor óptimo.

También es indicativo el diagrama de bigotes, concluyendo en que cuanto más concentrados estén los datos, menor será la diferencia de cargas soportadas a lo largo del registro, provocando menos picos en la señal que pueden desequilibrar al resto de hermanos de carga. Por ejemplo, si uno de los registros tiene demasiados máximos de gran nivel, significa que hay varios momentos en los que este portador carga demasiado, mientras otro en esos mismos instantes camina descargado.

Por lo tanto, se sugiere la necesidad de una reestructuración en la asignación de posiciones de los cargadores para optimizar el reparto del peso y reducir el estrés sobre los hermanos más solicitados.

Frecuencia. Todos los hermanos tienen un máximo marcado en sus gráficas frecuenciales de en torno a 0,3 Hz, por lo que realmente todos siguen el ritmo (la diferencia es ínfima), pero al tratarse de una estructura grande y contar con tan pocos cargadores lo hacen muy difícil de estabilizar.

Rodrigo y Alfonso, que son hermanos de carga, tienen gráficos que muestran frecuencias predominantes y estables, lo que indica que están avanzando a un ritmo adecuado. Esta relación

se puede ver en la distribución de fuerzas, ya que ambos llevan aproximadamente el 12.5% del peso promedio.

Por otro lado, Jesús y Damián muestran muchos picos de alta amplitud que no coinciden con la frecuencia de paso, lo que significa que pierden el ritmo más de lo habitual, aunque dentro de ciertos límites siguen el ritmo marcado.

Carlos y Saúl ocasionalmente pierden el paso, pero la frecuencia de 0.3 Hz sigue siendo significativa para ellos.

Óscar mantiene una frecuencia de paso constante debido a su alta amplitud, aunque va un poco más rápido de lo ideal, desviándose del promedio de frecuencias de los otros compañeros.

Finalmente, Pablo, aunque ninguno de los hermanos ha hecho un mal registro realmente, se puede clasificar como el que, pero ritmo mantiene, rojo ya que muestra varias frecuencias predominantes y la búsqueda es más baja que la del resto de los hermanos de carga, por lo que, aunque se acerca al ritmo, va más lento que los demás.

Se requiere hacer un reparto de alturas lo más equitativo para que no se produzcan estos resultados, favoreciendo el movimiento y la no existencia de perturbaciones, vibraciones y tirones evitables.

Otras conclusiones extraídas son las siguientes:

- (4) Se ha podido comprobar por medio de simulación en SAP2000 que ambas estructuras se pueden pesar según lo planteado y que comparando los resultados obtenidos con los del experimento de campo, los resultados son los mismos.

De manera que se concluye que la viga biapoyada, y la estructura de andas con tres apoyos devuelve el peso adecuado, mientras que cuando se tienen tres apoyos o más en la viga y la estructura de andas tiene los cuatro apoyos, al haber más cargadores hay más restricciones y por lo tanto menos libertades de movimiento, (las estructuras se vuelven más hiperestáticas), haciendo que el peso anotado por cada báscula sume más de lo que debería ser.

- (5) En estructuras hiperestáticas, salvo que sólo estén siendo portadas por tres cargadores (como cuando se pesaron las andas), la altura de estos influye significativamente. En efecto, el cargador de mayor estatura

soporta una mayor carga. Básicamente, cuando se tiene una estructura con tantos apoyos como serían unas andas, la estructura tiene muy pocas libertades, lo que la hace sensible a pequeños cambios como los desplazamientos. La estructura no puede moverse conjuntamente como un sólido rígido por lo que se deforma, y esas deformaciones causan esfuerzos internos adicionales que afectan a las reacciones en los apoyos. Al final unos soportan más peso que otros, como en el caso de la estructura con cuatro apoyos, introduciendo un desplazamiento en una pata provocaba que ese hermano tendría que cargar en ese lugar con 2137,93 N, igual que su compañero de la diagonal contraria, mientras los otros dos cargarían tan solo 62,07 N. Por lo que en unas andas al completo (32 cargadores o 24 en su defecto), esto pasaría de manera caótica a unos y otros a lo largo de la procesión, según las distintas alturas, variaciones del terreno...

Esto podría llegar al extremo de que, (si se entiende el apoyo como fijo e inseparable de la estructura, lo cual en el problema ideal ocurre), un cargador de baja estatura quedaría prácticamente suspendido del varal, dejando que el resto de los cargadores soportaran tanto el peso de las andas como el del cargador más bajo.

En la realidad esto no ocurriría, lo que se produciría es que ese cargador bajito no portaría ningún peso, mientras que, como en el caso del presente trabajo, ese 12,5% de carga se repartiría entre los otros siete hermanos por completo. Es decir, como si realmente se tuvieran siete hermanos de carga y no ocho.

