



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Prototipado y caracterización de un sistema
wearable para medir GRFs**

Autor:

Terol Úbeda, Adrián

Tutor: Lorenzana Ibán, Antolín

Co-tutor: Magdaleno González, Álvaro

**DPTO: Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno,
Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras**

Valladolid, Julio 2018.

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo el desarrollo y caracterización de un sistema portable para la medición de las fuerzas que genera una persona sobre una estructura al caminar sobre ella. Partiendo sobre la idea inicial de unos zancos, acoplados a las suelas del operario mediante algún sistema de sujeción, y utilizando células de carga como sensores para medir las fuerzas generadas, se ha ido desarrollado dicha idea hasta lograr un prototipo real y funcional. Para lograr tal fin se ha tenido que diseñar y dimensionar cada uno de los elementos del zanco mediante software de diseño 3D, fabricarlos y realizar el montaje final, para posteriormente realizar una serie de ensayos para determinar su funcionamiento, comparando los resultados obtenidos con los proporcionados por una plataforma de fuerza calibrada. Finalmente, se ha propuesto una serie de mejoras de cara a la fabricación de una segunda versión, con le objetivo de subsanar los defectos observados en el funcionamiento de los zancos.

Palabras clave

Sistema portátil, Prototipado real, GRF, Plataforma de fuerza.

Abstract

The objective of this project is the development and characterization of a wearable system for measuring the ground reaction forces, which are produced by humans who walk over a structure. Based on the initial idea of using stilts, attached to the operator's soles with a fastening system, and using load cells as sensors to measure the forces, this idea has been developed until the obtention of a real and functional prototype. In order to produce the prototype, every element of the stilt has been designed with a 3D software, manufactured and finally mounted. Afterwards, some tests are performed, comparing the results which are obtained with the results provided by a calibrated platform. Finally, a series of improvements has been proposed in order to create a second version, with the aim of correcting the defects observed in the original stilts.

Key words

Wearable system, Real prototyping, GRF, Force Platform.

Índice

Resumen	3
Abstract	5
1. Introducción y objetivos	15
1.1. Introducción	15
1.2. Objetivos	18
2. Fundamentos teóricos	19
2.1. Funcionamiento de una galga extensiométrica	19
2.2. Puente de Wheatstone	21
2.3. Fuerzas de reacción sobre suelo o GRFs	22
3. Metodología	27
3.1. Fases de caracterización del trabajo	27
3.2. Instrumentación utilizada	29
3.2.1. Diseño y concepción	29
3.2.2. Fabricación	32
3.2.3. Experimentación	34
3.3. Descripción y funcionamiento	37
4. Componentes	41
4.1. Células de carga	41
4.2. Sistema de sujeción zanco-zapato	44
4.3. Plantilla de acero	45
4.4. Suela de caucho	46
4.5. Amarres	47
4.6. Pletinas de soporte de la célula	48
4.6.1. Pletinas inferiores	48
4.6.2. Pletinas superiores	49
4.7. Tornillería	50
4.8. Sistema de cableado y circuitos eléctricos	51
4.8.1. Cableado del zanco de carga	52
4.8.2. Cableado de unión zancos-Sirius	53
5. Proceso de fabricación	55
5.1. Proceso de obtención y fabricación de piezas	55
5.2. Errores de forma derivados del estudio metrológico	57
5.3. Mecanizado y Rectificado de piezas	60
5.3.1. Avellanado de las células	60

5.3.2.	Rectificado y arreglo de las chapas de acero inoxidable . . .	61
5.4.	Montaje	63
6.	Experimentación	69
6.1.	Configuración de los equipos	69
6.2.	Ensayos	74
6.2.1.	Captación de pasos individuales mediante la plataforma de fuerza.	74
6.2.2.	Captación de pasos individualizados mediante los zancos de carga.	75
6.2.3.	Registro comparativo del peso que ejerce una persona sobre un zanco y la plataforma de carga.	77
6.2.4.	Registro comparativo de pasos individualizados entre zan- cos y plataforma.	78
7.	Conclusiones y líneas de futuro	81
7.1.	Conclusiones	81
7.1.1.	Disposición de la célula de carga respecto a la tornillería inferior-superior y la flexión de plantilla de acero	81
7.1.2.	Juego entre célula de carga y pletina superior	83
7.1.3.	Peso general del sistema	84
7.1.4.	Efecto chancla y caída en el talón	85
7.1.5.	Posición del punto de apoyo del talón	87
7.1.6.	Tuercas superiores y comodidad en el contacto suela- amarre	88
7.1.7.	Sistema de sujeción zanco-zapato y comodidad general	89
7.1.8.	Revisión de la geometría de los elementos CAD y correc- ción de medidas	90
7.2.	Lineas de futuro	91
7.2.1.	Inversión de la célula y las pletinas	93
7.2.2.	Redimensionamiento de los taladros	95
7.2.3.	Modificación de los espesores	96
7.2.4.	Recolocación de la célula talonar	99
7.2.5.	Capa superior de caucho	99
7.2.6.	Aligeramiento de las pletinas inferiores (Antiguas pleti- nas superiores)	100
7.2.7.	Recorte de las puntas de la plancha de acero	101
7.3.	Otras alternativas de mejora	101
	Referencias	103

Anejos: Planos

105

Índice de figuras

1.1. Pasarela <i>Millennium Bridge</i> [3].	15
1.2. Sistema de medición de fuerzas y presiones plantares Pedar© Novel. [1].	17
2.1. Galgas metálicas.	19
2.2. Puente de Wheatstone.	21
2.3. Ciclo completo de la marcha humana [9].	23
2.4. Evolución de las fuerzas durante la marcha suave y el running [15].	23
2.5. Evolución de las fuerzas durante la pisada [11].	24
2.6. Evolución de las fuerzas verticales en función de la velocidad de la marcha [15].	25
3.1. Entorno del módulo Assembly design del software CAD CATIA.	29
3.2. Dispositivo pie de rey.	30
3.3. Dispositivo QUADRA-CHECK®200 [10]	31
3.4. Broca lima.	32
3.5. Pistola termofusible y cartuchos de cola.	33
3.6. Sistema de adquisición de datos Sirius HD-STG.	34
3.7. Conexiones DB9.	34
3.8. Célula de carga.	35
3.9. Plataforma de apoyo.	36
3.10. Cableado de la plataforma de fuerza.	36
3.11. Conexiones hembra de jack 3,5 mm.	37
3.12. Zanco de carga derecho.	37
3.13. Zonas anatómicas de interés en la planta del pie [14].	38
3.14. Lugar de colocación de las células de carga.	39
3.15. Partes principales de un zanco de carga.	39
3.16. Deformación del entorno de la célula en función de la carga. . .	40
4.1. Célula de carga (Fuente: Web del fabricante).	41
4.2. Componentes célula de carga.	42
4.3. Par de crampones (Fuente: Web del fabricante).	44
4.4. Goma y correspondientes correas, ya modificadas.	45
4.5. Plantilla de acero.	45
4.6. Vista de la planta inferior con las suelas de cuacho montadas en los zancos.	46
4.7. Amarre frontal.	47
4.8. Amarre posterior.	47
4.9. Pletina inferior.	48
4.10. Pletina superior de la célula frontal.	49
4.11. Pletina superior de la célula media.	50

4.12. Pletina superior de la célula inferior.	50
4.13. Tuerca, tornillo y arandela.	51
4.14. Vista del sistema de cableado.	52
4.15. Cable jack 3,5 mm.	53
4.16. Doble conexión jack 3,5 mm.	53
4.17. Doble conexión DB9.	54
5.1. Lectura del archivo DWG de una pletina superior talonar.	56
5.2. Ejemplo de medida exterior con el pie de rey digital.	58
5.3. Ejemplo de medida interior con el pie de rey digital.	59
5.4. Representación en CAD del resultado tras el avellanado.	60
5.5. Resultado del mecanizado en el amarre talonar.	61
5.6. Mecanizado de una pletina superior.	61
5.7. Mecanizado mediante broca lima.	62
5.8. Deformación de la pletina inferior provocada por el mecanizado.	62
5.9. Inclusión de los tornillos en la célula.	63
5.10. Inclusión de la pletina superior.	63
5.11. Montaje del amarre frontal.	64
5.12. Montaje de las tuercas como sustitución de las pletinas inferiores.	64
5.13. Montaje de la plantilla de acero.	65
5.14. Sellado de la unión con cola termofusible.	65
5.15. Esquema básico del cableado.	66
5.16. Unión del cableado a las pletinas superiores mediante cola termofusible.	66
5.17. Unión del cableado a la suela de acero mediante cola termofusible.	67
5.18. Colocación del conector jack de 3,5 mm en el entorno de la goma.	67
5.19. Zanco de carga acoplado al zapato del operario.	68
6.1. Conexión de cada cabezal DB9 a el sistema de adquisición de datos Sirius.	69
6.2. Acoplamiento completo de zancos y cableado al operario para la realización de ensayos.	70
6.3. Pestaña de selección de canales del sistema de adquisición de datos Sirius.	71
6.4. Ventana auxiliar Setup para la configuración de los canales.	72
6.5. Calibración de la señal mediante dos puntos.	73
6.6. Ejemplo de señales de zanco y plataforma de fuerza registradas por el Sirius.	73
6.7. Representación de la fuerza ejercida al pisar la plataforma con pasos individualizados.	75
6.8. Representación de la fuerza ejercida al pisar con el zanco derecho.	76
6.9. Representación de la fuerza ejercida al pisar con el zanco izquierdo.	77

6.10. Representación de la fuerza ejercida al pisar la plataforma con pasos individualizados	78
6.11. Representación de la fuerza ejercida al pisar la plataforma con pasos individualizados	79
7.1. Colocación de tuercas en sustitución de las pletinas inferiores. . .	82
7.2. Juego entre la cabeza de los tornillos de las uniones superiores y la suela de acero sin carga aplicada.	82
7.3. Juego entre la cabeza de los tornillos de las uniones superiores y la suela de acero con carga aplicada.	83
7.4. Juego entre la cabeza de los tornillos y el amarre superior. . . .	84
7.5. Caída y pérdida de contacto físico zapato-zanco en el talón. . . .	85
7.6. Picos de fuerza al inicio de la pisada provocados por la colisión en el talón	86
7.7. Deformación de los zancos durante el inicio de la zancada. . . .	86
7.8. Deformación esquematizada de los zancos durante el inicio de la zancada.	87
7.9. Indicación de la posición ideal del nuevo punto de aplicación de la célula trasera.	88
7.10. Distribución de los tornillos que sobresalen en la suela superior.	88
7.11. Colocación de un corcho provisional a modo de suela superior para mejorar la comodidad.	89
7.12. Segunda versión de los zancos de carga, vista desde de la parte superior.	91
7.13. Segunda versión de los zancos de carga, vista desde de la parte inferior.	91
7.14. Vista del planta de ambas versiones	92
7.15. Vista del perfil de ambas versiones.	92
7.16. Comparación de los tamaños de cada pletina.	93
7.17. Disposición de las células en y la tornillería en cada uno de los zancos.	94
7.18. Comparación de los taladros en los amarres frontales.	95
7.19. Vista inferior de la suela de los zancos de carga.	95
7.20. Vista inferior de la suela de los zancos de carga.	96
7.21. Comparación de los espesores de los amarres frontales.	97
7.22. Comparación de los espesores de las pletinas asociadas al cabezal.	97
7.23. Comparación de los espesores de las pletinas asociadas a la base exterior.	98
7.24. Comparación de las posición de la célula talonar y sus componentes asociados.	99
7.25. Inclusión de capa superior de caucho.	99

7.26. Aligeración de la pletina de la célula superior.	100
7.27. Aligeración de la pletina de la célula media.	100
7.28. Aligeración de la pletina de la célula talonar.	100
7.29. Recorte de material en plancha de acero y suela de caucho. . . .	101
7.30. XSENS ForceShoe TM [7].	102

Índice de tablas

4.1. Características de la célula de carga.	43
---	----

1. Introducción y objetivos

1.1. Introducción

En la actualidad es cada vez más común la instalación de pasarelas, en un intento de satisfacer las demandas de nuevas rutas de paso para la circulación de peatones. Gracias a la mejora en materiales y el desarrollo de los diseños, es cada vez más habitual la construcción de pasarelas muy esbeltas. Dichas pasarelas, debido a la imposición de fuertes criterios estéticos, son susceptibles a vibraciones ya que suelen presentar poco amortiguamiento [3].

Uno de los principales orígenes que pueden dar lugar a vibraciones son aquellos movimientos que inducen los propios peatones al caminar o correr sobre la estructura. Puede darse el caso de que el movimiento periódico del peatón pueda excitar la pasarela, produciendo altos niveles de vibración. Esto se debe a que la frecuencia a la que un peatón realiza cada pisada, ya sea caminando o corriendo, coincide con alguna frecuencia de vibración de la estructura, dando lugar a fenómenos de resonancia. Si bien estos fenómenos raramente pueden poner en serio peligro la integridad estructural de la pasarela, afecta a la funcionalidad, incomodando el paso a los peatones, que perciben una gran sensación de peligro e inestabilidad.

Un caso conocido de resonancia producido por lo peatones es la inauguración de la pasarela *Millennium Bridge* en Londres (Figura 1.1). Debido al gran paso de peatones que querían trascurrir sus más de 300 metros de longitud, a los pocos minutos la estructura empezó a experimentar grandes vibraciones, llegando a poseer amplitudes de 70 mm en su vano central [11]. Debido a este fenómeno la pasarela tuvo que ser cerrada y reparada, mediante la instalación de una serie de amortiguadores de masa y viscosos, sintonizados para disminuir las vibraciones verticales y laterales [2].



Figura 1.1: Pasarela *Millennium Bridge* [3].

Demostrada la importancia de las fuerzas producidas por los viandantes sobre las estructuras, surge la necesidad de desarrollar sistemas de medición que capten de qué forma una persona puede excitar una estructura, con qué valor de fuerza impacta cada pisada en el suelo y con qué frecuencia realiza cada uno de los movimientos. Es importante además poder conocer la evolución de las fuerzas a lo largo del tiempo, que función periódica describe, y si esta varía en función de si el peatón camina o corre. Además, estos sistemas pueden medir en sentido opuesto, proporcionando información sobre si un usuario modifica o no su paso cuando la estructura sobre la que se apoya tiene alguna vibración o movimiento inducido.

Los sistemas más inmediatos para medir las reacciones que producen un objeto o persona son las plataformas de fuerza, pero estas tienen la contrapartida de que el campo de medición está limitado dimensionalmente la plataforma, haciendo que su uso para medir las fuerzas que se realizan sobre el suelo, GRF, del inglés, *Ground Reaction Forces* (Apartado 2.3) no sea posible en para grandes recorridos, como pasarelas o grandes forjados.

Debido a este inconveniente, se ha desarrollado multitud de sistemas portátiles, que acoplándose al operario, ya sea mediante a una plantilla, zapatilla o zanco, se desplace solidariamente con los pies del peatón, captando las señales de las diferentes pisadas. Los diferentes sistemas y sensores utilizados en estas plataformas wearables son muy variados, utilizando desde células de carga hasta sensores de presión de aire, además de presentar más o menos funcionalidades [1].

Uno de los sistemas portables más conocidos es el Pedar[©] Novel (Figura 1.2), un sistema de plantillas con más de 100 sensores, que es capaz de medir tanto fuerzas como la distribución de presiones en la pisada. Por contrapartida, estos sistemas wearable suelen tener, por línea general, un coste de fabricación elevado, así como el uso de tecnologías relativamente complejas.



Figura 1.2: Sistema de medición de fuerzas y presiones plantares Pedar© Novel. [1].

Para este proyecto se ha planteado el diseño y prototipado de un sistema wearable, que permita la captura de las GRFs producidas por un operario, pero que al mismo tiempo sea sencillo de diseñar y fabricar, además de tener un coste de fabricación muy contenido, no sobrepasando de la centena de euros. En este caso se ha desarrollado unos zancos de carga que se acoplan a la suela de los zapatos del operario, captando las reacciones mediante el uso de una serie de células de carga.

1.2. Objetivos

A la hora de realizar el trabajo, de cara al diseño y prototipado del producto, se tuvo en cuenta que los zancos de carga tuvieran las siguientes características:

- Los zancos debían de ser ligeros y fácil de transportar.
- Los zancos pudieran soportar y medir las cargas producidas por un hombre adulto (que pesara alrededor de los 80 Kg) sin saturación de medidas o rotura de los componentes.
- La pisada del operario fuera lo más natural y cómoda posible.
- Que el zanco se acoplara y quedara sujeto correctamente a la suela del zapato mediante algún sistema de agarre.
- El espesor del zanco fuera lo más contenido posible.
- El zanco no fuera demasiado rígido, permitiendo que se pudiera deformar y adaptarse a la suela en cada instante de la pisada.
- El contorno de los zancos se pudiera adaptar a las dimensiones de un zapato comercial determinado (Talla 43) pero que no resultara incomodo su uso en caso de que el operario calzara un número diferente (tanto superior como inferior).
- Los zancos pudieran permitir al operario desplazarse con libertad y con un rango de desplazamiento amplio respecto a la sistema de adquisición de datos.
- El coste de fabricación de los zancos reducido.

Vistas las premisas anteriores, el proyecto se ha centrado en el desarrollo de los siguientes campos:

- Diseño y caracterización de cada uno de los componentes (Apartado 4).
- Proceso de fabricación y montaje (Apartado 5).
- Ensayos y verificación del funcionamiento (Apartado 6).
- Validación y posibles líneas de investigación futuras (Apartado 7).

2. Fundamentos teóricos

Dentro de todos los distintos tipos de sensores y aparatos de medición posibles a utilizar para el funcionamiento de los zancos, se ha optado por que los zancos funcionaran mediante el uso de una serie de células de carga de puente completo. La célula de carga es por definición un transductor, que se encarga de transformar las fuerzas que se aplican sobre ella en un señal eléctrica medible y cuantificable. El principio de funcionamiento de la célula se basa en el uso de una serie de galgas extensiométricas.

2.1. Funcionamiento de una galga extensiométrica

La galga es el elemento transductor base que se utiliza para cuantificar las deformaciones del sistema [4]. Morfológicamente la galga es un hilo que conduce corriente, cuya resistencia eléctrica interna es variable a la deformación que pueda sufrir, fruto de un esfuerzo mecánico.

Para el caso de estas células, que se centran principalmente en los esfuerzos de flexión pura para determinar la fuerza vertical aplicada, la galga, fijado a un soporte aislante, se fija solidariamente sobre el elemento deformable en la dirección de interés. Tras aplicar una fuerza, la galga se deforma junto al elemento.

Una galga metálica suele ser una rejilla de 10 a 20 ramas (número n) de un cierto hilo de cierta resistividad ρ , sección S y longitud l . En función de la trama, para las galgas metálicas se puede distinguir entre las galgas de hilo y las galgas de trama de película (Figura 2.1).

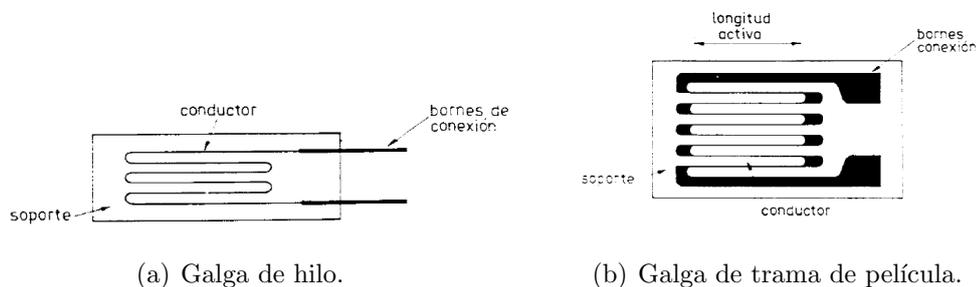


Figura 2.1: Galgas metálicas.

La resistencia eléctrica del montante R se puede expresar como:

$$R = \frac{n \cdot l \cdot \rho}{S} \quad (1)$$

Al aplicar una carga de flexión sobre el elemento, las galgas, orientadas en el eje de dicho, elemento, experimentan una deformación axial.

Bajo este estado de tracción, experimenta las siguientes modificaciones:

- Una variación de la resistencia interna R
- Un aumento de la longitud del hilo l
- Una disminución de la sección del hilo S
- Una variación en la resistividad ρ

Dadas las variaciones y partiendo de la ecuación 1, se llega a la siguiente relación:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2)$$

La variación unitaria de superficie S se puede expresar, para una galga rectangular (de dimensiones $h \times b$), de la manera:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta b}{b} = -2\nu \frac{\Delta l}{l} \quad (3)$$

Donde ν es el coeficiente de Poisson de la galga (conocido y de habitualmente $c_B \simeq 1$).

Para la variación unitaria de la resistividad ρ , la Ley de Bridgman enuncia que para una galga metálica, la variación unitaria de la resistividad es proporcional a la variación unitaria del Volumen V :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = c_B \frac{\Delta V}{V} \quad (4)$$

Donde c_B es la constante de Bridgman. Conociendo que el volumen de una galga se puede descomponer de la forma $V = n \cdot l \cdot S$, se puede definir la deformación unitaria del volumen como:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta S}{S} = (1 - 2\nu) \frac{\Delta l}{l} \quad (5)$$

Aplicando las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 se puede llegar a la expresión final:

$$\frac{\Delta R}{R} = [1 + 2\nu + c_B \cdot (1 - 2\nu)] \frac{\Delta l}{l} = K \cdot \frac{\Delta l}{l} = K \cdot \varepsilon_l \quad (6)$$

Donde K es el factor de galga, que depende del fabricante (el valor más habitual es $K \simeq 2$). La variación unitaria de longitud l es la misma que la deformación axial ε_l que experimenta la galga.

2.2. Puente de Wheatstone

Sabiendo que las galgas actúan como resistencias eléctricas variables, el método más habitual para calcular dicha variación (y por tanto, la deformación) es la utilización de un circuito comparador de tensión llamado puente de Wheatstone [4].

El puente de Wheatstone está formado por 4 resistencias distribuidas en 2 ramas (Figura 2.2), en el que se proporciona un voltaje de entrada V_{in} y se mide el voltaje V_{out} a la salida, en mV/V.