- (6) Todos estos cálculos realizados en el paso previo de conocer cómo funcionan las estructuras, cómo se mueven y cuál podría ser el reparto de las cargas analizando las reacciones, son todo conceptos que se aprenden en la escuela de ingenierías, de manera que se intenta explicar y resolver lo que no se comprende en un ámbito real en el que todos los años provoca malestar y confrontaciones, pudiéndose estudiar de manera técnica para solventar una problemática, en vez de por prueba y error, con ordenadores y precisión en este campo en el que no se suele recurrir a dicha técnica.

Al fin y al cabo, se habla de una estructura y no son estructuras pequeñas para considerar prescindible la ingeniería.

- (7) La técnica puede ir de la mano de la religión y ayuda a construir unas condiciones mejores. Es interesante desde el punto de vista de un propio hermano de carga conocer lo que porta en sus hombros y cómo

podría vivir la Semana Santa sin el agobio de pensar que no se puede llegar al final del recorrido.

Además, es un tema novedoso, en el que no se ha incidido prácticamente, y, sin embargo, la problemática sucede muy recurrentemente cada año cuando se comienza a ensayar.

- (8) Presentados los resultados, se han sentado las bases y se ha explicado de manera superficial lo que ocurre en un varal, y en una estructura de andas con ocho cargadores. Se ha motivado la idea de reforzar el uso de la ingeniería en el ámbito de la Semana Santa y se espera una posible mejora de las condiciones de carga en un futuro.

## 5.2. Líneas Futuras.

A lo largo de este trabajo de fin de grado (TFG), se han establecido las bases para el estudio de la distribución de cargas en estructuras hiperestáticas como las andas, sin embargo, aún queda un largo camino por recorrer para alcanzar un monitoreo exhaustivo. Se propone al futuro ingeniero encargado de continuar este proyecto que implemente un sistema de monitoreo completo utilizando 32 plantillas y 32 acelerómetros a lo largo de toda una procesión. Esto permitirá registrar las perturbaciones, los cambios de peso en los apoyos a lo largo del tiempo, el porcentaje de cargas y las frecuencias de paso, es decir, todo lo que se ha estudiado en este TFG, pero de manera más intensiva y en condiciones reales.

La aproximación realizada en este trabajo proporciona una base, pero aún dista de representar con precisión lo que podría ocurrir en un registro real. Además, en investigaciones futuras, sería beneficioso realizar un estudio más detallado de la estructura hiperestática con 32 apoyos, analizando sus desplazamientos, deformaciones y esfuerzos para comprender el comportamiento bajo diversas problemáticas. Por ejemplo, se podría investigar qué sucede si un cargador se desplaza de su punto de carga, si se resbala o si alguien abandona su posición debido a un problema imprevisto.

El objetivo es abordar cualquier eventualidad que pueda alterar las condiciones del ejercicio, permitiendo un dominio completo del campo de estudio. Esto aseguraría que una cofradía que contrate los servicios de un ingeniero pueda recibir recomendaciones precisas sobre la colocación de cada hermano de carga, optimizando la distribución de esfuerzos y mejorando la seguridad y eficiencia durante la procesión.

Puede que, incluso, se llegue a un estudio tal que implicara un rediseño de la estructura procesional o novedades estructurales añadidas que hicieran de estas una carga afable, y no solo se estudiara la reubicación de los cargadores.

### 5.3. Consideraciones adicionales.

En este apartado es interesante añadir un pequeño presupuesto de lo que podría costarle a una cofradía que requiriese de un ingeniero analista en estructuras para comprender qué es lo que ocurre debajo del paso a lo largo de una procesión.

En este trabajo se han desarrollado tres estudios y por lo tanto habrá costes acordados a cada uno de ellos.

Para hacer el presente presupuesto se han utilizado las tablas salariales del sector de las industrias siderometalúrgicas de Valladolid y provincia para el año 2024, según el Boletín Oficial de la provincia de Valladolid, en el que se establece, como se puede ver en la *Figura 107*, el sueldo del ingeniero en 31.752,98 €/año.

ANEXO I TEBLA SALARIAL  
01/01/2024 A 31/12/2024

CATEGORIA	S.BASE	P.CONV	S.TOTA	S.ANUAL	H.EXT R
<b>TECNICOS</b>					
Ingeniero	888,05	1.380,02	2.268,07	31.752,98	22,70
Peritos y Ayudantes	870,34	1.093,89	1.964,23	27.499,22	19,63
Graduados Sociales	849,75	969,15	1.818,90	25.464,60	18,22
Maestros Industriales	840,55	886,69	1.727,24	24.181,36	17,30

*Figura 107. Tabla salarial de ingenieros siderometalúrgicos en Valladolid.*

Para realizar el presupuesto hay que tener en cuenta las horas que se trabajan por año. Concretamente, este 2024 es un año bisiesto que cuenta con 366 días, al que hay que restarle 52 sábados y 52 domingos, 14 días festivos (12 generales + 2 regionales) y 22 días laborables de vacaciones, lo que suma un total de 226 días trabajados, multiplicado por 8 h/día, salen 1808 h trabajadas.