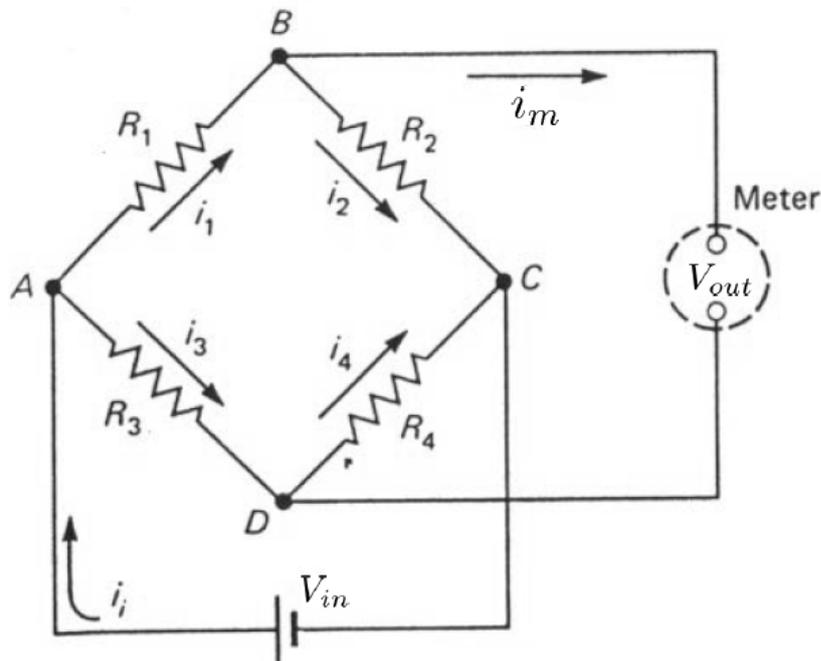


Figura 2.2: Puente de Wheatstone.

Realizando un análisis al circuito, se obtiene la expresión:

$$V_{out} = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_{in} \quad (7)$$

Considerando que el puente trabaja equilibrado (situación ideal) se aplica que $\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} = C \Rightarrow V_{out} = 0$, lo que permite leer la variación de tensión de salida ΔV_{out} directamente.

En estas condiciones, y suponiendo que se trata de un puente completo, como el de las células de carga utilizadas, con la variación del valor en cualquiera de las resistencias (provocada por una deformación en cualquiera de las 4 galgas), el incremento de la tensión de salida tendrá la forma:

$$\Delta V_{out} = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_4 + \Delta R_4) - (R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} V_{in} \quad (8)$$

Operando y despreciando los términos de orden superior ($R_i \Delta R_i \gg R_i \Delta R_j$) se obtiene finalmente:

$$\Delta V_{out} = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] V_{in} \quad (9)$$

En estas condiciones el incremento del voltaje la salida ΔV_{out} es función lineal de la variación unitaria de las resistencias de las galgas $\frac{\Delta R}{R}$, que como se ha visto en la ecuación 6, es proporcional a la deformación de la galga ε_l .

Esta relación lineal entre deformación e incremento de voltaje a la salida es fundamental para que el puente de Wheatstone, utilizado en las células de carga, sea un sistema adecuado para poder realizar mediciones y calibraciones.

2.3. Fuerzas de reacción sobre suelo o GRFs

El concepto de GRFs, o Ground Reaction Force, es un término utilizado en el campo de la física, en especial en el campo de biomecánica, para describir la fuerza con la que un objeto o persona aplica sobre la superficie del suelo o de una estructura, al entrar en contacto físico con ella.

Centrándose en las reacciones producidas por seres humanos, se puede definir la marcha humana como una serie de movimientos con el objetivo de generar soporte y movimiento hacia adelante, mediante el uso de ambas piernas. Al mismo tiempo, se puede definir la marcha como una sucesión de varios eventos idénticos y sucesivos, como podrán ser cada paso realizado a cierta frecuencia [8].

Tomando como inicio de un ciclo el instante en el que el talón derecho contacta físicamente con el suelo, y como final la repetición del mismo, se puede dividir la marcha humana en las siguientes fases (Figura 2.3):

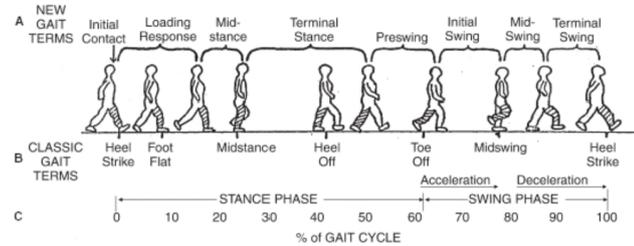


Figura 2.3: Ciclo completo de la marcha humana [9].

En dicho ciclo de marcha se producen dos pisadas, primero con el pie derecho, que da inicio al ciclo, más tarde el izquierdo, a mediados del proceso, y finalmente otra vez volviendo al inicio de la pisada con el pie derecho, dando paso al siguiente ciclo.

Durante todo el proceso de pisada, desde que el talón entra en contacto con la superficie hasta que la otra punta del pie se separa del suelo, se transmiten una serie de fuerzas a la estructura. Dichas fuerzas pueden tener un módulo y sentido variables. Los puntos de interés típicos suelen estar centrados en la fuerza vertical, la fuerza anterior-posterior y la fuerza medio-lateral (Figura 2.5)

A la hora de realizar el ciclo hay que tener en cuenta que no se divide en dos pisadas consecutivas, sino que la pisada del pie izquierdo tiene inicio antes del final de la pisada con el pie derecho, con la salvedad de la marcha a elevadas velocidades, como el running o el sprint, donde puede tener lugar fases del ciclo sin que ningún pie se encuentre en contacto superficial (Figura 2.4)

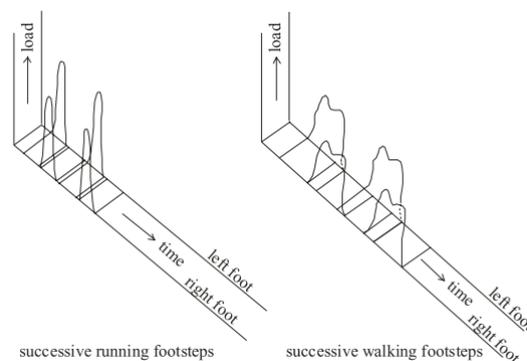


Figura 2.4: Evolución de las fuerzas durante la marcha suave y el running [15].

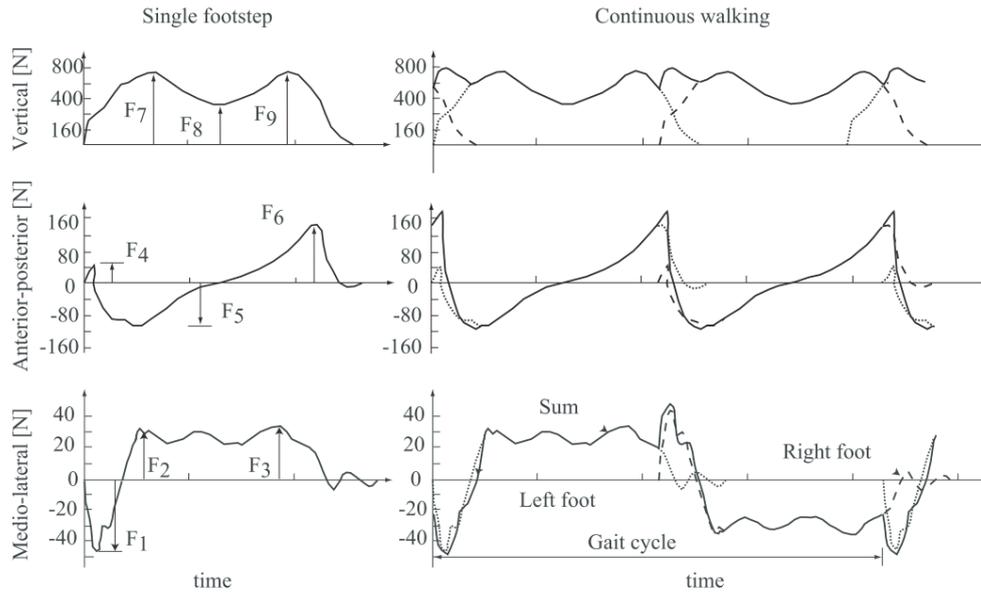


Figura 2.5: Evolución de las fuerzas durante la pisada [11].

Si bien todas las distintas fuerzas tienen interés en la biomecánica, es la GRF de la componente de la fuerza vertical, en función del tiempo y la frecuencia de paso, la que tiene interés desde un punto de vista centrado en la teoría de estructuras. Esta función, a bajas velocidades de marcha, presenta una cierta simetría, con dos máximos de similar altura y un mínimo relativo en el medio. Como se puede ver en la figura 2.6, la separación de dichos máximos se reduce a medida que el ritmo de la marcha es mayor, hasta llegar al caso de marcha rápida o running, donde la GRF solo describe un máximo.

Estas fuerzas sobre el suelo, generadas por las personas, son las señales que se quieren captar mediante los zancos que se han prototipado en este trabajo, con el objetivo de analizar posteriormente dichas señales, así como las vibraciones de una estructura producidas por esas GRFs, para caracterizar los modos de vibración del sistema y la comodidad de los viandantes.

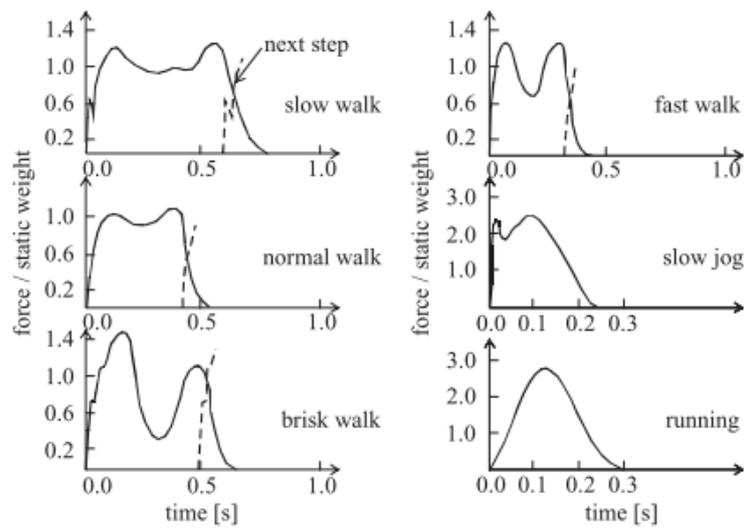


Figura 2.6: Evolución de las fuerzas verticales en función de la velocidad de la marcha [15].

3. Metodología

3.1. Fases de caracterización del trabajo

A la hora de desarrollar un determinado producto que suponga un cierto reto tecnológico, hay que dividir dicho desarrollo en distintas subetapas. En cada una de ellas, conocidas las especificaciones y objetivos a cumplir, se definen todas sus características técnicas que intervienen tanto en el diseño como en las características mecánicas, la fabricación y el funcionamiento del producto.

Las etapas básicas que definen el un proceso de diseño de producto son:

- **Diseño y concepción del producto.**

En función de las características deseadas del producto se ha realizado un diseño tridimensional por ordenador, mediante el software de diseño asistido por ordenador CATIA V5-6R2018. Con la ayuda de dicho software se define el número de componentes, dimensiones, geometrías y uniones entre los distintos elementos, con el objetivo de obtener, a partir del diseño virtual, una materialización de dichos elementos. A la hora de realizar el diseño hay que tener en cuenta las limitaciones en el resto de procesos, como podrían ser los materiales y los métodos de fabricación disponibles.

- **Análisis físico.**

En esta fase se realiza un análisis, usualmente mediante elementos finitos, para simular el comportamiento del producto, bajo la acción de cualquier acción física, como puede ser la aplicación de cargas, fenómenos eléctricos, magnéticos, térmicos, vibratorios o de cualquiera otra índole. También se realizan estudios estáticos o dinámicos, que permiten una aproximación realista al comportamiento en servicio y averiguar si cumple con las especificaciones de partida.

En el mercado se dispone de multitud de software con módulos de simulación CAE, como podrá ser CATIA, SolidWorks, Inventor, SAP2000 o COMSOL Multiphysics. Para este trabajo, por motivos de tiempo y plazos, se ha tenido que prescindir de dicho proceso de análisis, pasando directamente del diseño 3D por ordenador a la fabricación del producto.

- **Fabricación del prototipo.**

Una vez validado el análisis mecánico por ordenador, la siguiente etapa corresponde a la construcción y montaje final del prototipo. Es imprescindible, como paso previo, tener definida la obtención de componentes y materiales, tanto si es por pedido a proveedores o empresa externa, y como será el proceso de fabricación, tanto si lo realiza una empresa externa o el propio departamento.

- **Ensayo del prototipo.**

Una vez montado, se realiza una serie de ensayos que determinan su rendimiento y funcionamiento real de cara a una futura puesta en servicio del producto final. Es importante que los ensayos sean lo más fieles posible a las condiciones de funcionamiento, en orden de obtener la mayor fiabilidad posible.

- **Validación del prototipo.**

Vistos los resultados de los ensayos, se obtienen las conclusiones acerca de su funcionamiento, haciendo énfasis en si cumple con todas las especificaciones de partida, y analizando en que aspectos queda por debajo de las expectativas o puede mejorar, con el objetivo de subsanar los errores en futuras versiones.

A la hora de caracterizar el trabajo es determinante concebirlo no como un proceso lineal CAD-CAE-Fabricación-Ensayos, sino como un proceso reiterativo y con recirculación. Una vez visto y analizado los fallos apreciados en una determinada etapa del proceso, se vuelve a una etapa precedente en las que se realiza las modificaciones pertinentes con el objetivo de solucionar aquellos errores que se puedan manifestar en etapas posteriores. El proceso se puede realizar tantas veces como sea necesario hasta llegar a una validación definitiva del prototipo final, momento en el que se obtendría el producto definitivo.

En el caso de este trabajo se ha realizado una interacción completa, diseñando una primera versión de los zancos, realizando su modelación 3D, fabricación y montaje de la piezas y ensayo de los zancos. Una vez visto su funcionamiento, realizando un análisis de los posibles defectos que tenga, se ha realizado un diseño tridimensional de una segunda versión que intenta solucionar, en lo posible, aquellos problemas de funcionamiento que presente el modelo predecesor.

3.2. Instrumentación utilizada

A lo largo del trabajo se ha utilizado multitud de instrumentos, necesarios para satisfacer cualquier necesidad tecnológica que el proceso pudiera haber requerido en ese momento.

3.2.1. Diseño y concepción

A la hora de generar el modelo tridimensional de los zancos, se ha tenido que utilizar el siguiente software e instrumentación de medida:

- **CATIA V5-6R2018 [13]**

Software CAD muy utilizado en la industria, especialmente en los campos de la ingeniería, la arquitectura y el diseño. Para este trabajo se ha utilizado 2 módulos de programa:

- **Part design:** Permite la creación de sólidos 3D mediante el uso de sketchedes y elementos geométricos básicos como el punto, la línea y el plano. Es el módulo utilizado para el diseño de elemento metálico de los zancos, que más tarde requieren una fabricación mediante corte láser. También cualquier elemento ya existente que mas tarde hubiera necesitado una representación 3D, como la tornillería y la célula de carga, han tenido que ser generados digitalmente con un modelo tridimensional lo más fiel posible a la realidad.

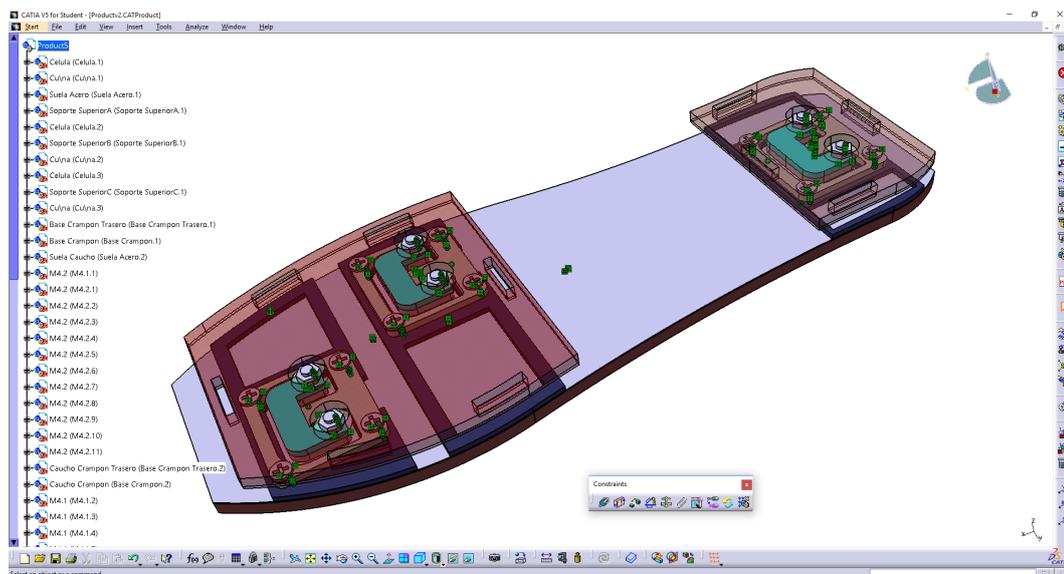


Figura 3.1: Entorno del módulo Assembly design del software CAD CATIA.

- Assembly design: Modulo que permite la unión de varios sólidos o conjuntos de sólidos en un único producto, definiendo las restricciones entre los distintos elementos y permitiendo calcular y reproducir los distintos grados de libertad posibles de todo el sistema (Figura 3.1). Es el módulo utilizado para recrear el montaje completo de los zancos, en el que se incluye tanto las piezas diseñadas para su posterior fabricación, como los objetos reales recreados en 3D, procurando que el encaje de todas las piezas sea correcto, sin presentar desajustes o desalineaciones.

■ Pie de Rey

Instrumento de medida utilizado para obtener todas las dimensiones y características geométricas de la célula de carga, necesarias para más tarde poder definir las dimensiones del resto de elementos de los zancos de carga que deben ir perfectamente integrados con dichas células.

El pie de Rey proporcionado por el departamento de estructuras (Figura 3.2) es uno digital que presenta las siguientes especificaciones técnicas:

- Campo de Medida: 0-155,1 mm.
- Campo de calibrado: 0-150 mm.
- Resolución: 0,10 mm.
- Batería: SR44/LR44 1,5 V.
- Fabricado en fibra de carbono.
- Permite realizar mediciones exteriores e interiores.

Se ha utilizado en la medición de elementos exteriores para prácticamente todas las dimensiones geométricas de la célula de carga, a excepción del diámetro de los taladros, que se ha realizado con mediciones interiores. Este dato es relevante pues las mediciones exteriores e interiores pueden presentar distintas dispersiones de medida y errores de corrección sistemáticos.



Figura 3.2: Dispositivo pie de rey.

■ Proyector de perfiles:

Proyector de perfiles de eje horizontal modelo QUADRA-CHECK®200 (Figura 3.3) propiedad del departamento de metrología y calidad industrial de la escuela de ingenierías industriales, el cual presenta las siguientes características [5]:

- Resolución: Eje X: 0,001 mm (digital), Eje Y: 0,001 mm (digital), angular: 1 s (digital)
- Alcance de medida: Eje X: 200 mm, Eje Y: 200 mm, angular: 360°
- Campo calibrado: Eje X: 200 mm, Eje Y: 200 mm, angular: 360°
- Sistema de iluminación: diascópica (proyección por luz transmitida)
- 3 posibles aumentos: x10, x25 y x50.

El proyector se ha utilizado para revisar las dimensiones de las célula de carga con mayor fiabilidad de medida respecto al pié de rey digital. Una vez fabricado los zancos, tras presentar una serie de defectos dimensionales, que se explicará más adelante en el apartado 5.2, para más tarde poder realizar una revisión de la geometría de todos los elementos diseñados en CAD, que dependen de la geometría de la célula de carga.



Figura 3.3: Dispositivo QUADRA-CHECK®200 [10]

3.2.2. Fabricación

Para la construcción de piezas y el posterior montaje de los zancos se ha hecho uso de los siguientes instrumentos:

- **Corte láser**

El corte láser de las distintas piezas de acero inoxidable, que se verá en detalle más adelante (Apartado 5.1), ha sido realizado por la empresa externa LÁSER EBRO .SL, proporcionando además el material en chapa con el espesor deseado, con todo el proceso de fabricación bajo la certificación ISO 9001.

- **Taladro**

Para realizar el mecanizado de las células de carga y las diferentes piezas (explicado mas detalladamente en el apartado 5.3), se ha hecho uso de un taladro eléctrico comercial *Black and Decker* modelo CD714CRES, al que se le ha acoplado 2 tipos de brocas distintas:

- Broca grande: Broca de diámetro nominal superior al M4 (diámetro correspondiente a los taladros de la célula) utilizado para aumentar los diámetros nominales de las piezas.
- Broca lima: Alternativa a la broca convencional dependiendo de si las piezas son susceptibles de deformarse o se busca un mejor acabado tanto en avellanado como en el aumento de diámetro nominal. Como resultado del uso en la fabricación de los zancos dicha lima ha sufrido un alto desgaste (Figura 3.4).



Figura 3.4: Broca lima.

- **Sierra radial**

Para el corte enrasado de los tornillo se ha hecho uso de una sierra radial propiedad del departamento de estructuras.

- **Pistola Termo-fusible**

Para adherir el sistema de cableado a la suela de acero inoxidable, así como para sellar los agujeros producidos en la suela de caucho, se ha hecho uso de una pistola termofusible, que se compone de una cabeza o pistola que dispara cola, la cual se ha calentado previamente mediante resistencias eléctricas (Figura 3.5).



Figura 3.5: Pistola termofusible y cartuchos de cola.

- **Juego de herramientas**

Para el atornillado de cada una de las piezas de los zancos se ha hecho uso de destornilladores y llaves inglesas para elementos de métrica 4, así como el uso puntual de alicates, provenientes de un juego de herramientas.

3.2.3. Experimentación

- **Sirius HD-STG:**

Para el ensayo del funcionamiento de los zancos se ha hecho uso de un equipo de adquisición de datos Sirius (Figura 3.6), al que viene asociado el software DEWESoft X.



Figura 3.6: Sistema de adquisición de datos Sirius HD-STG.

Este equipo se encarga de proporcionar, por un lado, toda la alimentación a las células de carga, y por otro, se encarga de las señales de medida, proporcionando una señal de entrada y recibiendo la señal de salida, en mV, que podrá, mediante el cociente de voltajes, medir la carga total aplicada. Para la unión con los diferentes sistemas, el equipo cuenta con 16 canales de entrada tipo DB9 (Figura 3.7), además de la conexión a un PC mediante puerto USB.



Figura 3.7: Conexiones DB9.

■ **Plataforma de fuerza:**

Para la comprobación del comportamiento de los zancos se ha utilizado una plataforma de fuerza fabricada en el laboratorio de estructuras y construcciones industriales, que previamente ha sido correctamente calibrada y con probada fiabilidad respecto a su funcionamiento.

La plataforma de fuerza consta de los siguientes componentes:

- **Plataforma de apoyo:** Tabla de madera donde se apoya el operario y que la plataforma calcula en cada instante la fuerza con la que dicho operario ejerce sobre ella. Las dimensiones limitadas de la plataforma (1,5x0,5 m, Figura 3.9) impiden que esta no pueda registrar más que ensayos estáticos, balanceo, saltos verticales o el par de pasos que una persona pueda registrar al pasar sobre ella, a diferencia de los zancos, que son capaces de registrar en todo momento y lugar las señales producidas por el operario, siempre y cuando los zancos estén conectados al sistema de adquisición de datos.
- **Células de carga:** La plataforma consta de 6 células de carga (mismo número que presenta el par de zancos), distribuidas en las esquinas y el punto medio del largo de la plataforma. Las células de carga (Figura 3.8) son de igual modelo a las utilizadas en los zancos, con el objetivo de que a misma señal de entrada los resultados sean lo más parecidos posibles.

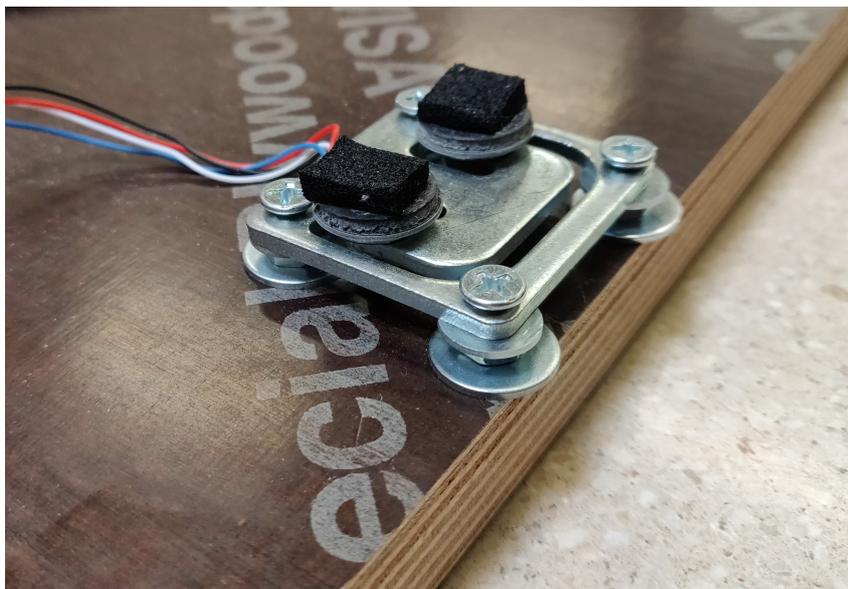


Figura 3.8: Célula de carga.

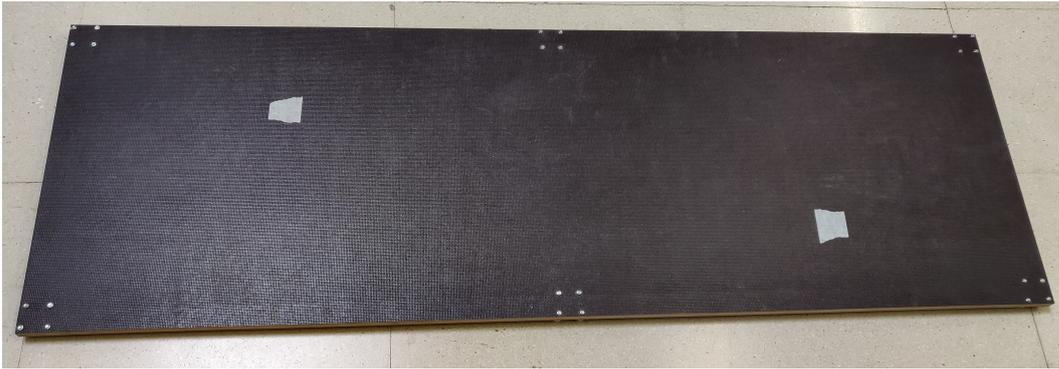


Figura 3.9: Plataforma de apoyo.

- Cableado: Las células de carga se encuentran unidas de forma que el sistema de adquisición de datos solo capta una señal de salida, correspondiente a la suma de todos los valores de carga captados por cada célula individualmente (Figura 3.10).

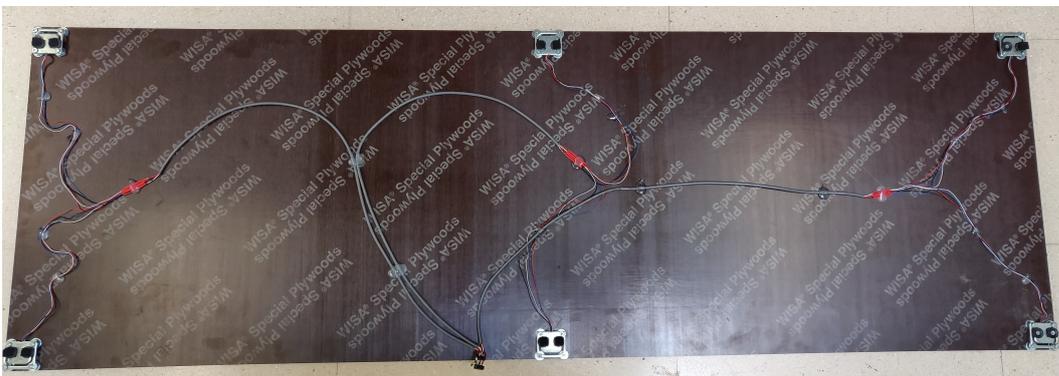


Figura 3.10: Cableado de la plataforma de fuerza.

- Conexión al sistema de adquisición de datos: Para acoplar la señal al Sirius, el cableado de las células de carga finaliza en un cabezal hembra de jack de 3,5 mm (Figura 3.11), al que posteriormente se le une en serie 2 cables; primero un cable de doble jack macho, seguido de una cable con una conexión jack hembra en un extremo y con una conexión DB9 de el otro, que irá unido al sistema de adquisición de datos.



Figura 3.11: Conexiones hembra de jack 3,5 mm.

3.3. Descripción y funcionamiento

Los zancos de carga (Figura 3.12) son unos dispositivos que se acoplan a la suela de los zapatos del operario con el objetivo de registrar, en cada instante, la fuerza con la que el operario ejerce su peso la estructura que lo soporta, ya sea mientras el operario permanezca en estático o en movimiento, registrando tanto la fuerza total aplicada como la fuerza registrada por cada zanco por separado.



Figura 3.12: Zanco de carga derecho.

Cada par de zancos cuenta con 3 células de carga, colocadas a lo largo de todo el zanco según 2 criterios:

- Zonas de máxima presión ejercidas por el operario:
Si bien un pie humano consta de múltiples puntos de interés (Figura 3.13), las zonas donde un hombre promedio suele aplicar mayor presión, considerando ensayos tanto estáticos como dinámicos, corresponden al talón, el 2o y 4o metatarsiano, y en menor medida el pulgar [1, 6].

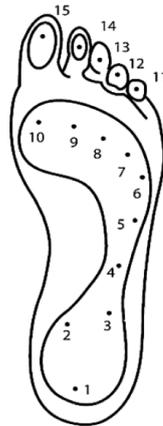


Figura 3.13: Zonas anatómicas de interés en la planta del pie [14].

- Distribución homogénea respecto al zanco:
Teniendo en cuenta que el pie del operario debe estar apoyado sobre 3 células de carga, deben distribuirse de manera que físicamente sea posible (dos células de cierto tamaño no pueden colocarse sobre dos puntos de alta presión que estén muy próximos uno del otro) y que además el apoyo final debe ser cómodo y que no pueda provocar inestabilidades, ya que si las células estuvieran colocadas de manera que una gran zona donde se apoyara la suela del zapato no estuviera colocada encima de una célula, el pie tendría tendencia a hundirse y desplazar todo el peso en esa zona, perdiendo toda comodidad.

De esta manera, y teniendo en cuenta que solo se dispone de 3 células, lo cual significa que el rango de captura de presiones es limitado [1], se han colocado en las siguientes posiciones: Una célula esté colocada en el talón, otra está colocada en el pulgar y finalmente otra está situada sobre la zona correspondiente al 4 y 5 metatarsiano (Figura 3.14)

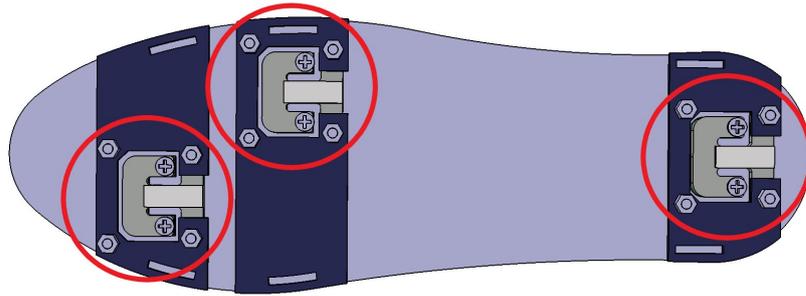


Figura 3.14: Lugar de colocación de las células de carga.

En función de la célula se puede dividir el zanco en dos partes principales (Figura 3.15):

- Parte inferior: Aquellos componentes que se encuentran acoplados a la cara inferior de la célula de carga, deben proporcionar un apoyo cómodo y uniforme sobre la superficie de la estructura. Durante la aplicación de una fuerza por parte del operario, estas no sufren ningún desplazamiento (despreciando posibles deformaciones no deseadas)
- Parte superior: Aquellos componentes que por contrapartida, se encuentran unidas a las caras superiores de las células. Deben garantizar una unión cómoda al contorno del zapato del operario mediante un sistema de sujeción zanco-zapato (Apartado 4.2), así como un buen apoyo, cómodo y homogéneo, entre suela y parte superior. Al aplicar una fuerza sobre los zancos, la parte superior debe acompañar la superficie superior de las células como si un sólido rígido se tratase, intentando presentar las menores deformaciones posibles.

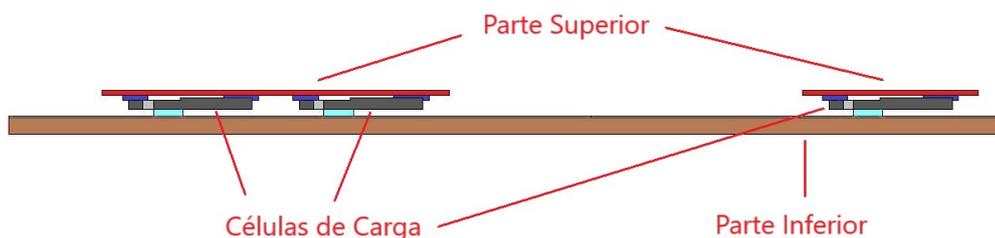


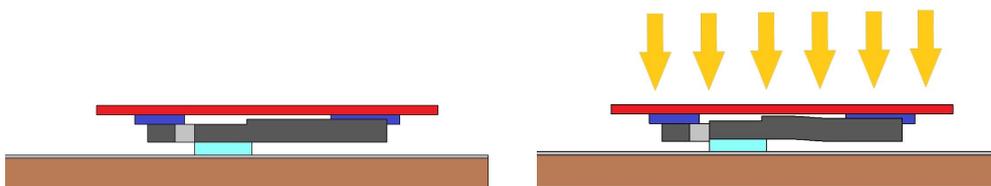
Figura 3.15: Partes principales de un zanco de carga.

Cuando se aplica una carga sobre el zanco, las células de carga se deforman por flexión. Al producirse esta deformación, mediante las galgas que se encuentran

en su interior, se puede ser capaz de calcular la fuerza ejercida, a partir de la señal de voltaje generada (Apartado 2.2), pero hay que tener en cuenta que dicha deformación no puede estar condicionada o limitada por la morfología del propio zanco.

Bajo esta premisa, teniendo en cuenta el movimiento relativo entre los propios componentes de la célula debido a la flexión (Apartado 4.1), dicho movimiento relativo debe ser reproducido entre las partes superiores e inferiores de los zancos. Por tanto, una de las partes de los zancos debe estar solidariamente unida a una superficie de la célula que no experimente deformación por flexión alguna, mientras que la parte opuesta del zanco debe estar unida solidariamente a una superficie de la célula que experimente el desplazamiento por flexión máximo.

Al realizar una pisada completa, la parte inferior permanece fija, pues se encuentra en contacto con el suelo. De la misma forma la parte de la célula unida a la parte inferior no se mueve. Por efecto de la carga ejercida por el operario, desde arriba y aplicada verticalmente hacia abajo, provoca que una parte de la célula, que no se encuentra unida íntimamente a la parte inferior, se deforme por flexión, desplazándose hacia abajo respecto al resto de la célula de carga que no se deforma (Figura 3.16). Unida a esta parte que experimenta flexión, se encuentra la parte superior de los zancos.



(a) Entorno de la célula sin carga aplicada. (b) Entorno de la célula con carga aplicada.

Figura 3.16: Deformación del entorno de la célula en función de la carga.

Es vital para el funcionamiento óptimo del zanco que la parte inferior y superior no puedan entrar, en ningún momento, en contacto físico. Se debe garantizar en todo momento unas holguras que permitan la flexión libre de la célula de carga, de otra forma habría una saturación en el registro de las fuerzas y pérdida de datos.

4. Componentes

Los zancos de carga constan de los siguientes componentes:

- **Células de carga.**
- **Sistema de sujeción suela-zapato.**
- **Plantilla de acero.**
- **Suela de caucho.**
- **Amarres.**
- **Pletinas de Soporte de la Célula.**
 - Pletinas inferiores.
 - Pletinas superiores.
- **Tornillería.**

4.1. Células de carga

Para la construcción de los zancos se utilizó 3 células de carga, como la vista en la figura 4.1, por cada zanco (6 células por par) distribuidas en la superficie de las plantillas de acero de forma que en total se abarcara la mayor superficie posible y no se cree inestabilidades al andar, teniendo dos células en la parte superior de la planta del pie, que abarcan el pulgar y la planta lateral superior, y la última célula ubicada en la zona del talón.



Figura 4.1: Célula de carga (Fuente: Web del fabricante).

La célula de carga utilizada en los zancos se compone principalmente de 3 partes bien diferenciadas (Figura 4.2)

- Base exterior: Soporte que delimita el perímetro exterior de la célula. Consta de 4 agujeros pasantes.
- Cabezal Interior: Protuberancia en la parte interior de la célula. Consta de dos agujeros pasantes y esta unida a la base exterior mediante un puente central, donde se encuentra alojada el sensor de pesaje.
- Puente Central: Une el cabezal con la base exterior. Es el componente que sufre principalmente la deformación a flexión, que se traduce en una variación de la resistencia eléctrica del interior de la célula. Al conocer el cociente del voltaje entrada-salida de la célula, podemos deducir la fuerza que se ha utilizado.

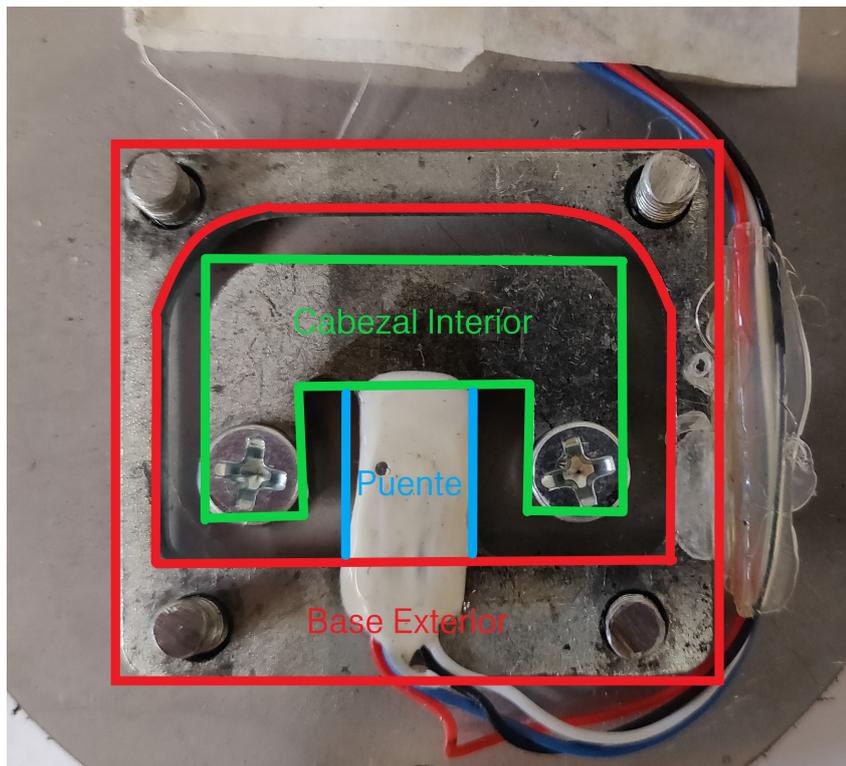


Figura 4.2: Componentes célula de carga.

Las células en cuestión corresponden a la marca DealMux, modelo DLM-B01ERG3HQG.

En cuanto a las características principales, las células están constituidas de una aleación de acero, con unas dimensiones de 42 mm de largo por 38 mm

de ancho y 3 mm de espesor, con una carga nominal de 100kg. Las células contienen en su interior un sensor de pesaje que calcula la fuerza vertical ejercida en función de la flexión del cabezal interior, produciéndose un movimiento relativo entre el cabezal y la base exterior.

Hay que tener en cuenta que para la introducción posterior de la tornillería, para lograr que los zancos de carga tengan el menor espesor posible, se ha realizado un avellanado en los agujeros de la célula de carga. El avellanado tiene lugar en la cara por donde se apoya la cabeza del tornillo.

Todas las características de la célula proporcionadas por el fabricante están numeradas en el cuadro 4.1:

Tabla 4.1: Características de la célula de carga.

DLM-B01ERG3HQG		
Carga Nominal		100 Kg
Ranked de Salida		1,0 +/- 10 % mV/V
No Linealidad		0,08 % FS
Histéresis		0,10 % FS
Repetitibilidad		0,05 % FS
Balance Cero		+/- 1 % FS
Efecto	En Zero	0,05 % FS / 10C
Temperatura	En Zero OUTPUT	0,02 % FS / 10C
Fluencia (30 min)		0,05 % FS
Impedancia	De entrada	1.000 +/- 20 Ohm
	de salida	1.000 +/- 20 Ohm
Aislamiento		>3000 megaohmios / 50V DC
Rango	de Temperatura	-20C - 65C
	de Temperatura Compensado	-10C - 450C
Sobrecarga	Segura	120 % FS
	Última	150 % FS
Excitación	Recomendada	5V
	Última	8V
Dimensiones	Longitud	42 mm
	Anchura	38 mm
	Espesor	3 mm
Longitud de Cable		40 cm
Peso		28 g

4.2. Sistema de sujeción zanco-zapato

Para la sujeción de los zancos de carga al zapato del operario se utilizó como base unos crampones anti-patinaje para camping y escalada (Figura 4.3).

Para el diseño y construcción de los zancos de carga se ha utilizado el perímetro de goma, además de las correas de hilo, que permiten un acoplamiento cómodo y sencillo de la plataforma al zapato del operario.



Figura 4.3: Par de crampones (Fuente: Web del fabricante).

Debido a las limitaciones de tamaño y forma, se han desechado la utilización de los crampones de acero que venían de serie en favor de unos amarres de chapa de acero inoxidable de contorno y dimensiones específicas para permitir una distribución correcta de las células por el contorno de la plantilla de acero, manteniendo en lo mayor de lo posible la distribución de las posiciones originales de las correas (Figura 4.4).

En cuanto a las propias correas, estas se han retirado de la goma principal, recortando y modificando su tamaño si así se ha visto conveniente, para adaptar el sistema de sujeción con amarres.



Figura 4.4: Goma y correspondientes correas, ya modificadas.

4.3. Plantilla de acero

Es la base de donde se asientan los demás componentes de los zancos de carga (Figura 4.5).

Esta constituida por una chapa de acero inoxidable de 0,5 mm de espeso y debe aportar la rigidez justa sin que por ello se pierda la flexibilidad necesaria que permite a la plantilla poder deformarse longitudinalmente, como podría hacer cualquier zapato convencional, de forma que se obtenga la pisada más cómoda y natural posible, permitiendo, en especial una buena deformación en la zona de los metatarsianos.

Además de presentar una serie de agujeros pasantes que permitan la unión entre la plantilla y el resto de componentes, está provista de una serie de agujeros pasantes que permitan una mejor accesibilidad de los tornillos que unen las células de carga con los amarres, facilitando el montaje del sistema. Las formas y dimensiones de la platilla se han obtenido a partir de la suela de un modelo 3D en CAD de unas zapatillas comerciales.

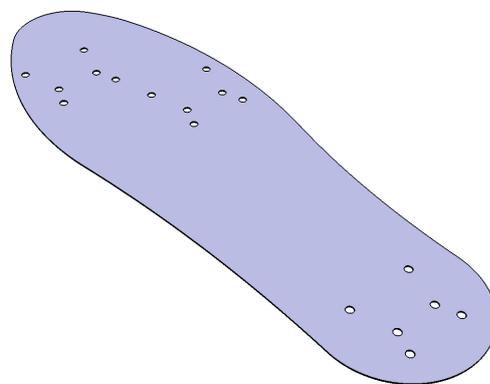


Figura 4.5: Plantilla de acero.

4.4. Suela de caucho

Como unión física entre la plantilla de acero y el suelo de la estructura, se ha optado por colocar una suela de caucho para garantizar principalmente un contacto cómodo entre zanco y estructura.

Dicha suela de caucho posee un espesor de 5mm, ya que en las zonas donde la plantilla de acero debe estar atornillada, se ha realizado una eliminación de caucho, colocando en su lugar una arandela además de la tuerca (cuyo espesor del montante asciende a 3,7 mm, necesariamente de menor espesor que la suela de caucho para evitar que sobresalga) que sujeta la unión. Posteriormente se ha añadido cola termofusible para sellar la zona tuerca-caucho (Figura 4.6).

Para su materialización se ha acudido a un zapatero local, que ha recortado la forma de dichas suelas usando la propia plantilla de acero como patrón, pegando posteriormente ambos componentes con cola de contacto.



Figura 4.6: Vista de la planta inferior con las suelas de caucho montadas en los zancos.

4.5. Amarres

Como sustitución de los crampones de acero del soporte sistema-zapato se ha utilizado una par de amarres de chapa plana de acero inoxidable de 1,5 mm de espesor.

El soporte consta de 2 chapas bien diferenciadas, el amarre frontal (Figura 4.7), al que se le une las 2 células de carga de la parte frontal del pie y los dos pares de correas de sujeción frontales, y el amarre posterior (Figura 4.8) donde va alojada la célula de carga talonar y las correas posteriores. Las formas y curvas de los amarres siguen como base el patrón de la suela de acero a modo de criterio estético, no por ello creando cualquier tipo de incomodidad, y siempre garantizando una perfecta sujeción de las células.

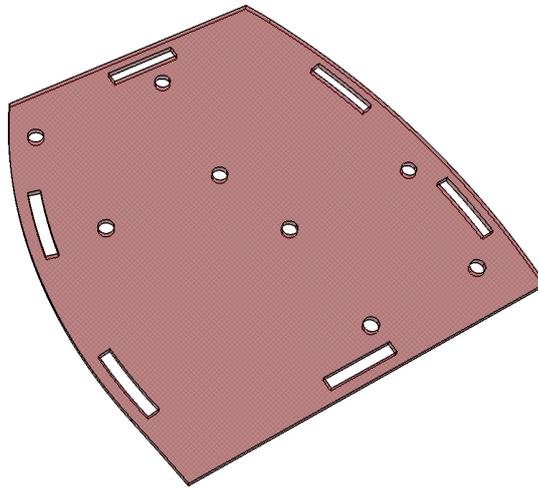


Figura 4.7: Amarre frontal.