Además, el TFG consta de 12 créditos Ects, que corresponden con 300 h de trabajo.

Cabe destacar también que la aplicación para registrar las plantillas y los acelerómetros es gratuita y se incluye en el precio de la compra de estos dispositivos.

Se va a dividir el presupuesto en tres partes. La primera es el coste por la realización del primer registro con la viga del laboratorio, la segunda, el registro de un ensayo de andas de la cofradía con la que se ha realizado el trabajo. Y por último el coste por el procesado, análisis, realización y redacción del presente documento, que se estimará, como se ha dicho, en 300 h de trabajo según los créditos.

El material utilizado en la realización de los registros y los procesados se entenderá que tienen una amortización de 2 o 5 años, dependiendo del producto, teniendo en cuenta que se podrán utilizar por el ingeniero en futuros ensayos o trabajos. Otros costes, como los de la mano de obra, serán variables en función del trabajo y se entenderán como gastos ocasionados específicamente en este proyecto y otros como los costes contratados a las empresas de los softwares que se han empleado para realizarlo.

Los gastos de luz se han calculado con una media del gasto en electricidad del Gobierno de España, que se estima en 0,1483 €/kWh.

- Registro 1. Viga de laboratorio *Figura 108*.

Registro 1. Viga de laboratorio	COSTES		ESPECIFICOS		CÁLCULO DE COSTES	COSTE TOTAL
	Infraestructura		Laboratorio de estructura			0 €
Material		Viga de madera			0 €	- €
		Básculas			0 €	- €
Software		Novel GmbH LoadSol			0 €	- €
		IMUs Movella Xsens DOT			0 €	- €
Equipos de medida		Novel GmbH LoadSol		(1400 € / 36 meses) · 5 días · (1 mes / 30 días) · 3 plantillas		19,44 €
		IMUs Movella Xsens DOT		(98 € / 36 meses) · 5 días · (1 mes / 30 días) · 3 sensores		1,36 €
		Smartphone Vivo Y525G		(260 € / 60 meses) · 5 días · (1 mes / 30 días) · 1 smartphone		3,61 €
Recursos energéticos		Internet		(30 €/mes / (30 días/mes · 24 h/día)) · 5 días · 2h/día		0,42 €
		Luz (smartphone)		(10 W · 1h/carga) · 5 cargas · (1 kW / 1000 W) · 0,1483 €/kWh		0,01 €
Mano de obra		Montaje de instrumentación, experimento y medida		(31752 €/año / 1808 h/año) · 5 días · 2 h/día · 3 ingenieros		526,86 €
<b>TOTAL REGISTRO 1</b>						<b>551,70 €</b>

*Figura 108. Costes del registro de la viga del laboratorio.*

Los gastos derivados del ensayo en el laboratorio ascienden a 551,70 €.

- Registro 2. Estructura de andas procesionales *Figura 109.*

Registro 2. Estructura de andas procesionales	COSTES	ESPECÍFICOS	CÁLCULO DE COSTES	COSTE TOTAL
	Infraestructura		Nave de ensayos de la cofradía	0 €
Material		Estructura de andas	0 €	- €
		Listón de acero	0 €	- €
		Básculas	0 €	- €
Software		Novel GmbH LoadSol	0 €	- €
		IMUs Movella Xsens DOT	0 €	- €
Equipos de medida		Novel GmbH LoadSol	(1400 € / 36 meses) · 0,25 meses (1 semana) · 3 plantillas	19,44 €
		Smartphone Vivo Y525G	(260 € / 60 meses) · 0,25 meses (1 semana) · 3 plantillas	3,61 €
Recursos energéticos		Internet	(30 €/mes / (30 días/mes · 24 h/día)) · 5 días · 2h/día	0,42 €
		Luz (smartphone)	(10 W · 1h/carga) · 5 cargas · (1 kW / 1000 W) · 0,1483 €/kWh	0,01 €
Mano de obra		Montaje de instrumentación, experimento y medida	(31752 €/año / 1808 h/año) · 5 días · 2 h/día · 3 ingenieros	526,86 €
<b>TOTAL REGISTRO 2</b>				<b>550,34 €</b>

*Figura 109. Costes del registro del ensayo real con las andas procesionales.*

Los gastos derivados del ensayo en el laboratorio ascienden a 550,34 €.