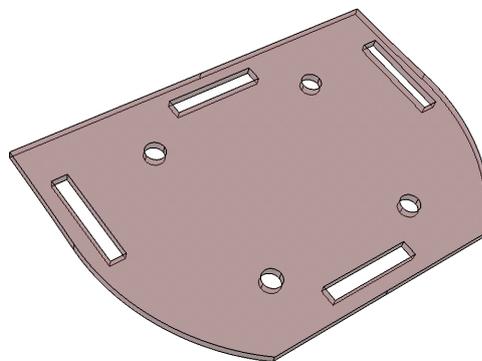


Figura 4.8: Amarre posterior.

4.6. Pletinas de soporte de la célula

El sistema de medición de los zancos de carga se basa en la deformación vertical de la cabeza de las células a modo de flecha. Este método de medición implica que hay que garantizar una holgura de forma que la cabeza de la célula pueda tener un movimiento vertical relativo respecto a la base.

Por este motivo se ha diseñado un subsistema de pletinas de soporte que permitan dicho movimiento relativo. El subsistema se compone de 2 chapas de acero inoxidable a modo de pletinas, teniendo una en la cara superior (Figuras 4.10, 4.11 y 4.12) y otra en la cara inferior de la célula (Figura 4.9).

4.6.1. Pletinas inferiores

Es la pletina que va sobre la cara inferior de la célula, unida rígidamente al cabezal interior. Al mismo tiempo la pletina se encuentra unida a la plantilla de acero, restringiendo cualquier movimiento relativo entre la suela y el cabezal de la célula. Las dimensiones de la pletina deben garantizar que no pueda tener contacto físico posible con la base exterior de la célula. El espesor de estas chapas son de 0,5mm y se pueden poner varias de ellas en serie en función de la holgura necesaria, siendo 3 chapas apiladas (1,5 mm en total) la primera estimación realizada.

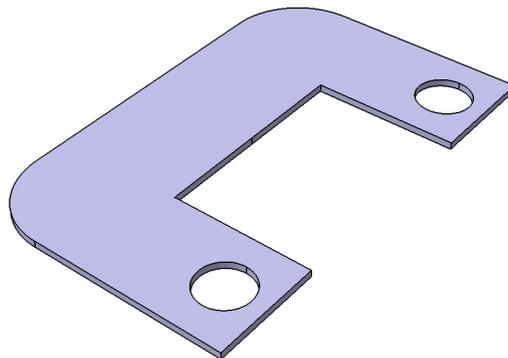


Figura 4.9: Pletina inferior.

4.6.2. Pletinas superiores

Es la pletina que va sobre la cara superior de la célula, estando unido mediante tornillería a la base de esta. La pletina va unida además a la parte inferior de los amarres. Durante el servicio, el peso del operario ejerce un fuerza hacia abajo que se transmite hasta la pletina superior, unido rígidamente a la base de la célula, haciendo que se desplace verticalmente hacia abajo. Como el cabezal interior permanece fijo en todo momento a la suela de acero, se produce un movimiento relativo cabezal-base que se manifiesta en la flexión del puente central del cabezal, deformación cuantificada que se asocia a un determinado valor de fuerza.

La pletina superior debe presentar una abertura central que permita el movimiento del cabezal sin que haya contacto. La forma exterior de las pletinas viene definida por el contorno de la suela, consiguiendo armonía estética pero procurando que la rigidez final de todo el sistema de los zancos de carga no sea muy elevada y permita cierta deformación de la suela al caminar. Asimismo estas piezas presentan un espesor de 1,5 mm. Para cada suela individual se utilizarán 3 pletinas superiores, cada una de una morfología distinta según su colocación espacial.

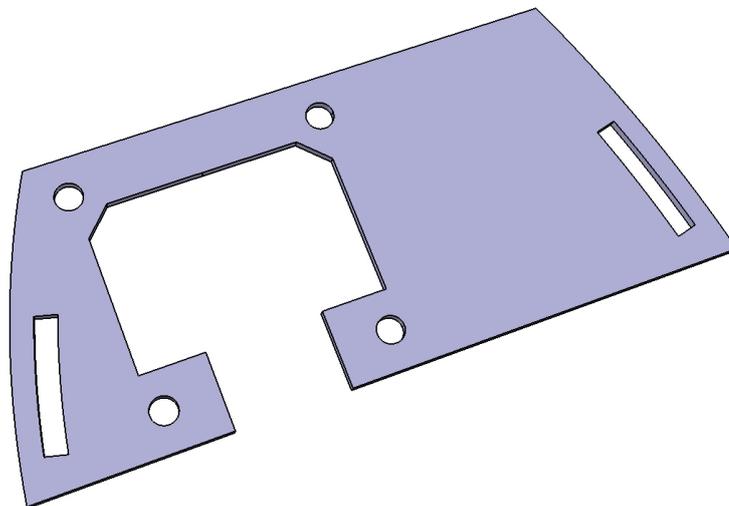


Figura 4.10: Pletina superior de la célula frontal.

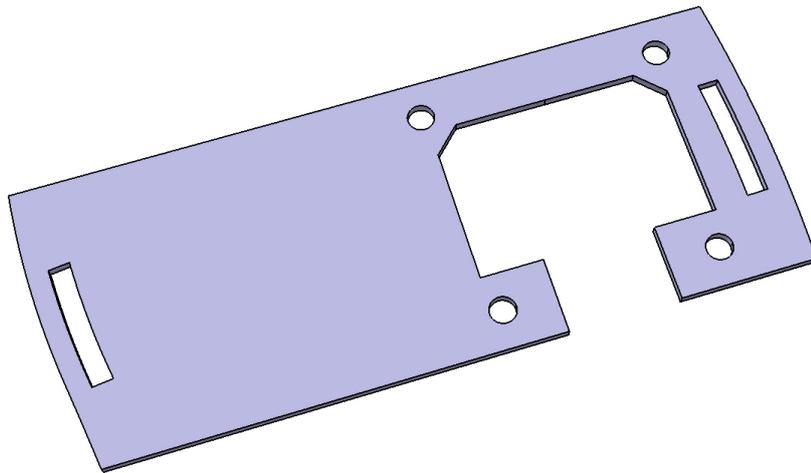


Figura 4.11: Pletina superior de la célula media.

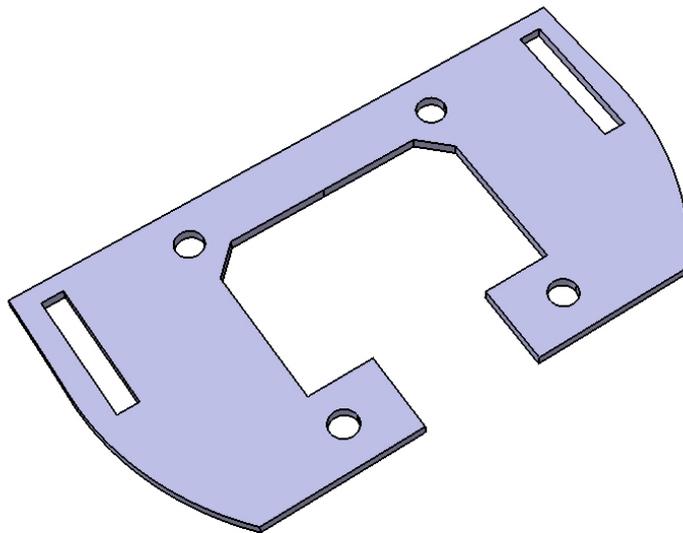


Figura 4.12: Pletina superior de la célula inferior.

4.7. Tornillería

Para la realización de las uniones rígidas entre distintos componentes se han colocado una serie de tornillos pasantes, tuercas y arandelas (Figura 4.13). Se han utilizado un total de 18 tornillos (con sus 18 respectivas tuercas), 6 por célula, de los cuales 4 se ha utilizado para unir la célula con la pletina superior y el amarre, y los otros 2 tornillos restantes se ha empleado para unir la célula con la pletina inferior, la plantilla de acero y la suela de caucho.

Los tornillos y tuercas utilizadas son de métrica M4. Al mismo tiempo la longitud total de los tornillos ha sido reducida por mecanizado con el objetivo de que los zancos de carga ocupe la menor distancia en vertical posible, si bien el espesor de 2,8 mm de las tuercas no se ha modificado para preservar el correcto funcionamiento de la unión.

Para los tornillos, de cabeza plana para avellanados, que unen las células con la pletina inferior y todo el sistema inferior de platilla y caucho, se ha colocado una arandela (hay 6 en total) antes del tornillo para garantizar una correcta distribución de fuerzas, garantizando que la unión no quede aflojada.

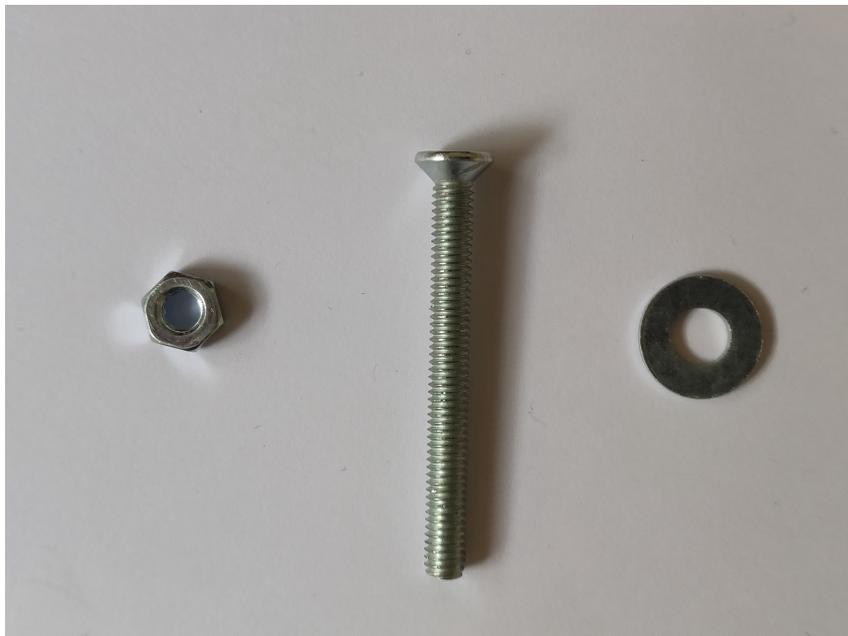


Figura 4.13: Tuerca, tornillo y arandela.

4.8. Sistema de cableado y circuitos eléctricos

Las células de carga cuentan cada una con 4 cables: el primer par cables se encargan de proporcionar el diferencial del voltaje de entrada al sistema, y el segundo par de cables contienen el diferencial de voltaje de salida (en mV). El cociente, en mmV/V , entre la salida y la entrada, depende del valor de las resistencias internas de la célula, que a su vez depende de la deformación de esta.

4.8.1. Cableado del zanco de carga

La función del sistema de cableado es recopilar dicha información de las 3 células, para cada pié, uniendo cada cable de una célula con el cable homónimo de cada una de las otras dos, pasando el sistema de tener 12 cables a 4 cables (dos de alimentación y dos de salida, cada uno se divide en 3; uno por célula) uniendo finalmente los dos pares de cables a un conector hembra de tipo jack de 3,5 mm (Figura 4.14).

Todo el cableado ha sido unido a la plantilla de acero mediante cola termofusible y protegido por una capa de cinta adhesiva de papel para la protección del cableado al contacto de la suela del zapato del operario.

De la plantilla de acero salen los 4 cables principales, unidos y protegidos físicamente mediante cinta adhesiva, hasta el jack, que está unido, también mediante cinta adhesiva, a la goma del sistema de agarre, para una conexión lo más cómoda posible al conector exterior.

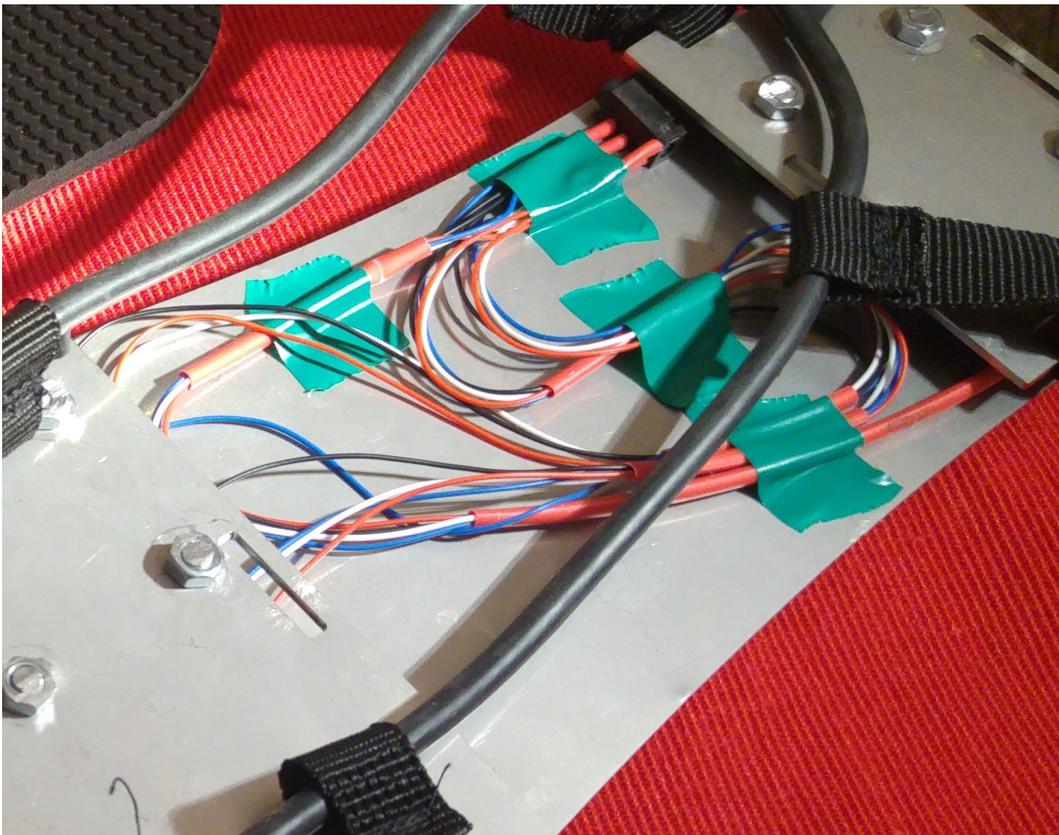


Figura 4.14: Vista del sistema de cableado.

4.8.2. Cableado de unión zancos-Sirius

El sistema de conexión zancos-Sirius consta de los siguientes componentes:

- **Cables jack:** Cada zanco cuenta con un cable macho macho jack 3,5 mm que une cada zanco con el cable principal. El cable posee una longitud nominal de 1,5 metros (Figura 4.15) y va conectado a la conexión hembra del zanco de carga nombrado anteriormente, y conectado también a uno de los cabezales hembra del cable principal.



Figura 4.15: Cable jack 3,5 mm.

- **Cable principal:** Es un cable de 50 m de longitud nominal de 8 hilos, de los cuales cada 4 hilos contendrán la información de uno de los zancos. En uno de los extremos del cable contará con 2 conexiones jack hembra (Figura 4.16), donde se conectarán el cable jack correspondiente a cada zanco de carga. En el otro extremo posee un par de conexiones DB9 (Figura 4.17) que conectan cada zanco de carga al puerto SIRIUS para realizar las pruebas experimentales oportunas.



Figura 4.16: Doble conexión jack 3,5 mm.



Figura 4.17: Doble conexión DB9.

5. Proceso de fabricación

Tras el diseño completo de cada uno de los componentes, dando por bueno las características físicas y morfológicas del producto, se inicia el proceso de fabricación de los zancos, en el que hay que tener en cuenta varios apartados, como el pedido a proveedores, fabricación y montaje final de las piezas:

5.1. Proceso de obtención y fabricación de piezas

A la hora de obtener las piezas generadas por ordenador, se ha recurrido a una empresa externa, LASER EBRO S.L, especializada en corte por láser, para la fabricación de cada una de las chapas metálicas, fabricadas finalmente todas ellas en acero inoxidable.

Para la fabricación de cada pieza se envió un plano del alzado, sin acotar o rotular, en formato DWG (Figura 5.1), de forma que el software de la cortadora láser pudiera reconocer y reproducir la morfología de cada elemento independientemente de la complejidad geométrica que esta tuviera.

También se indicó el proveedor el espesor requerido para cada pieza, en este caso desde 0,5 a 1,5 mm. Las planchas de acero inoxidable utilizadas para el corte fueron proporcionados por la propia empresa proveedora.

Las piezas que finalmente tuvieron que ser cortadas, indicando su espesor y número, han sido:

- Plantillas de acero, de espesor 0,5 mm, 4 plantillas.
- Amarres, de 1,5 mm de espesor, 1 par de amarres frontales y otro par trasero.
- Pletinas inferiores, de 0,5 mm, 12 unidades.
- Pletinas superiores, de 1,5 mm, un par de cada subtipo (frontal, media y talonar)

Por norma general cada pieza ha sido fabricada 2 veces, uno para cada par de los zancos, a excepción de las plantillas de acero y las pletinas inferiores. En caso de las plantillas de acero se realizó un segundo par en previsión de necesitar un par de suelas como modelo para la fabricación de las suelas de caucho, que se tenía que realizar por medios externos al departamento.

Para las pletinas inferiores se mandó fabricar múltiple números de ellas, para ajustar posteriormente el número necesario de ellas, en función de la holgura necesaria, al desconocer a priori la reducción de juego producida por las cabezas de los tornillos que sobresaldrían de la célula, una vez realizado todo el montaje, teniendo en cuenta, además, que los taladros de la célula de carga tenían que ser avellanados. De esta forma, se podían unir hasta 3 pletinas en serie, logrando un espesor total de 1,5 mm.

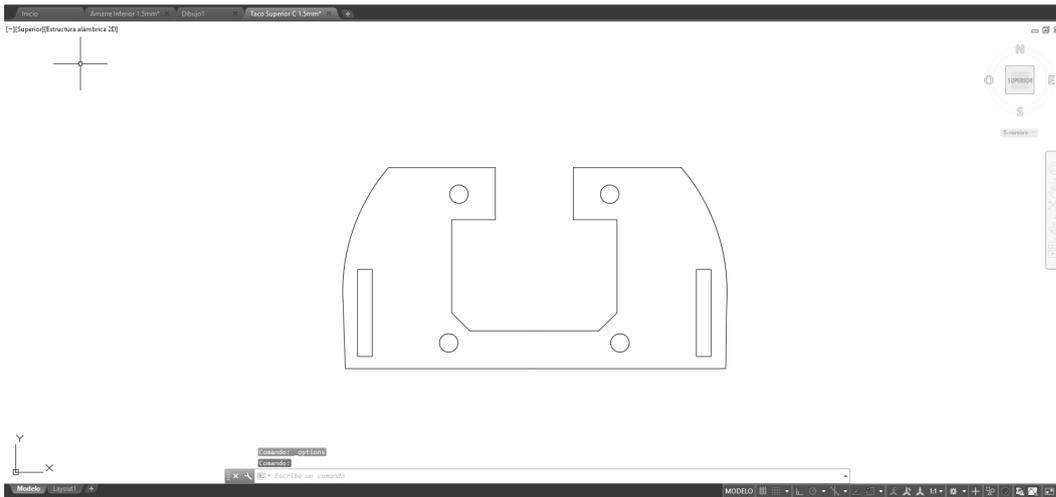


Figura 5.1: Lectura del archivo DWG de una pletina superior talonar.

En cuanto al resto de piezas a excepción de las suelas de caucho, como serían las células de carga, los crampones de acero, los tornillos, las tueras o las arandelas, fueron proporcionadas por el propio laboratorio de estructuras y construcciones industriales, como material almacenado o excedente de otros proyectos o investigaciones.

Para la fabricación de las suelas de caucho, se recurrió a los servicios de una tienda de reparación de calzado local. Utilizando y entregando el primer par de plantillas de acero como modelo, e indicando que la suela tenía que ser de 5 mm de espesor, se recibió finalmente las suelas, cortadas según el contorno de la suela de acero inoxidable y directamente unidas a ellas mediante cola de contacto.

5.2. Errores de forma derivados del estudio metrológico

Tras el corte de la piezas por láser, durante la comprobación de piezas, previa al montaje, se observó que los taladros de dichas piezas de acero inoxidable no eran lo suficientemente grandes para una entrada limpia de los tornillos de métrica 4.

Para la determinación de los diámetros de dichas piezas se utilizó como patrón el diámetro de los taladros de las propias células de carga, con una medida inicial obtenida de 3,8 mm de diámetro. Sin embargo los tornillos entraban con una holgura adecuada en los taladros de la célula de carga. Esta diferencia de cota entre los taladros de las piezas cortadas por láser y la célula de carga se podía deber a 2 posibles causas:

- Las medidas obtenidas con el pie de rey (Figura 3.2) poseen un error de corrección elevado.
- Las medidas de las piezas cortadas por láser no respetan fielmente las medidas de las piezas generadas tridimensional.

Para resolver la problemática se recurrió al proyector de perfiles (Figura 3.3), propiedad del departamento de metrología y calidad industrial, para realizar una serie de medidas, con mayor fiabilidad, tanto de las piezas fabricadas por láser como de las propias células de carga.

Las conclusiones obtenidas de dicho análisis fueron:

- Las medidas obtenidas de las piezas cortadas por láser corresponden con gran fidelidad a las medidas generadas por ordenador durante el proceso de diseño.
- Las medidas realizadas en las células de carga presentan diferencias notables en valor numérico al obtenido con el pie de rey digital, dependiendo, además, si fueron medidas exteriores o interiores. Para la determinación de los diámetros se obtuvo, mediante el proyector de perfiles, que la medida del diámetro de los taladros de las células eran de 4,35 mm.

Teniendo en cuenta este último punto, en cuanto a los errores de medida del pie de rey se llegó a las siguientes conclusiones:

- Las medidas exteriores (Figura 5.2) del pie de rey presentaban un error de corrección no mayor de una décima de milímetro. Estas medidas correspondían a las mayoría de medidas tomadas de la célula, especialmente en todo tipo de elementos exteriores. Dicho error no afecta de forma significativa al montaje de las piezas.



Figura 5.2: Ejemplo de medida exterior con el pie de rey digital.

- Las medidas interiores (Figura 5.3) realizadas con el pie de rey presentan un error de corrección de 0,55 mm, dando unas medidas mucho menores a las reales. Estas medidas corresponden, principalmente, al diámetro de los taladros (se midió 3.8 mm en lugar de 4,35 mm) y a la posición de los mismos respecto a la base de la propia célula, que si bien eran medidas exteriores, calculando la distancia desde la cara interior del taladro hasta una cara exterior, bien del cabezal o la base, había que sumar el radio medido del propio agujero, que poseía un defecto de 0,225 mm.



Figura 5.3: Ejemplo de medida interior con el pie de rey digital.

Debido a estos errores de medición, que han sido plasmados en la geometría de las piezas de acero inoxidable, se presentan 2 problemas derivados:

- Los agujeros de las piezas de chapa metálicas son demasiado pequeños, de forma que un tornillo M4 no puede ser pasante.
- Las posiciones de los agujeros, normalmente agrupadas dos a dos (en el cabezal) o cada 4 (base exterior), de las piezas de acero inoxidable están desalineadas respecto a los taladros de las células, por lo que los tornillos no pueden encajar de forma óptima en el montaje.

La solución de ambos contratiempos pasa por el mecanizado de las piezas, aumentando el diámetro de los agujeros y ganando la suficiente holgura de forma que los tornillos puedan ser pasantes, al mismo tiempo que dicha holgura permita que desaparezcan los desalineamientos y en consecuencia los tornillos puedan entrar perfectamente rectos y paralelos unos respecto de otros.

5.3. Mecanizado y Rectificado de piezas

Antes de dar paso al montaje final, se tuvo que realizar las modificaciones oportunas en cada una de las piezas, según fueran oportunas, pudiendo distinguir dos procesos distintos:

5.3.1. Avellanado de las células

Con el objetivo de que la cabeza de los tornillos sobresalgan lo menos posible, de forma que se obtenga la mayor holgura posible, y por tanto, el menor espesor final posible, se han avellanado cada agujero de la célula de carga, de forma que los tornillos se posen sobre la superficie avellanada, de una abertura de 90 grados.

Teniendo en cuenta la distribución de tornillos y piezas a unir respecto a las partes superiores e inferiores del zanco, los avellanados en la cabeza de la célula se han realizado en la cara superior (Figura 5.4), mientras que los avellanados de la base han correspondido a la superficie interior. Para ello se ha utilizado como instrumento el taladro con la broca lima.

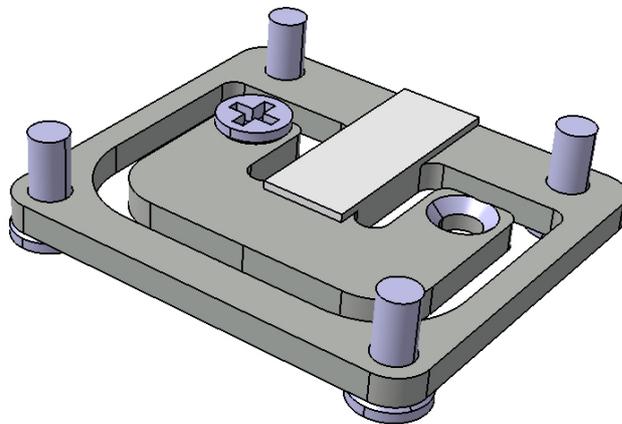


Figura 5.4: Representación en CAD del resultado tras el avellanado.

5.3.2. Rectificado y arreglo de las chapas de acero inoxidable

Debido a los errores dimensionales generados, se dispuso, mediante el uso del taladro con un broca de gran diámetro nominal (Figura 5.6), a aumentar el diámetro nominal de cada una de las piezas hasta poder obtener la holgura necesaria que permitiera realizarse el montaje de los zancos (Figura 5.5).

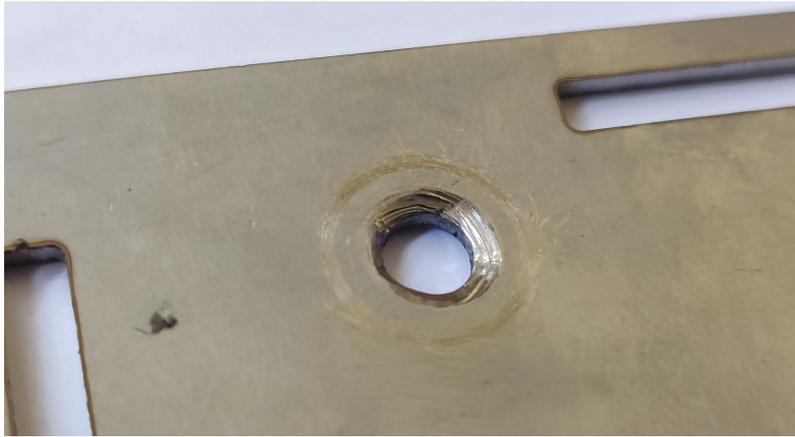


Figura 5.5: Resultado del mecanizado en el amarre talonar.

El mecanizado se aplicó en ambas caras de las piezas, utilizando la broca lima en algunos casos (Figura 5.7).



Figura 5.6: Mecanizado de una pletina superior.



Figura 5.7: Mecanizado mediante broca lima.

Al realizar el mecanizado se observó que las pletinas inferiores, piezas endebles de pequeño espesor y poco tamaño, sufrían deformaciones muy severas (Figura 5.8), haciéndolas totalmente inservibles. Debido a este contratiempo, se optó por sustituir dichas pletinas por el uso de tuercas, que serían colocadas entre la cara inferior de la célula de carga y la suela de acero inoxidable.



Figura 5.8: Deformación de la pletina inferior provocada por el mecanizado.

En el caso de algunas piezas fabricadas en láser se tuvo que realizar, a mayores, un lijado de la superficie, debido a la presencia de pegaduras en el metal, derivado del proceso de corte.

5.4. Montaje

Tras los mecanizados de las células de carga y el resto de piezas, se dio paso al montaje del zanco.

El primer paso consistió en introducir todos los tornillos en sus respectivos huecos avellanados en la célula, sin atornillarlos con tuercas por el momento, obteniéndose un caso similar al que se puede ver en la figura 5.9. Todos los tornillos deben poder ser colocados en el primer paso, pues de otra manera, al montar la parte superior o inferior del zanco, posteriormente los tornillos encargados de la unión opuesta no podrían ser físicamente colocados en su lugar.

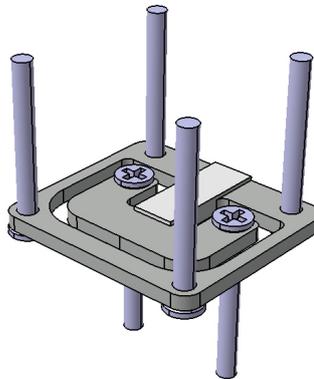


Figura 5.9: Inclusión de los tornillos en la célula.

El siguiente paso fue el montaje entero de toda la parte superior. Sobre la superficie superior de cada célula de carga se colocaron sus correspondientes pletinas superiores (Figura 5.10), asegurando que cada tornillo quede perfectamente pasante en su respectivo agujero.

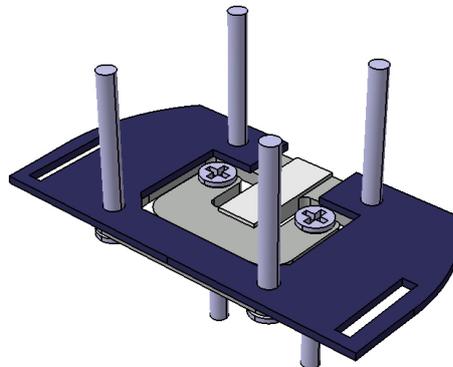


Figura 5.10: Inclusión de la pletina superior.

Posteriormente se repitió el proceso pero añadiendo los amarres. Hay que tener en cuenta que el amarre frontal es común a dos células de carga (Figura 5.11). Tras este paso se colocó, sobre los amarres, la tuerca en cada unión correspondiente y se realizando el par de apriete oportuno, finalizando la unión.

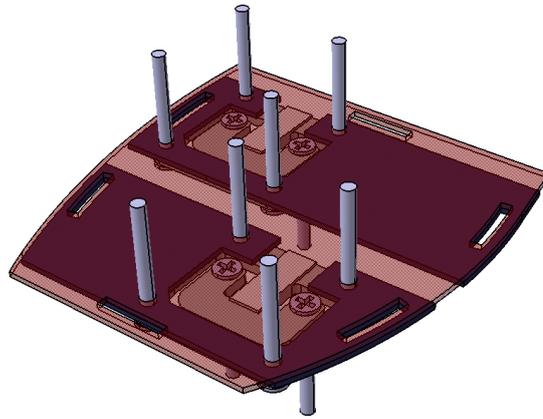


Figura 5.11: Montaje del amarre frontal.

Una vez finalizado la unión superior, se dio paso a la unión inferior. El primer paso fue introducir las tuercas que sustituirán a las pletinas inferiores, ya que no se pudieron mecanizar, obteniendo un montaje tal como se puede ver en la figura 5.12. Estas tuercas no se encargan de dar fuerza a la unión, sino simplemente se colocan en contacto físico con la célula de carga y la plancha de acero, aportando la holgura que necesita el sistema.

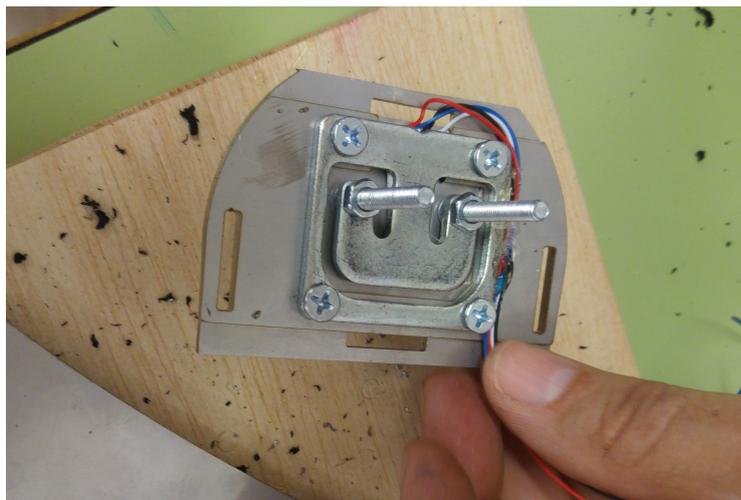


Figura 5.12: Montaje de las tuercas como sustitución de las pletinas inferiores.

Tras esto el siguiente paso fue unir cada célula, con sus correspondiente

piezas ya montadas, con la plantilla de acero (Figura 5.13¹).

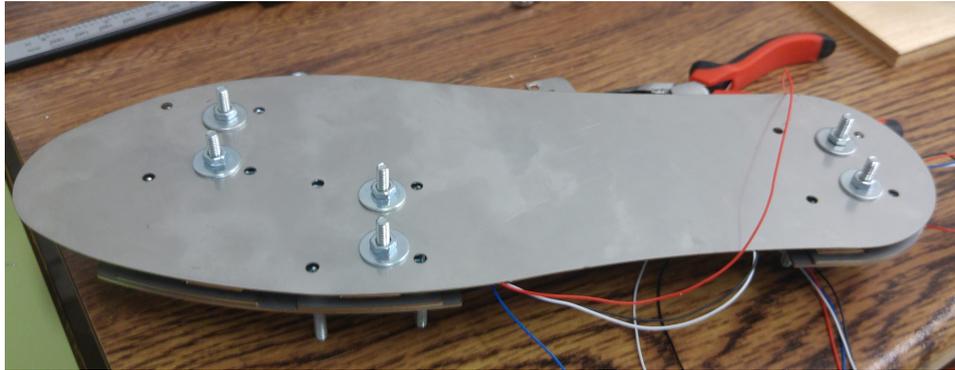


Figura 5.13: Montaje de la plantilla de acero.

La plantilla de acero ha tenido que ser previamente unida a la suela de caucho mediante cola de contacto, además de realizar los agujeros pasantes en el caucho, aprovechando los taladros marcados en la plancha de acero inoxidable.

Tras unir la suela con el resto de montante, se mecanizan los agujeros realizados en el caucho, aumentando su diámetro, hasta que tenga el tamaño suficiente para introducir en ellos una arandela. Finalmente se colocaron las tuercas, se dio el par de apriete a la unión y se selló con el resto de la suela de caucho mediante cola termofusible (Figura 5.14), no sin antes recortar los salientes de los tornillos respecto a las tuercas, tanto de la unión superior como inferior, mediante la sierra radial.



Figura 5.14: Sellado de la unión con cola termofusible.

¹En esta imagen se montó, además, las arandelas y tuercas, de forma previa a la suela de caucho. Esto no puede ser posible, y tanto los elementos de unión como la suela de acero debieron de ser retiradas para la unión de la plantilla de acero con la suela de caucho.

A la hora de conectar el cableado, teniendo en cuenta que cada célula posee 4 cables distintos (dos de alimentación y otros dos de lectura) se ha realizado la unión de cada cable homónimo, pasando de 12 a 4 cables (Figura 5.15), de forma que el sistema de adquisición de datos reconociera las señales como si de una sola célula de carga se tratara.

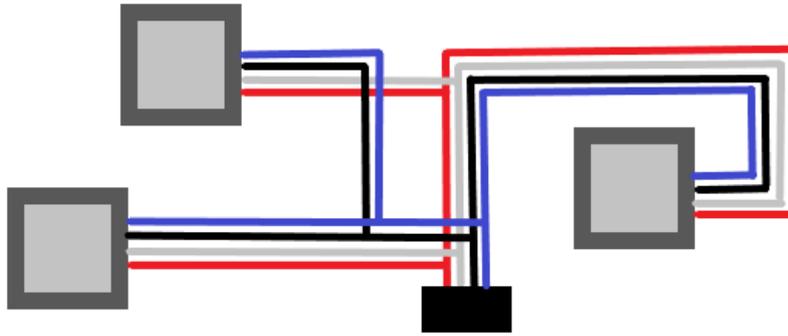


Figura 5.15: Esquema básico del cableado.

Para asegurar la integridad del cableado y que se encontrara fijo y sin mucha libertad, se ha realizado una serie de adhesiones al metal mediante la pistola termofusible, creando una serie de pegaduras, tanto en las pletinas superiores, en caso de que el cableado se encuentre en el entorno de la célula (Figura 5.16), como en la suela de acero (Figura 5.17).

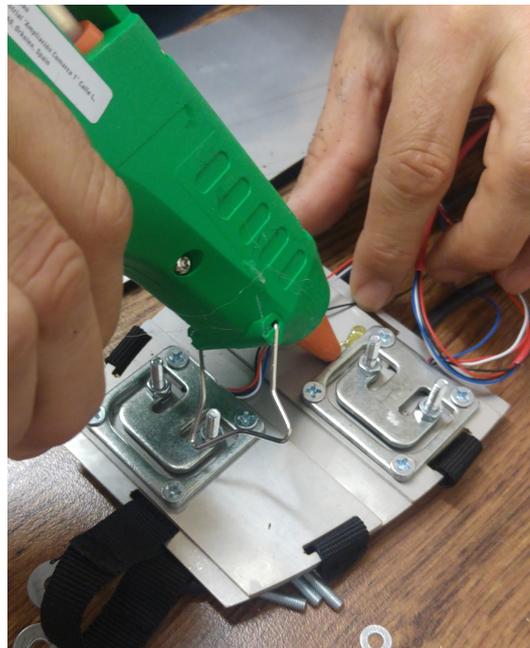


Figura 5.16: Unión del cableado a las pletinas superiores mediante cola termofusible.

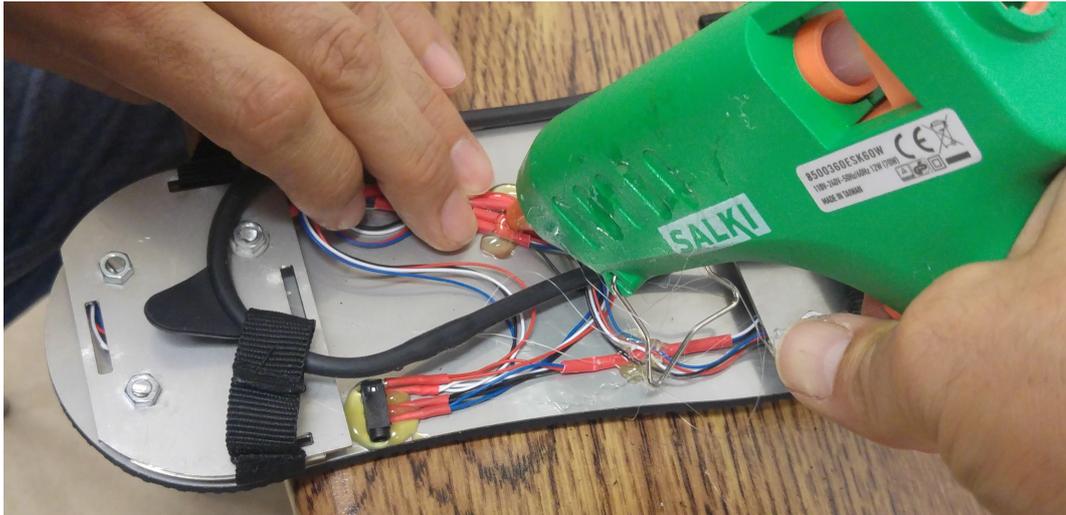


Figura 5.17: Unión del cableado a la suela de acero mediante cola termofusible.

Para finalizar el cableado se ha colocado una adhesiva por encima para protegerlo.

Para colocar el sistema de sujeción zanco-zapato, se ha debido de cortar previamente cada una de las correas del moteja original con los crampones, recorriendo su longitud en función de las necesidades de diseño. A continuación se han unido las correas con el resto del zanco, pasando las correas por las hendiduras de los amarres y las pletinas, y cosiendo los extremos de las correas para formar la unión.

Finalmente se ha colocado la conexión jack de 3,5 mm sobre la goma², para que el posterior cableado del sistema de adquisición de datos sea lo menos molesto posible, uniendo los 4 cables finales al conector, protegidos por cinta aislante (Figura 5.18).



Figura 5.18: Colocación del conector jack de 3,5 mm en el entorno de la goma.

²En la figura 5.17 el conector se encuentra sobre la suela de acero. Esta posición era provisional y se modificó posteriormente.

Una vez finalizado el montaje, se comprobó que el acoplamiento al zapato de operario era cómodo y adecuado (Figura 5.19), dado por finalizado el proceso de fabricación de los zancos.



Figura 5.19: Zanco de carga acoplado al zapato del operario.

6. Experimentación

Para el estudio del comportamiento de los zancos de carga se ha utilizado un equipo de adquisición de datos Sirius (Apartado 3.2.3) que permite registrar la fuerza con la que el operario aplica sobre la estructura.

Los objetivos principales de estos ensayos son:

- Obtener una serie de GRFs mediante los zancos de carga y comparar dichas funciones con las funciones teóricas de forma cualitativa.
- Realizar una toma de datos de GRFs simultáneas entre los zancos de carga y la plataforma de fuerza (Figura 3.10), comparando dichos resultados de forma cuantitativa.

6.1. Configuración de los equipos

Previo a la realización de los ensayos se tuvo que realizar los montajes de cableado y configuración del software oportunas. El primer paso a realizar fue la conexión de los zancos de carga al sistema de adquisición de datos. Sobre el conector de cada zanco (Figura 5.18) se conecta el cable jack (Figura 4.15), que a su vez se conecta al cable principal, común a los dos zancos (Figura 4.16). En el otro extremo del cable principal se encuentran las dos conexiones DB9 (cada una se encarga de llevar el registro de datos de un zanco distinto) que se conectaron al Sirius. El proceso es idéntico para la conexión de la plataforma de fuerza (Figura 6.1).



Figura 6.1: Conexión de cada cabezal DB9 a el sistema de adquisición de datos Sirius.

A la hora de acoplar los zancos al operario, se tuvo en cuenta que la disposición de los cables, tanto de los jack de 3,5 mm como del cable principal de 50 metros, fuera lo menos molesta posible para el operario, además de que se encontraran lo más fijados posibles, para que se pudieran realizar ensayos de paseos de media distancia (más de una decena de pasos) sin que el operario tuviera riesgo de tropezarse con los cables y dañarlos accidentalmente.

De esta forma, se realizó el montaje que se puede ver en la figura 6.2. En él, cada cable jack fue guiado por la pierna de su zanco correspondiente, conectando con el cable principal a la altura de la cintura. El cable principal se encuentra rodeando el cuello del operario para después bajar a la altura del suelo, para finalmente conectarse con el sistema de adquisición de datos.



Figura 6.2: Acoplamiento completo de zancos y cableado al operario para la realización de ensayos.

Una vez conectados cada sistema a la Sirius, el siguiente paso consistió en configurar el propio Sirius para una correcta lectura de los datos [12]. Primero había que reconocer que canales, de los 16 que dispone la tarjeta, se estaban utilizando para la toma de datos. Para ello hay que utilizar la pestaña /Measure /Ch.setup /analog in, donde se muestran todos los canales, seleccionando aquellos que eran de interés. En caso de la figura 6.3, en el que se realizaba un ensayo comparando la respuesta de un zanco con respecto a la plataforma, se activan los canales 1 y 4, donde se encontraban situados respectivos sistemas.

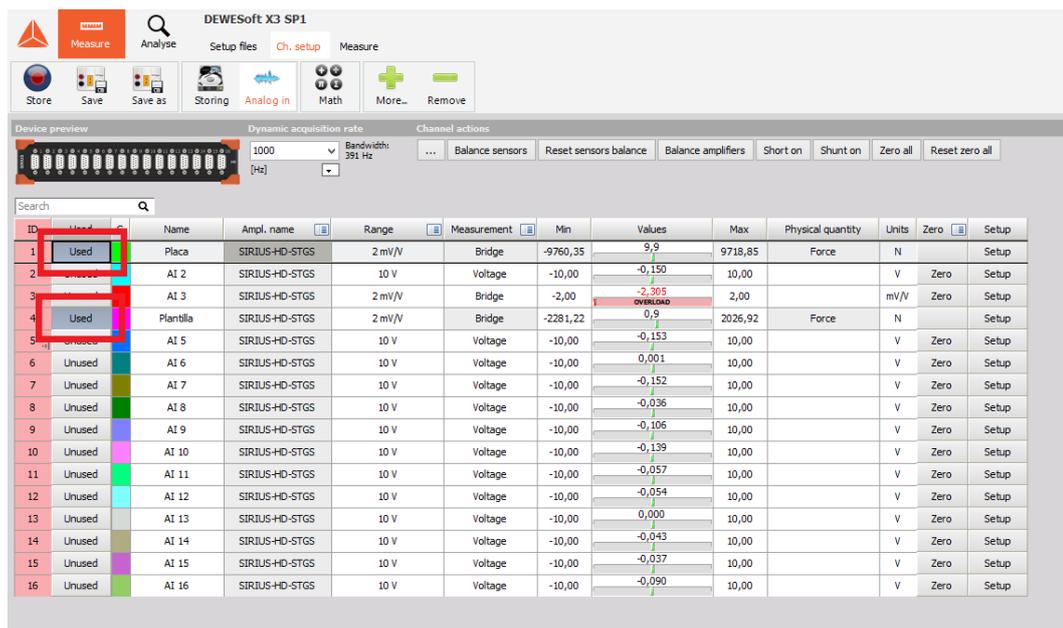


Figura 6.3: Pestaña de selección de canales del sistema de adquisición de datos Sirius.