- Procesado, análisis y redacción del presente trabajo *Figura 110.*

Análisis de los registros	COSTES	ESPECÍFICOS	CÁLCULO DE COSTES	COSTE TOTAL
	Material de Análisis		Ordenador HP Omen	(1200 € / 60 meses) · 300 h · (1 mes / 30 días) · (1 día / 24h)
Software de análisis		Novel GmbH LoadSol	0 €	- €
		IMUs Movella Xsens DOT	0 €	- €
		Paquete Microsoft Office (Word, Excel)	(5,75 €/mes / (30 días/mes · 24 h/día)) · 300 h	2,40 €
Recursos energéticos		Adobe Illustrator	(36,29 €/mes / (30 días/mes · 24 h/día)) · 300 h	15,12 €
		SAP200 versión educacional	(4,2 €/mes / (30 días/mes · 24 h/día)) · 300 h	1,75 €
Mano de obra		Internet	(30 €/mes / (30 días/mes · 24 h/día)) · 300 h	0,42 €
		Luz	((300+250) W · 300h) · (1 kW / 1000 W) · 0,1483 €/kWh	24,47 €
<b>TOTAL REGISTRO 2</b>				<b>5.321,07 €</b>

*Figura 110. Costes de procesado, análisis, realización y redacción.*

El procesado de los datos más la realización de la memoria del proyecto cuesta un total de 5321,07 €.

En total, el coste de este proyecto se estima en **6423,11 €**.

## REFERENCIAS.

- [1] Molina, A. H. (01 de 03 de 1985). *Martillo y costal. Estudio médico del costalero*. Obtenido de Arte Sacro: <https://www.artesacro.org/martilloycostal/estudio.html> [Último acceso: 17/06/2024]
- [2] Tecbas. (s.f.). *Tecbas. Básculas de camiones*. Obtenido de Tecbas: <https://tecbas.es/basculas-de-camiones> [Último acceso: 21/06/2024]
- [3] Futek SL. (s.f.). *¿Qué es un transductor de fuerza?* Obtenido de Futek.com: [https://www.futek-com.translate.google.com/what-is-a-force-transducer?x\\_tr\\_sl=en&x\\_tr\\_tl=es&x\\_tr\\_hl=es&x\\_tr\\_pto=rq&x\\_tr\\_hist=true](https://www.futek-com.translate.google.com/what-is-a-force-transducer?x_tr_sl=en&x_tr_tl=es&x_tr_hl=es&x_tr_pto=rq&x_tr_hist=true) [Último acceso: 10/06/2024]
- [4] AEP Transducers. (06 de 04 de 2021). *Transductores de fuerza*. Obtenido de aep.it.es: <https://www.aep.it/es/tag/transductores-de-fuerza/#:~:text=Hay%20b%C3%A1sicamente%20dos%20tipos%20de,categor%C3%ADa%20de%20sensores%20de%20fuerza>. [Último acceso: 25/05/2024]
- [5] Ortomecánica. (2020). *FlexinFit. Plantillas con sensores*. Obtenido de Ortomecánica: <https://www.ortomecanica.com/producto/biomecanica/flexinfit-plantillas-con-sensores> [Último acceso: 25/05/2024]
- [6] Luengas Contreras, L., López Ávila, B., & Jiménez Espinosa, J. (2017). Caracterización de unidades de medición inercial (IMUs) en estática y dinámica. *Ingenio Magno. Universidad de Santo Tomás de Tunja (Colombia)*, 92-102. [Último acceso: 25/05/2024]
- [7] Agapito y Revilla, J. (1925). *Las cofradías, las procesiones y los pasos de Semana Santa en Valladolid*. Valladolid.
- [8] Manuel, A. M. (2019). Paso de la Elevación de la Cruz. En A. M. Manuel, *Museo Nacional de Escultura: Colección* (págs. 176-177). Madrid: Ministerio de Cultura y Deporte.
- [9] Burrieza Sánchez, J. (2004). *Cinco siglos de cofradías y procesiones. Historia de la semana Santa en Valladolid*. Valladolid: Junta de Cofradías de Semana Santa de Valladolid y Ayuntamiento de Valladolid.
- [10] Burrieza Sánchez, J. (2010). *Historia de una procesión. 200 años de la general del Viernes Santo de Valladolid*. Valladolid: Junta de Cofradías de Semana Santa de Valladolid y Ayuntamiento de Valladolid.

- [12] Malcolm, C. J., & Arenas, J. P. (2021). *Engineering acoustics. Noise and vibration control*. Estados Unidos: John Wiley & Sons Ltd.
- [11] Miscelánea de Arte Sacro. (06 de 02 de 2017). *La carga interior fuera de Andalucía*. Obtenido de Miscelánea de Arte Sacro: <https://miscelaneaartesanro.blogspot.com/2017/02/la-carga-interior-fuera-de-andalucia.html> [Último acceso: 18/05/2024]