Una vez activado el canal había que configurarlo para que el Sirius tuviera una lectura correcta de la señal. Para ello se seleccionó, para cada canal, la opción Setup, abriendo una ventana auxiliar como la mostrada en la figura 6.4. En dicha ventana se realiza toda la configuración de cada uno de los aparatos de medida. En este caso, al tratarse de células de carga, se indicó que estaba utilizando transductores de tipo puente de Wheatstone (Apartado 2.2), además de otras indicaciones como el rango de medida, la frecuencia y el tipo de filtrado entre otras opciones.

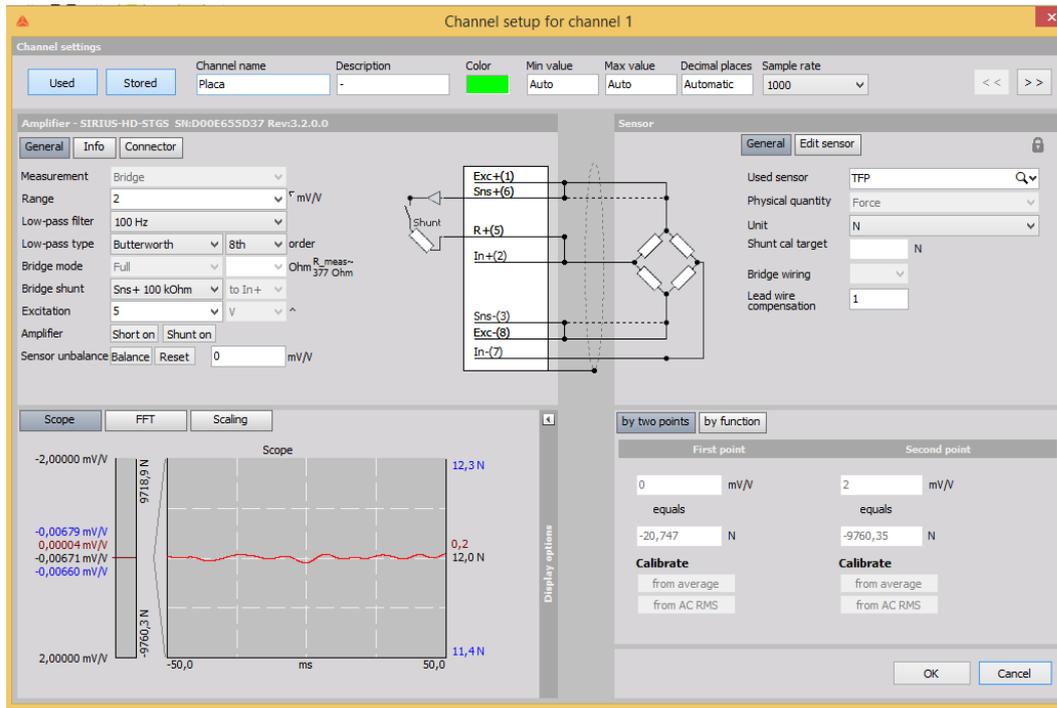


Figura 6.4: Ventana auxiliar Setup para la configuración de los canales.

Seguidamente había que calibrar las señales recibidas, para una lectura real de la fuerza, captada en términos cualitativos, ya que por defecto las señales dan valores de fuerza sin escala, además de que pueden proporcionar un valor alejado del origen cuando no se le aplica carga alguna.

El método de calibración que se ha utilizado es el de calibración por dos puntos, que consiste en que el aparato de medida proporciona qué señal, en mV/V , capta cuando dos patrones de masa conocida ejercen cierto peso sobre el aparato de medición. Para cada punto se indica manualmente cuantos Newtons reales han correspondido a cada valor de tensión. De esta forma la relación tensión-fuerza sigue una recta (al tratarse de un puente de Wheatstone) perfectamente calibrada y centrada en el origen. En la figura 6.5 muestra la calibración del zanco, de forma que para 0 mV/V de entrada le correspondían $-127,152 \text{ N}$ de salida, de la misma forma que para 2 mV/V le correspondían $2026,92 \text{ N}$.

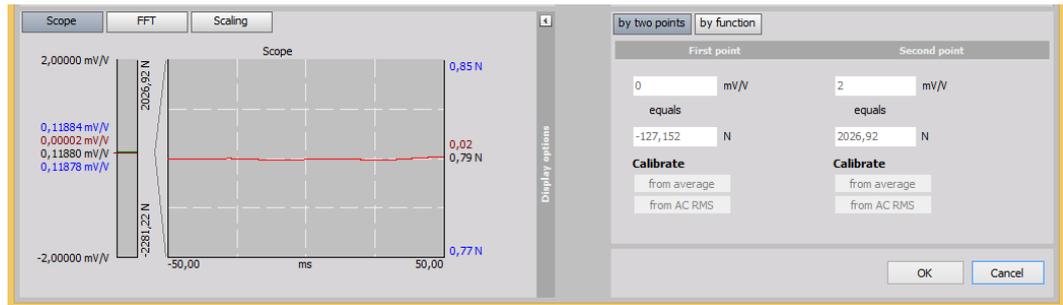


Figura 6.5: Calibración de la señal mediante dos puntos.

Finalmente, ya con cada puerto seleccionado y debidamente configurado, se procedió a la toma de datos (Figura 6.6), indicando previamente algunos parámetros de muestreo, como su resolución, que magnitudes mostrar en pantalla y que escala, logarítmica o lineal, se representa en cada eje.

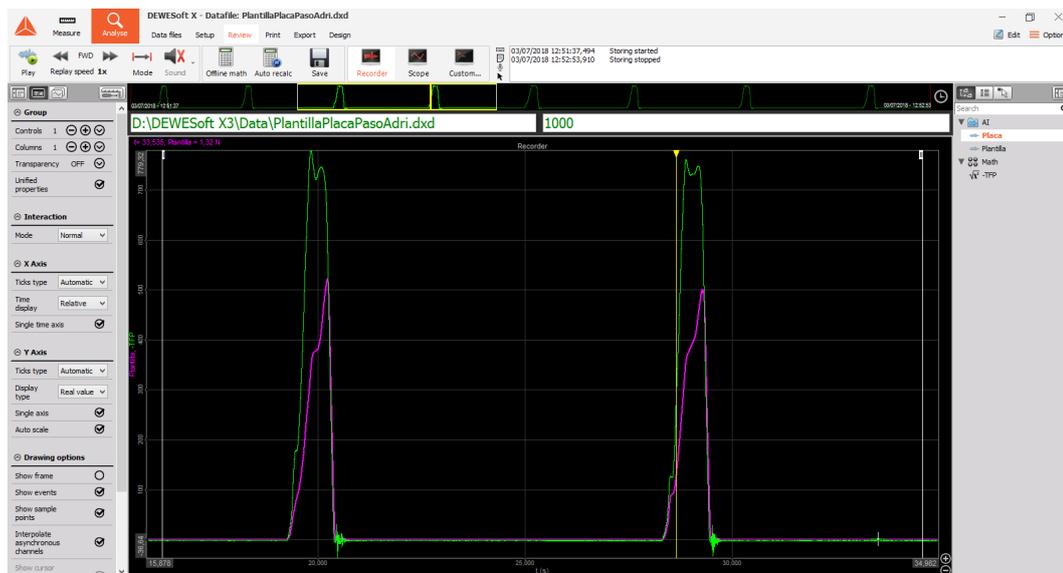


Figura 6.6: Ejemplo de señales de zanco y plataforma de fuerza registradas por el Sirius.

6.2. Ensayos

Para comprobar el funcionamiento de los zancos de carga se ha realizado un total de 4 ensayos distintos, los cuales han sido:

- Captación de pasos individuales mediante la plataforma de fuerza.

- Captación de pasos individualizados mediante los zancos de carga.

- Registro comparativo del peso que ejerce una persona sobre un zanco y la plataforma de carga.

- Registro comparativo de pasos individualizados entre zancos y plataforma.

6.2.1. Captación de pasos individuales mediante la plataforma de fuerza.

En este ensayo el operario o peatón ha realizado una serie de pasadas por la plataforma de fuerza. Para captar los pasos individualizados, el peatón solo ha podía pisar la plataforma con un pie, en este caso el derecho. Para facilitar la comodidad del ensayo, se colocó otras dos plataformas, una a cada lado de la tabla principal, para que la altura del entorno de ensayo fuera lo mas uniforme posible, consiguiendo que los pasos fueran lo más naturales posibles. De esta forma, se ha obtenido una serie de señales que presentan la forma que se puede ver en la figura 6.7.

Se observa que la señal que representa la fuerza ejercida por un peatón sobre la plataforma, de forma cualitativa, se asemejan a la señal esperada en base a teoría de las GRFs [15]. Esto asegura, al menos de forma cualitativa, la fiabilidad de la plataforma para los ensayos posteriores.

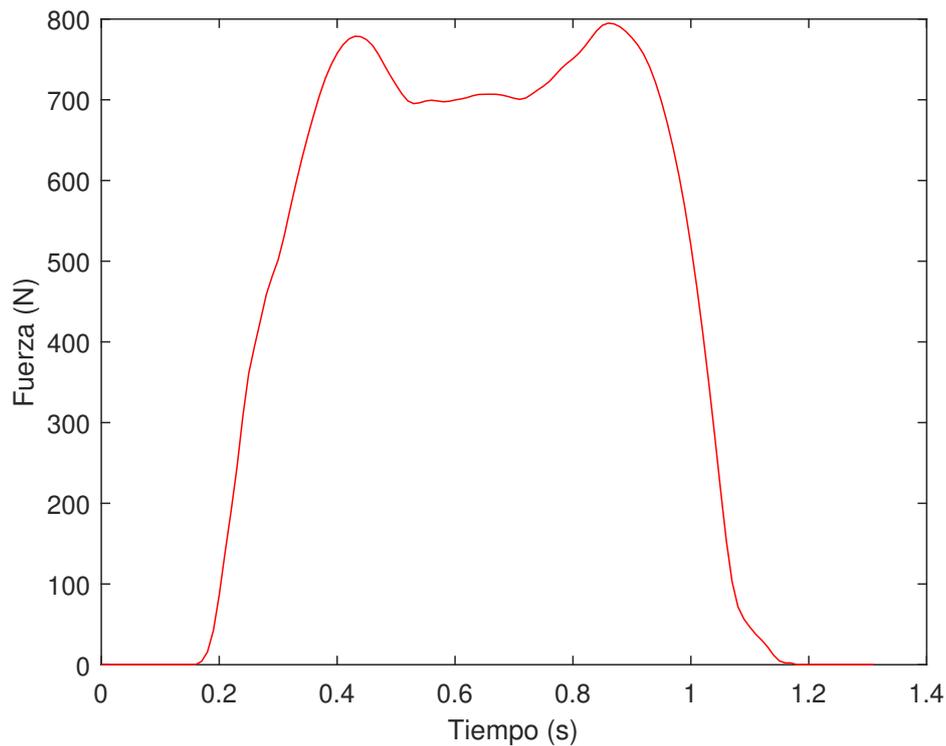


Figura 6.7: Representación de la fuerza ejercida al pisar la plataforma con pasos individualizados.

6.2.2. Captación de pasos individualizados mediante los zancos de carga.

El segundo ensayo consistió en realizar una serie de pasos, en línea recta, con los zancos colocados. Se ha registrado individualmente la señal generada por cada zanco, con la posibilidad de realizar la suma de las fuerzas registradas por cada zanco posteriormente. De esta forma, los registros obtenidos, según cada par de zancos, han tenido los siguientes resultados:

- **Zanco derecho:**

La señal obtenida posee una evolución de la aplicación de la fuerza totalmente distinta a la que se podría esperar, aún teniendo en cuenta que las posibles incomodidades del zanco pudieran modificar ligeramente la mecánica del operario.

Como se puede ver en la figura 6.8, la señal obtenida no describe la forma típica de estas funciones, como la obtenida con la placa, presentando una función de marcada simetría con dos máximos de parecida altura, separados por un valle. En esta caso la función, de tendencia ascendente, presenta los dos máximos a muy distintas alturas, incluyendo un tercer máximo, al inicio de la señal. Este máximo coincide con un golpe repentino que se produce al pisar en el talón, debido a que el agarre en esa zona no es óptimo, y el talón del zanco pierde el contacto físico con la suela del zapato, de modo parecido al que sucede al llevar unas chanclas.

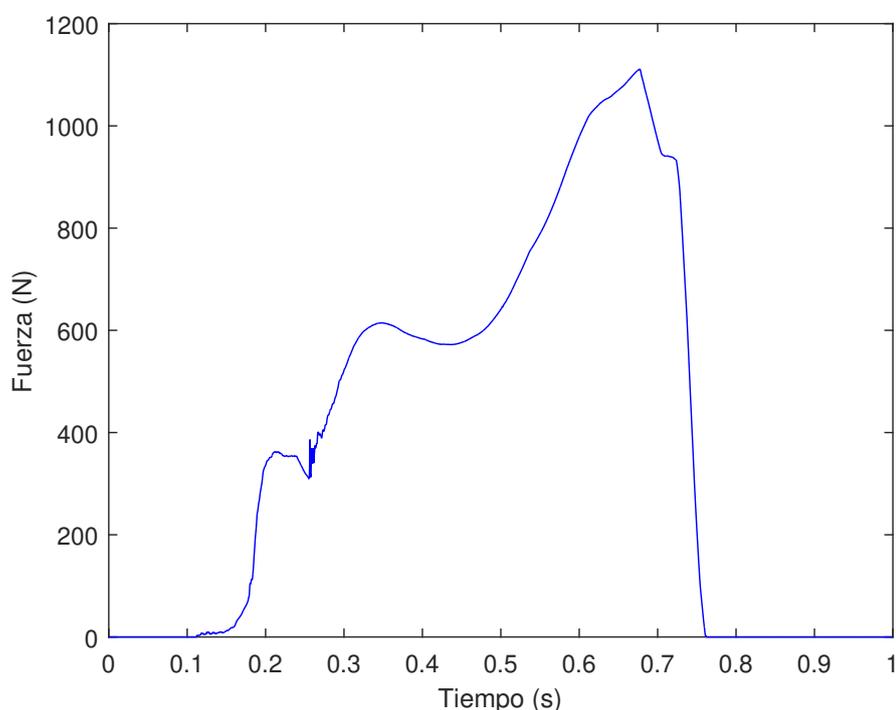


Figura 6.8: Representación de la fuerza ejercida al pisar con el zanco derecho.

■ Zanco izquierdo:

En el caso del zanco izquierdo, el resultado obtenido es similar al obtenido en el zanco derecho, con la diferencia de que el pico máximo inicial es considerablemente más pronunciado (Figura 6.9). Esto se debe a que el agarre en la parte trasera del zanco era, por motivos de fabricación y montaje de las correas, mucho más débil con respecto al otro zanco. Como resultado el efecto chancla o caída del talón del zanco durante la elevación y posterior golpe brusco en la pisada, era significativamente más acusado.

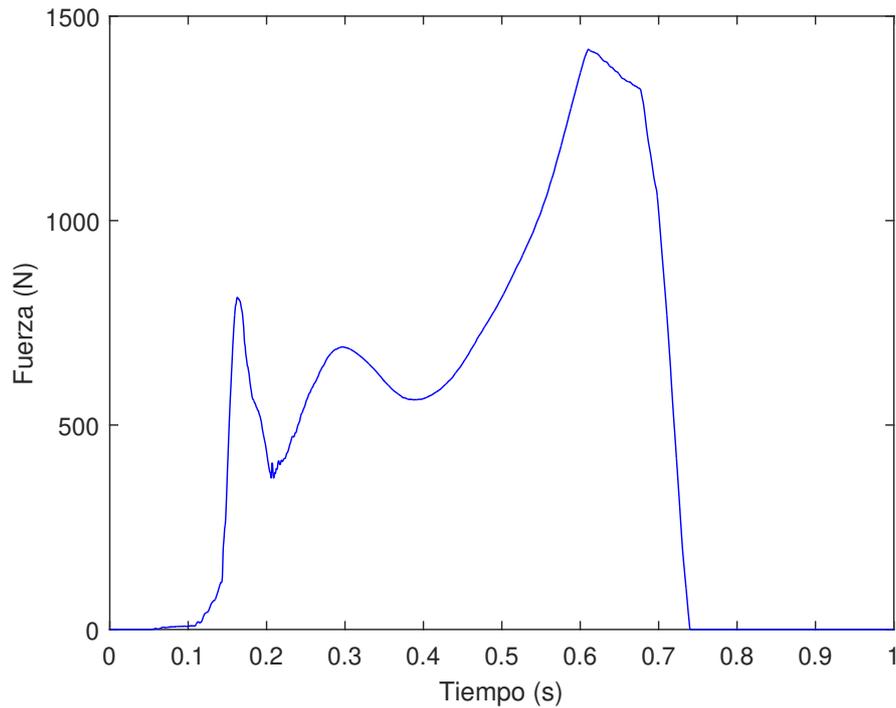


Figura 6.9: Representación de la fuerza ejercida al pisar con el zanco izquierdo.

6.2.3. Registro comparativo del peso que ejerce una persona sobre un zanco y la plataforma de carga.

Este ensayo ha consistido en la comparación directa de las señales generadas por propio peso del operario, recogida simultáneamente por la plataforma y el zanco. Para ello el operario, con el zanco derecho puesto, se ha apoyado, solo con la pierna diestra, sobre la plataforma. Si bien es un ensayo principalmente estático, las variaciones de la fuerza aplicada, producto de los juegos del equilibrio del operario al apoyarse solo con una pierna, deben de haber sido captadas por igual en ambos sistema.

El resultado obtenido está representado en la figura 6.10. En ella se ha comparado las señales de la plataforma de fuerza y el zanco de carga. Se ha observado que desde muy bajas fuerzas se empieza a manifestar una diferencia notable en los valores obtenidos entre ambos sistemas. Si bien la señales son parecidas a grandes rasgos, no siguen de forma idéntica la variaciones producidas por los ejercicios de equilibrio del operario, lo que descarta un posible fallo de calibración del zanco en favor de una latente pérdida de información.

En cuanto a los valores de fuerza, los valores obtenidos por la plataforma, del entorno de los 800 N, que equivalen a algo menos de 80 kg de fuerza, se ajustan de forma fiel al peso real del operario. En cuanto a los zancos, dicho valor se encuentra entre los 500 y 600 N, muy alejado del valor real.

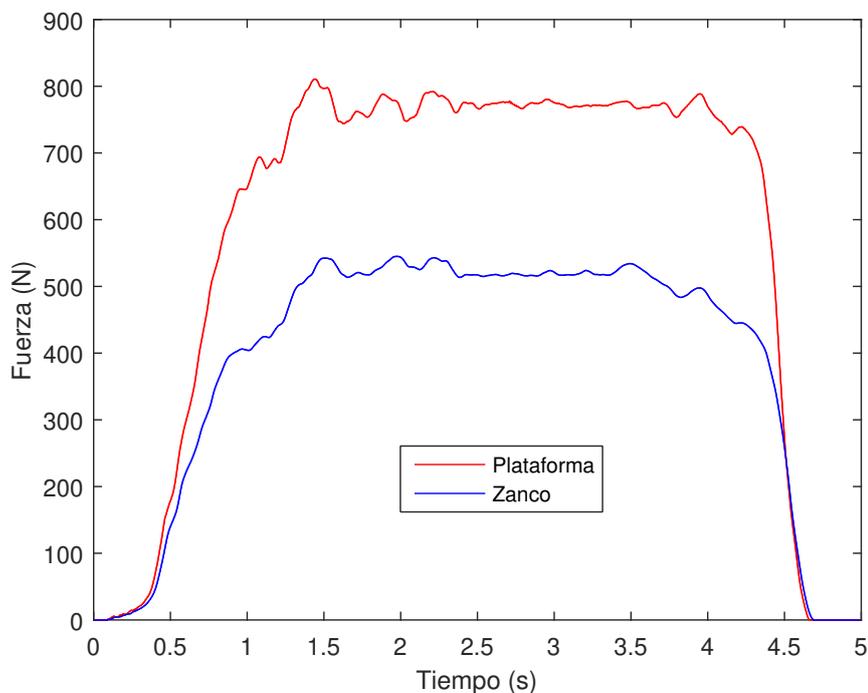


Figura 6.10: Representación de la fuerza ejercida al pisar la plataforma con pasos individualizados

6.2.4. Registro comparativo de pasos individualizados entre zancos y plataforma.

En este último ensayo se ha basado en repetir el ensayo primero de captación de pasos individualizados de la plataforma de fuerza, con la diferencia de que el operario ha llevado puestos los zancos de carga, de forma que realizara una pisada a la plataforma con el pie derecho, con el zanco acoplado, comparando las señales obtenidas.

El resultado obtenido, visto en la figura 6.11, se aprecia la diferencia notable entre ambos sistemas, siendo en la plataforma de carga la que presenta una señal más fiel a la teoría de GRFs, además de presentar el valor máximo de fuerza aplicada, que tiene lugar cuando el operario solo se apoya sobre dicho pie, más cercano a la fuerza aplicada por el propio peso del peatón. En el caso de los zancos, se aprecia grandes pérdidas de información a lo largo de toda la pisada.

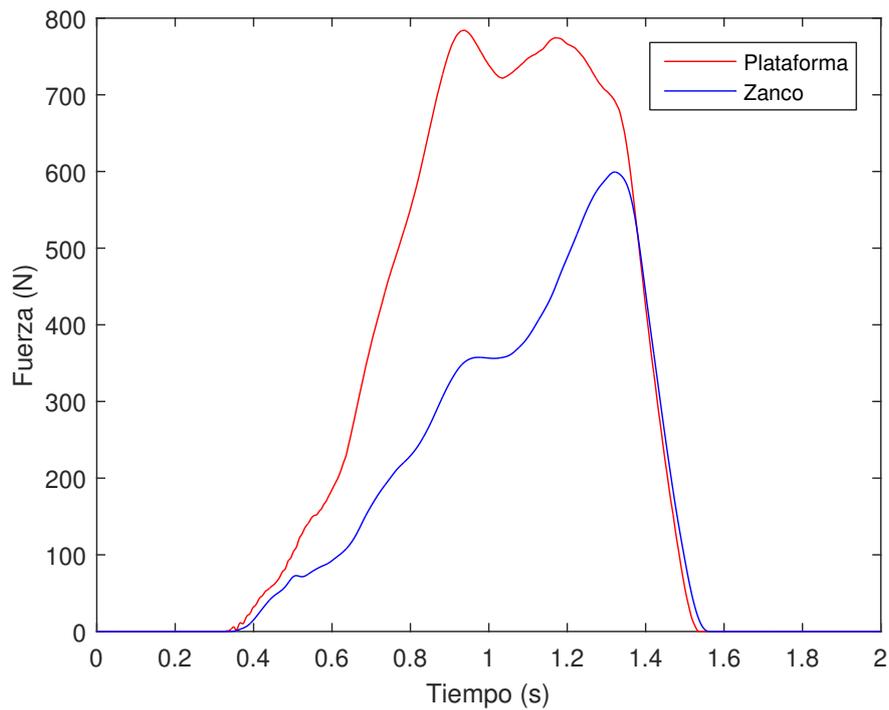


Figura 6.11: Representación de la fuerza ejercida al pisar la plataforma con pasos individualizados

La conclusión que se ha obtenido, vista de los ensayos anteriormente mencionados, es que los zancos de carga presentan graves errores en el funcionamiento, con una importante pérdida de información durante toda la pisada, seguramente producido porque las células de carga se quedan rápidamente sin más recorrido y sin más holgura para que pueda flexionar libremente.

7. Conclusiones y líneas de futuro

Una vez realizado los ensayos y puesto a prueba el comportamiento de los zancos se ha determinado que no cumple con las especificaciones de diseño y que necesita de modificaciones de cara a futuras versiones.

7.1. Conclusiones

Visto las deficiencias en el funcionamiento de los zancos de carga, estos presentan una serie de errores que han provocado que no cumpla con los objetivos especificados, además de la aparición de imperfecciones o errores que han necesitado de rectificaciones durante la etapa de montaje, y que por tanto deben ser subsanados de cara al diseño de una nueva versión. Los errores observados han sido los siguientes:

7.1.1. Disposición de la célula de carga respecto a la tornillería inferior-superior y la flexión de plantilla de acero

Para que los zancos funcionen correctamente e indiquen el verdadero valor de la fuerza con la que el operario ejerce sobre la estructura, las células de carga deben poder flexionar con total libertad, sin que entre en contacto físico (ella misma o algún objeto solidaria a ellas, como las cabezas de los tornillos en la parte superior de la cabeza de la célula, véase la figura 7.2) con alguna superficie superior o inferior, que limitarían la carrera de la flexión y se traduciría en una saturación del valor medido por la célula. Se puede producir un contacto si se dan una de las siguientes circunstancias:

- El juego célula-superficie disponible es inferior a la flexión generada en el puente en esas condiciones de trabajo.
- Algún componente del zanco se deforma excesivamente, reduciendo el juego existente y produciéndose el contacto, aún con una flexión de la célula de carga pequeña o incluso nula.

Para el segundo caso es relevante la posición de las pletinas (que dependen a su vez de la disposición elegida de la tornillería) así como su geometría y espesor. Cuanto más tamaño y espesor tiene la pletina, mayor rigidez proporciona a la zona, impidiendo que los objetos a los que está unida (plantilla de acero en el caso del inferior y amarres en el caso de la pletina superior) se deformen excesivamente en esa zona y entre en contacto con la zona opuesta. Hay que tener en cuenta que por la geometría de la célula y su tornillería asociada, la pletina solidaria a la cabeza de la célula de carga (pletina inferior en nuestro caso) rigidiza mucho menos, debido principalmente al tamaño, que a la pletina

solidaria a la base exterior, que le permite tener mucha más superficie además de tener 4 uniones mediante tornillos, en lugar de la dos que posee la cabeza.

En el caso de este prototipo el problema se acentúa en la parte inferior, ya que debido a los problemas anteriormente mencionado durante la fabricación (Apartado 5.3), las pletinas inferiores han sido sustituidos por dos tuercas, cuya sección de pequeño valor generan una rigidez muy limitada (Figura 7.1).

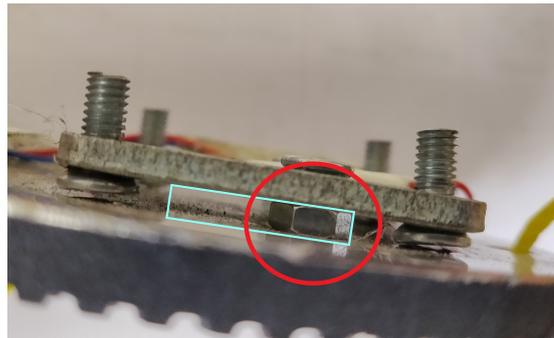


Figura 7.1: Colocación de tuercas en sustitución de las pletinas inferiores.

Teniendo en cuenta que la plantilla de acero inoxidable a la que se encuentra unida solo tiene un espesor de 0,5 mm, lo cual lo hace muy deformable (de forma deliberada, para proporcionar una pisada cómoda) se ha comprobado que al aplicar carga (Figura 7.3) la plantilla de acero se deforma tanto en el entorno de la célula de carga que dicha plantilla llega a entrar en contacto con la cabeza de la tornillería en la unión célula-pletina superior-amarre, por lo que no permite juego alguno para que la célula pueda funcionar en condiciones óptimas.



Figura 7.2: Juego entre la cabeza de los tornillos de las uniones superiores y la suela de acero sin carga aplicada.

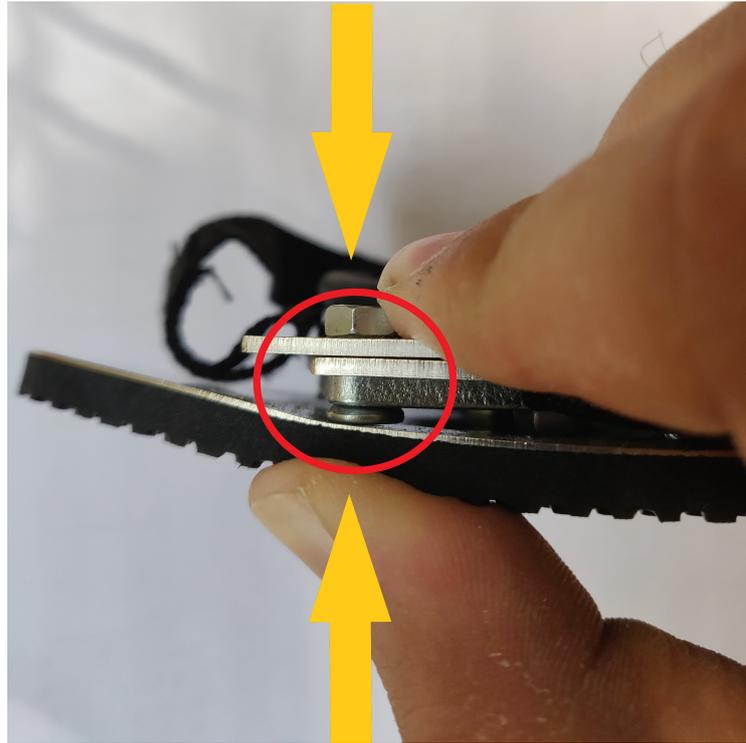


Figura 7.3: Juego entre la cabeza de los tornillos de las uniones superiores y la suela de acero con carga aplicada.

7.1.2. Juego entre célula de carga y pletina superior

El juego entre las cabezas de los tornillos que se disponen sobre la cabeza de la célula de carga y el amarre superior no es lo suficientemente grande, siendo no más de un par de décimas de milímetro (Figura 7.4). Esto provoca que el recorrido de flexión de la célula es muy limitado, y a cargas relativamente bajas (muy inferiores a las cargas de trabajo definidas en la fase de diseño, del entorno de 80 kg de fuerza) haya contacto físico entre la célula y los amarres, provocando una saturación en la medida de la carga. Las dos variables que controlan este juego son dos:

- **Espesor de la pletina superior:** Es la principal variable que afecta a juego, pues su espesor determina el espacio entre la superficie superior de la cabeza de la célula de carga y el amarre al que esta unido solidariamente a la pletina.
- **Avellanado de la cabeza de la célula:** Para un espesor de pletina superior fijo, el juego útil restante es mayor cuanto mayor es la profundidad del avellanado donde se encuentra colocado la cabeza del tornillo, ya que provoca que dicha cabeza sobresalga en menor medida.

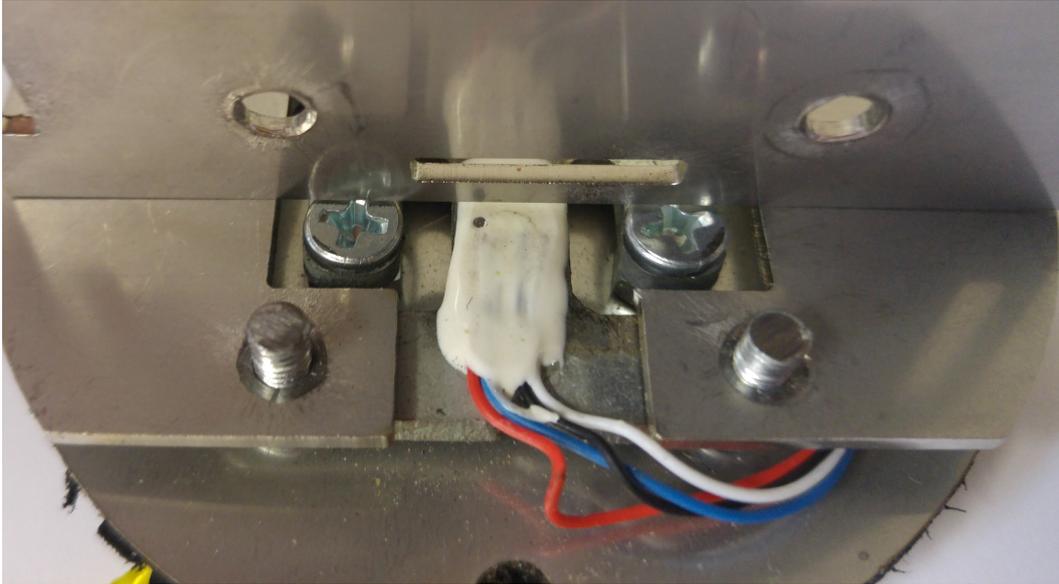


Figura 7.4: Juego entre la cabeza de los tornillos y el amarre superior.
Se observa que el juego es apenas imperceptible al ojo humano.

7.1.3. Peso general del sistema

El sistema de zancos de carga, formada por varias chapas de acero inoxidable, algunas de hasta 1,5 mm de espesor, tiene un peso final de 546 g, del orden muy superior al deseado, lo que provoca incomodidades al andar, además de que el sistema de sujeción de gomas no es capaz de sujetar toda la masa sin provocar balanceos y oscilaciones.

La solución de dicho problema pasa por un rediseño en los espesores de las chapas, reduciendo su espesor siempre que sea posible (especialmente en piezas no muy solicitadas o que se les permita tener cierta flexión, como podrían ser los amarres). Otras soluciones a contemplar son la aligeración de las chapas, ya sea por eliminación de material en el interior de las chapas o redefiniendo la geometría del contorno de las piezas, eliminando los contornos sobrantes que no tengan utilidad.

7.1.4. Efecto chancla y caída en el talón

Si bien el agarre en la parte delantera del zanco a la suela del zapato cumple de forma satisfactoria, proporcionando un agarre cómodo y que mantiene fija la zona, la parte trasera, con el amarre del talón, cuenta con un menor agarre y fijación, principalmente debido al que el número de correas en el amarre es mucho inferior. Este hecho provoca que la parte de talón tienda a perder el contacto superficial entre el amarre y la suela del zapato al levantar el pie al caminar, de forma muy similar al que puede ocurrir al llevar unas chanclas sin agarre en el talón de ningún tipo (Figura 7.5).

Este fenómeno en primer lugar es desagradable e incomodo para el operario, llegando a modificar su mecánica de marcha para paliar las perturbaciones que provoca. Además hay que tener en cuenta que, al ser un zanco con un peso relativamente alto, dicho fenómeno se acentúa de forma notoria.



Figura 7.5: Caída y pérdida de contacto físico zapato-zanco en el talón.

Otro efecto derivado de la caída del talón y que afecta de forma grave al funcionamiento, se produce cuando al bajar la suela del pie vuelve a entrar en contacto con el amarre trasero, produciendo, justo al inicio de realizar la pisada, en la señal de salida (Figura 7.6), un aumento repentino del valor total de la fuerza, debido al impacto repentino de la suela del zapato con el zanco. Este fenómeno se ha observado que aparece con mayor intensidad en el zanco izquierdo, como se ha explicado en el apartado 6.2.3.

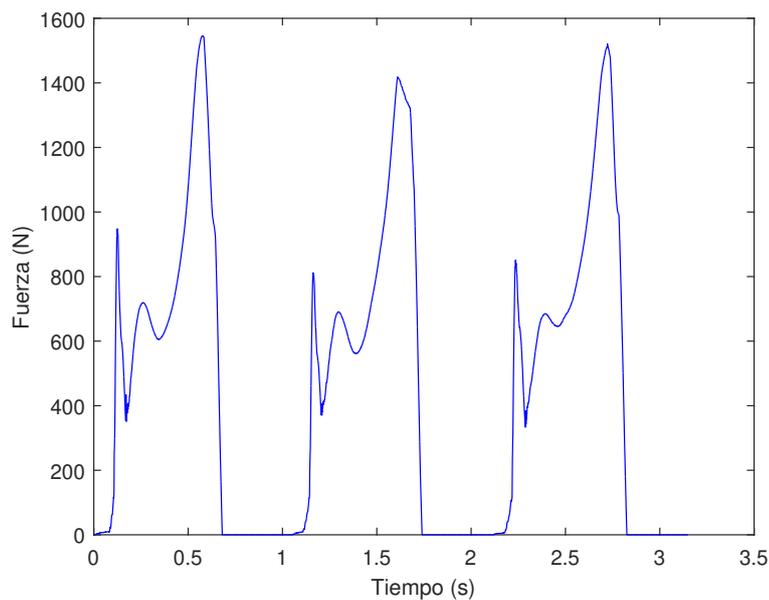


Figura 7.6: Picos de fuerza al inicio de la pisada provocados por la colisión en el talón

Este fenómeno está relacionado con el agarre del talón, pero además se ve influenciado en que medida la suela de acero puede deformarse, adaptándose a la suela (Figura 7.7).

Una posible solución estaría relacionada con disminuir la rigidez del zanco en la zona de la articulación de los metatarsianos del pie con el objetivo de que, al inicio del paso, la parte trasera acompañará más fácilmente al talón, necesitando por tanto menor fijación.



Figura 7.7: Deformación de los zancos durante el inicio de la zancada.

Esta posible solución presenta un problema de diseño, puesto que la zona del zanco que necesita la mayor deformación está muy cerca de los puntos de aplicación de las fuerzas en la zona delantera, donde se encuentran las células y el amarre donde se apoya el pie, zona que necesita de gran rigidez para un correcto funcionamiento y comodidad (Figura 7.8).



Figura 7.8: Deformación esquematizada de los zancos durante el inicio de la zancada.

Como se puede observar en la imagen 7.8, la zona donde se necesita gran deformación a flexión, que requiere poca rigidez, se encuentra muy cerca de la zona de colocación de las células de carga, donde se necesita gran rigidez. Hay que buscar un compromiso entre la rigidez estructural que necesitan las células para su funcionamiento y la rigidez que necesita la plantilla de acero para deformarse con la forma requerida. Una solución posible en versiones futuras puede ser el replanteamiento de la colocación de las células, número y tamaño, de forma que no haya células de carga en la zona de máxima deformación requerida.

7.1.5. Posición del punto de apoyo del talón

La posición de la célula trasera y todos los componentes que derivan de ella (pletina superior y amarre) se encuentra demasiado atrasada respecto el punto de apoyo natural del talón al andar (Figura 7.9), por lo que hay que contemplar

la modificación de dicha posición, adelantándola en versiones posteriores de los zancos de carga.

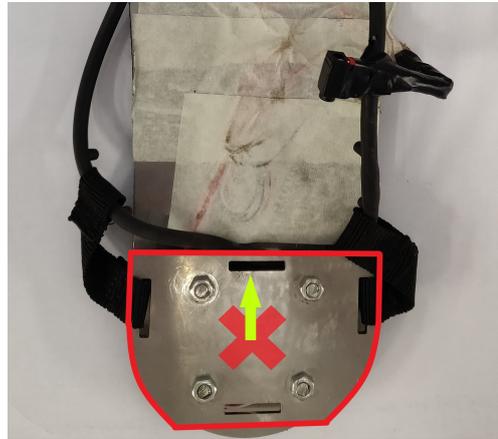


Figura 7.9: Indicación de la posición ideal del nuevo punto de aplicación de la célula trasera.

7.1.6. Tuercas superiores y comodidad en el contacto suela-amarre

Al no colocar ninguna suela o soporte de caucho en la parte superior de los amarres, la suela del zapato del operario se apoya sobre 12 tuercas (Figura 7.10) en lugar de apoyarse sobre toda la superficie de los amarres, creando inestabilidad al caminar.



Figura 7.10: Distribución de los tornillos que sobresalen en la suela superior.

La solución más inmediata es la colocación de algún caucho (Figura 7.11), similar a la parte inferior de los zancos, que permitan un contacto cómodo y más uniforme en toda la superficie.

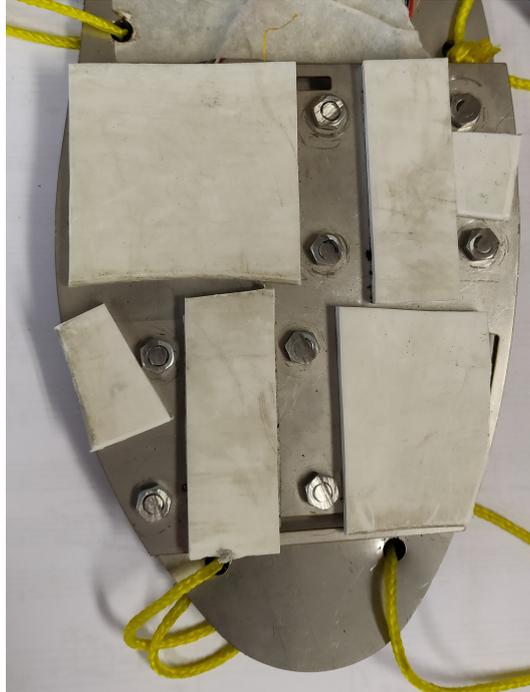


Figura 7.11: Colocación de un corcho provisional a modo de suela superior para mejorar la comodidad.

7.1.7. Sistema de sujeción zanco-zapato y comodidad general

Si bien cumple con su función principal, la sujeción del zanco, esta lejos de ser una sujeción completa y óptima que permita un paso cómodo y fiable, debido a la falta de estabilidad y a las ligeras oscilaciones en el plano vertical, especialmente en el talón, además de que la suela del zapato pueda desplazarse horizontalmente respecto a los amarres, desalineando los puntos de presión con los puntos donde se encuentran las células de carga.

Las posibles soluciones son el aumento de correas, especialmente en la zona posterior, o el uso de componentes de agarre externos y de un solo uso como la aplicación de cintas adhesivas. También afectaría de forma positiva la disminución del peso total del zanco. Al mismo tiempo, de cara a versiones futuras, no se puede descartar un rediseño completo del sistema de agarre.

7.1.8. Revisión de la geometría de los elementos CAD y corrección de medidas

Como ya se ha comentado, debido a los problemas anteriormente mencionados durante la fabricación, hay errores, tanto en el diámetro como en la posición de los taladros de las piezas generadas por CAD con respecto a las células, provocando problemas en el montaje, que han requerido de mecanizado e incluso el rechazo y sustitución de piezas.

De cara a una siguiente versión es de obligado cumplimiento el redimensionamiento de todas las piezas afectadas, de cara a evitar mecanizados posteriores al corte por láser en el futuro. Además, conocidas ya el comportamiento de las piezas unidas en el conjunto, hay que revisar el grosor de cada una de ellas, optimizando su espesor en función de su rigidez, juego de las cabezas de las células en la flexión y el encaje final de la cabeza de los tornillos tras avellanado. Por tanto hay que aumentar el espesor de la piezas que:

- Necesitan dar mayor rigidez al sistema.
- Dan mayor juego a la flexión de las células de carga.

Y hay que disminuir el espesor o aligerar las piezas que:

- Dan excesiva rigidez y peso.

También hay que analizar si algunos componentes, como la plantilla de acero, cuenta con partes estructurales que no aportan ninguna funcionalidad, ya sea proporcionando mayor apoyo o rigidez del necesario, aportando en este caso únicamente mayor peso al sistema.

7.2. Líneas de futuro

De cara a la realización en el futuro de una nueva versión de los zancos de carga, visto los problemas que presenta que imposibilitan su correcto funcionamiento, se ha propuesto la realización de una segunda versión (Figuras 7.12 y 7.13).

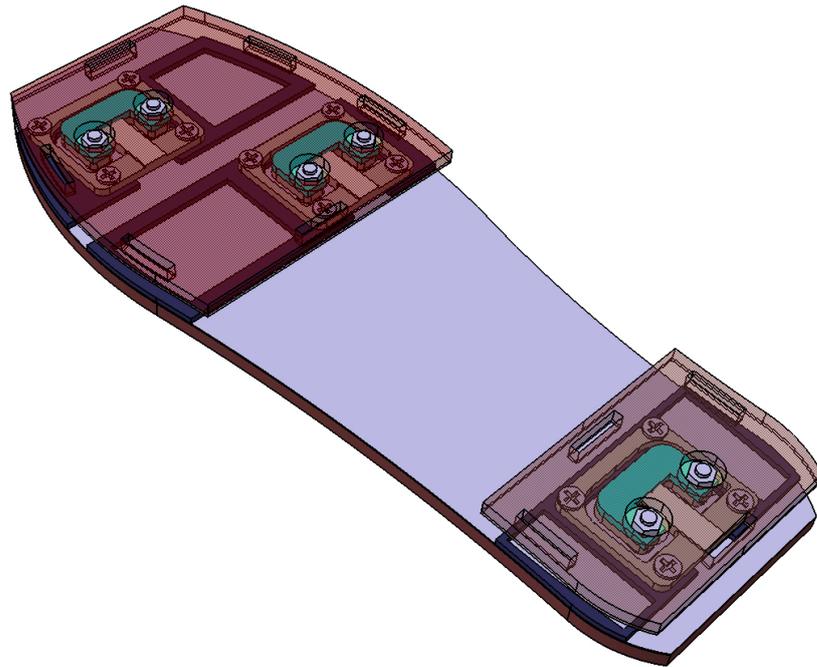


Figura 7.12: Segunda versión de los zancos de carga, vista desde de la parte superior.

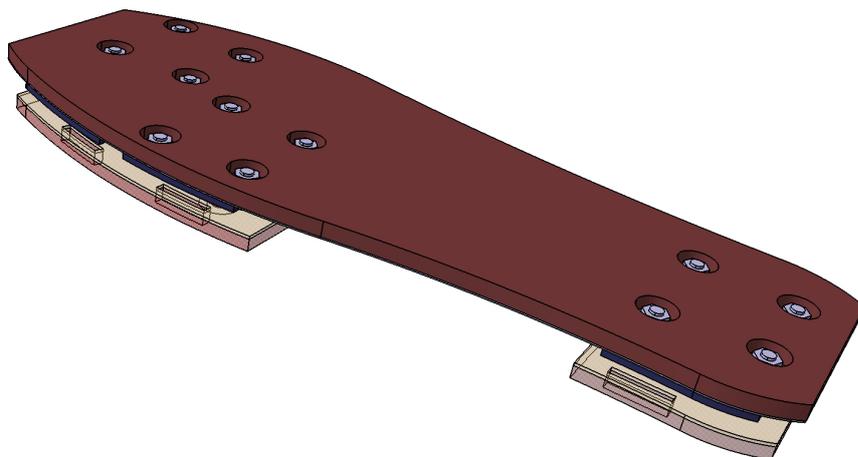


Figura 7.13: Segunda versión de los zancos de carga, vista desde de la parte inferior.

Partiendo de los fallos en concepción y funcionamiento observados en la primera versión de los zancos (Apartado 7.1) y con el objetivo principal de que se puedan realizar ensayos experimentales de forma satisfactoria, se ha realizado una segunda versión en CAD (Figuras 7.14 y 7.15), cuyo montaje se podría realizar en caso de que se viera conveniente en un futuro, intentando paliar la mayoría de defectos del modelo antecesor:

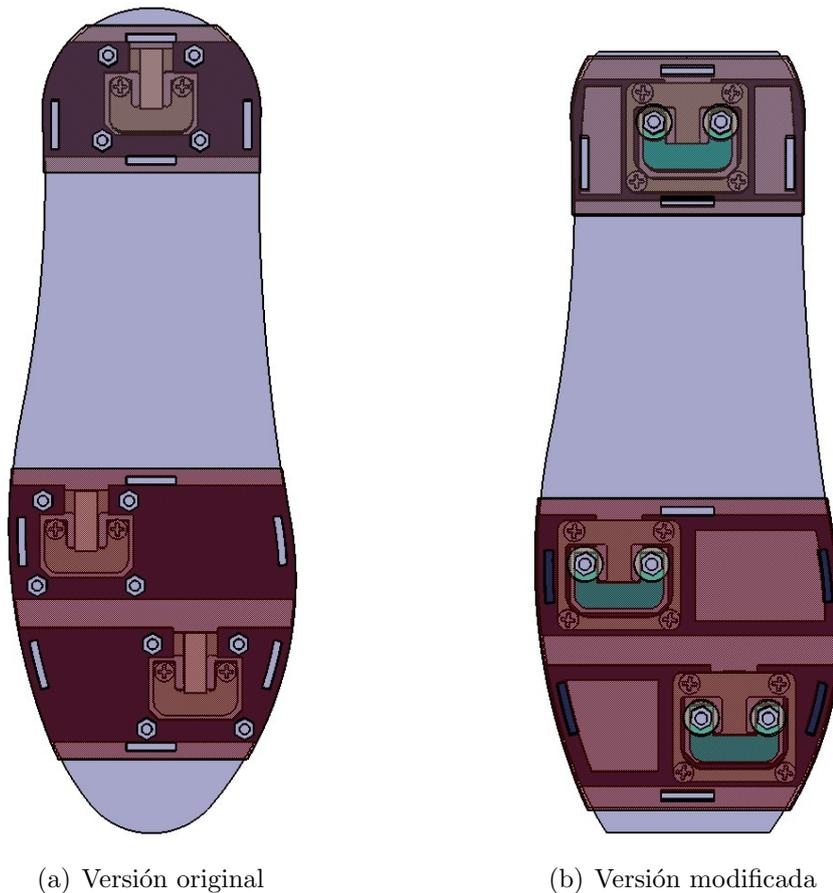


Figura 7.14: Vista del planta de ambas versiones

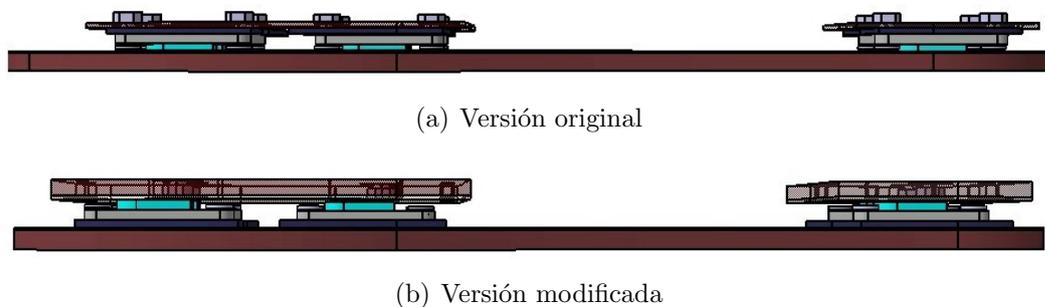


Figura 7.15: Vista del perfil de ambas versiones.

Para ello la nueva versión se han introducido las siguientes modificaciones:

7.2.1. Inversión de la célula y las pletinas

Una de las principales modificaciones de cara a una nueva versión es la inversión de la célula y sus pletinas correspondientes, colocando la antigua pletina inferior en la parte superior, de la misma forma que la pletina superior en la primera versión se colocará en la parte inferior.

La principal justificación de esta modificación se debe a los problemas observados en el apartado 7.1.1. Como se ha observado en la primera versión de los zancos, la plantilla de acero se deforma en exceso en el entorno de la célula, colisionando con las cabezas de los tornillos que se encargan de las sujeciones superiores (figura 7.3), impidiendo juego alguno y saturando la medida incluso a bajas cargas aplicadas. Debido a ello, interesa colocar una pletina en la parte inferior de gran superficie, ya que aporta una rigidez muy superior a la zona.

Debido a la geometría de la célula, la pletina que se encuentra unida al cabezal interior, mediante dos tornillos, la pletina inferior en caso de la primera versión de los zancos, tiene una superficie potencial limitada a la propias dimensiones de la cabeza de la célula (figura 7.16). Sin embargo la pletina que se encuentra unida la base exterior de la célula de carga, unida a ella mediante 4 tornillos, puede expandir toda su superficie hasta el propio contorno del zanco. Por la propia naturaleza de las dimensiones de cada pletina, la pletina solidaria a la base exterior aportará mayor rigidez que las pletinas solidarias al cabezal de la célula.

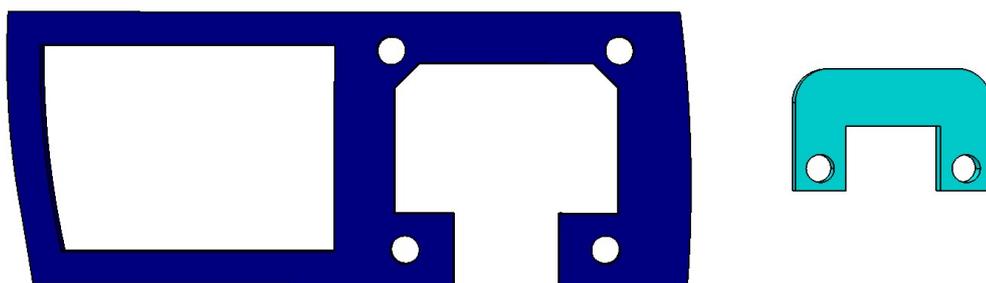


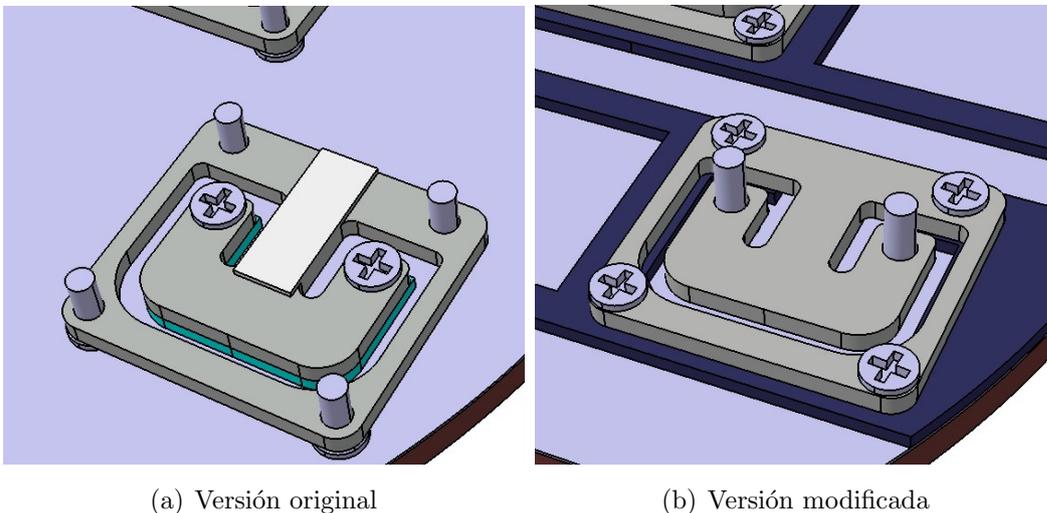
Figura 7.16: Comparación de los tamaños de cada pletina.

Con esta nueva distribución, la nueva pletina inferior abarca una superficie mucho más amplia, limitando la deformación de la suela de acero en el entorno

de la célula. La pletina solidaria al cabezal queda unida a la parte superior, donde la deformación de los amarres, de mayor espesor que la suela de acero, es menos preocupante.

Debido a esta modificación, hay que tener en cuenta que hay q realizar las siguientes cambios:

- **Inversión célula** (Figura 7.17): Si se quiere reutilizar las mismas células de carga utilizadas en la primera versión, teniendo en cuenta la posición de los avellanados respecto a cada superficie superior e inferior de la célula, habría que invertir la posición de estas para encajar dichas células en la nueva versión



(a) Versión original

(b) Versión modificada

Figura 7.17: Disposición de las células en y la tornillería en cada uno de los zancos.

- **Cambio taladros:** En el resto de piezas distintas a los pletinas, como son las suela de acero y amarres, hay que re-definir el número y posición de los taladros en función de que tornillos (los correspondientes a las cabeza de la célula y los correspondientes a la base exterior) forman la nueva unión. En este caso los amarres (Figura 7.18) pasan de estar unidas con la tornillería de la base exterior al par de tornillos del cabezal interior, caso opuesto para la suela de acero (Figura 7.19).
- **Revisión de las hendiduras para las correas:** En el caso de la antiguas pletinas superiores, las hendiduras por donde van unidas las correas ya no son necesarias para una nueva versión.

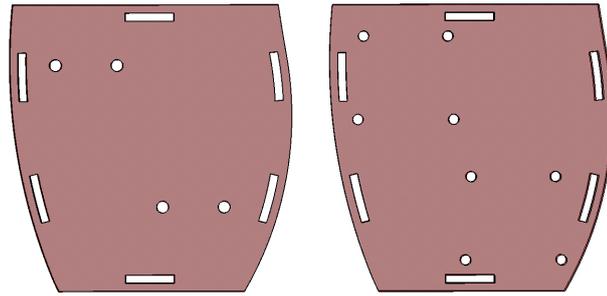
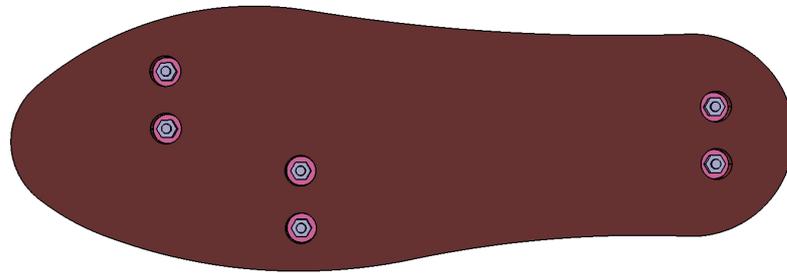
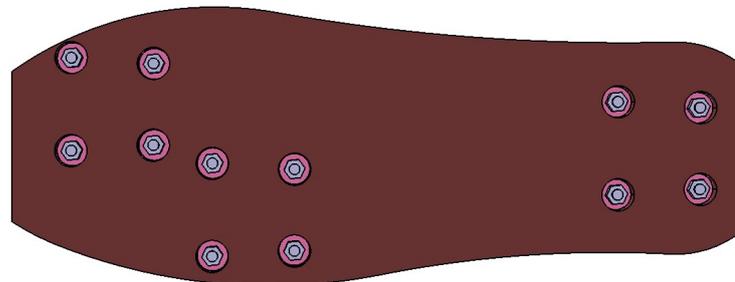


Figura 7.18: Comparación de los taladros en los amarres frontales.



(a) Versión original



(b) Versión modificada

Figura 7.19: Vista inferior de la suela de los zancos de carga.

7.2.2. Redimensionamiento de los taladros

Con acuerdo a la nueva toma de medidas, (rectificando los errores explicados en el apartado 5.2), de los diámetros de los taladros y sus posiciones, el nuevo modelo tridimensional de los zancos cuenta con estas medidas corregidas en todos aquellos elementos que venían afectados por este error dimensional de medición (Figura 7.20), como son los amarres, las pletinas superiores e inferiores y la plantilla de acero.

De esta manera se evitará tener que realizar rectificadas y mecanizados, mas allá del avellanado de las células de carga, ahorrando tiempo y dinero.

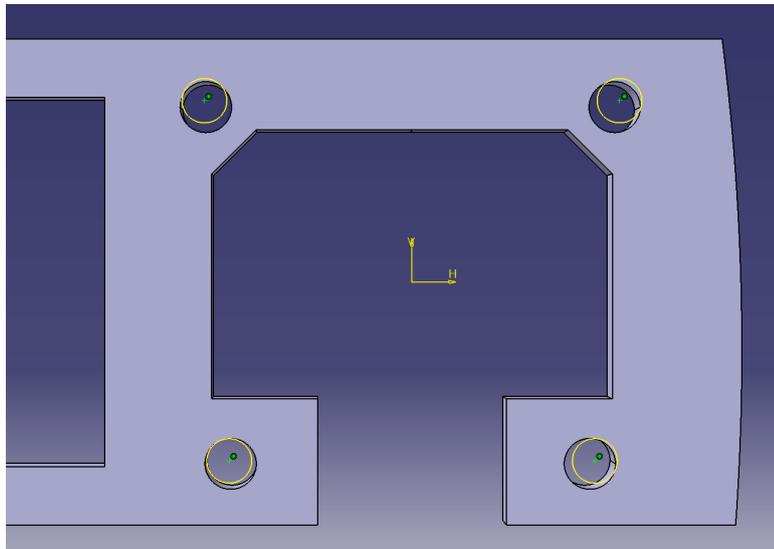


Figura 7.20: Vista inferior de la suela de los zancos de carga. Se observa que los diámetros originales, en amarillo, son de menores dimensiones, del mismo modo de que sus centros (en verde) no son concéntricos con los nuevos taladros.

7.2.3. Modificación de los espesores

Con el fin de garantizar un juego y margen adecuado para la flexión de las células de carga, para que aquellas partes que tienen que presentar bajas deformaciones puedan disponer de la rigidez necesaria, y que aquellas partes que presenten un peso excesivo, sin que su rigidez aportada sea útil para el sistema, o que puedan tolerar una disminución de esta sin que por ello afecte al funcionamiento correcto del sistema, se han realizado las siguientes modificaciones:

- **El espesor de los amarres pasa de 1,5 mm a 1 mm.**

Los amarres presentan un peso excesivo y con un rigidez muy superior a la necesaria. En esta versión presenta una reducción de su espesor en un tercio de su valor (Figura 7.21). Con ello se logra que el zanco sea más ligero y con menos espesor total, manteniendo un grosor prudente que no permita que estos amarres se deformen en exceso, ya que de otra manera podría darse el caso que se deformaran hasta el punto que podrían entrar en contacto con las cabezas de los tornillos colocados sobre la superficie superior de la célula, no permitiendo ningún juego, bloqueando una mayor flexión del cabezal de las células y saturando las medidas.

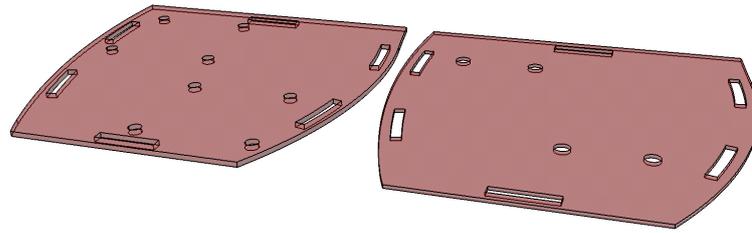


Figura 7.21: Comparación de los espesores de los amarres frontales.

- **El espesor de la nueva pletina superior (antigua pletina inferior) pasa de 0,5 a 2,5 mm.**

Tras realizar el avellano de las células y el montaje de los tornillos en la primera versión de los zancos, se observó que la cabeza de dichos tornillos sobresalen aproximadamente 1,5 mm sobre la superficie plana de la célula. Teniendo además en cuenta que se debe dejar un juego de un espesor prudente para la flexión, la pérdida inicial del grosor total de las pletinas (3 pletinas en serie que proporcionan 1,5 mm en total) es muy inferior a la necesaria, aumentando finalmente el grosor de la pletina hasta los 2,5 mm de espesor (Figura 7.22).

Hay que tener en cuenta que debido a que las antiguas pletinas inferiores no pudieron ser instaladas debido a que con los medios disponibles no era posible rectificar los taladros en piezas de tan pequeño espesor (Apartado 5.3), tuvieron que ser sustituidas por tuercas hexagonales, que si bien tienen un buen espesor, su superficie es tan pequeña que no aportaban apenas rigidez a la plantilla de acero y demás componentes del sistema de zancos.

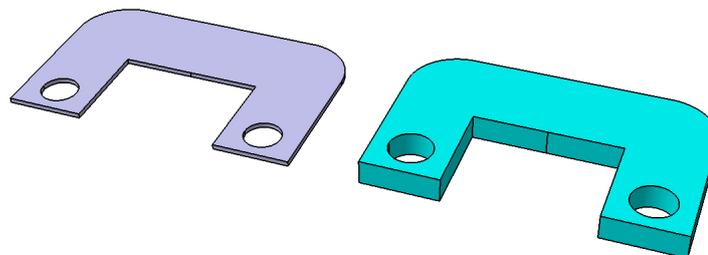


Figura 7.22: Comparación de los espesores de las pletinas asociadas al cabezal.

- **El espesor de la nueva pletina inferior (antigua pletina superior) pasa de 1,5 a 2mm**

La pletina debe permitir mayor juego para la flexión de la célula, ya que como se ha visto en el apartado 7.1.2, en la primera versión apenas hay espacio disponible, provocando una prematura saturación de las medidas. Por ello se incrementa en medio milímetro el espesor (Figura 7.23).

Además, ya que en esta nueva versión las pletinas se colocan en la parte inferior, entre la superficie inferior de la célula de carga y la plantilla de acero, el aumento del espesor se traduce en un aumento de la rigidez en la zona, reduciendo la magnitud de las deformaciones de la plantilla de acero, que en la versión anterior conseguía entrar en contacto físico con las cabezas de los tornillos colocados en la base exterior de las células (figura 7.3)

En contrapartida, el aumento de rigidez en esa zona puede ser contraproducente a la hora de que la suela de acero adapte el contorno deseado a medida que el operario camina con ellas (figura 7.8)

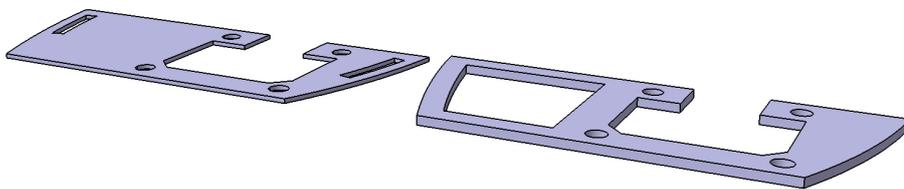


Figura 7.23: Comparación de los espesores de las pletinas asociadas a la base exterior.

Los espesores de la suela de caucho (5mm) y la plancha de acero (0,5 mm) se han mantenido en su valor. Por tanto, el espesor total de los zancos, sin tener en cuenta las tuercas superiores, es decir, la distancia desde la parte inferior de la suela de caucho hasta la superficie superior de los amarres, pasa de 13,3 mm a 13,8 mm. Si bien, lejos de disminuir el espesor total, como se pretendía de cara a futuras versiones, aumenta. Dicho incremento de espesor no debería ser apreciable por el operario respecto al anterior modelo (además que en el modelo experimental las pletinas inferiores de espesor total de 1,5mm fueron sustituidas por tuercas de 2,7 mm de espesor), al mismo tiempo que estas nuevas medidas deberían garantizar un mejor funcionamiento de dichos zancos.

7.2.4. Recolocación de la célula talonar

Visto en el apartado 7.1.5, en esta versión se ha corregido la posición de la célula desplazándola 10,8 mm respecto al eje que recorre longitudinalmente a la suela de acero (Figura 7.24).

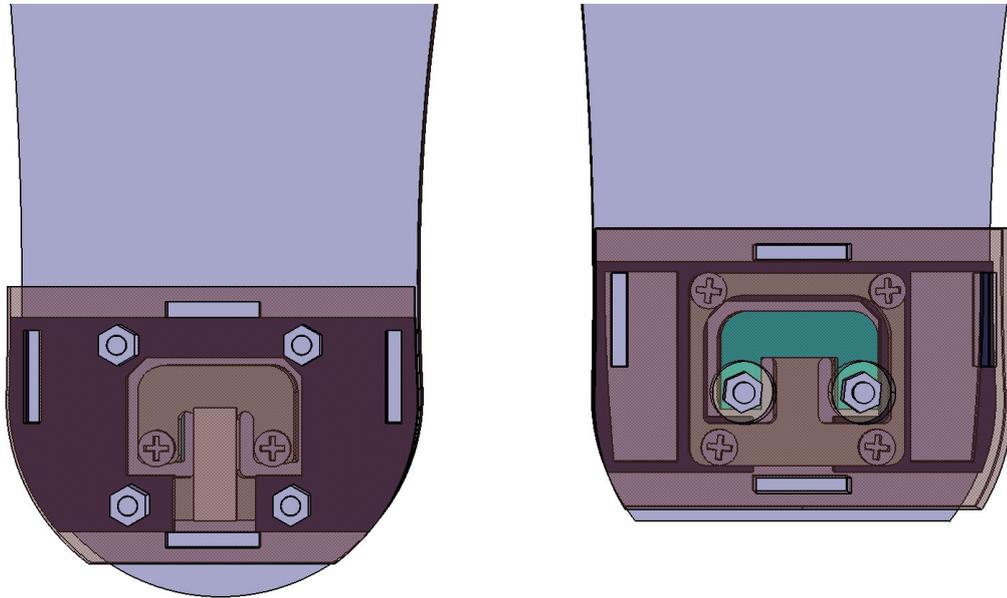


Figura 7.24: Comparación de la posición de la célula talonar y sus componentes asociados.

7.2.5. Capa superior de caucho

Como se puede ver en el apartado 7.1.6, el contacto físico entre suela del zapato y el zanco no es uniforme y cómoda, por ello en esta nueva versión se instalará una suela de caucho de 4 mm encima de los amarres (Figura 7.25), de forma que el zapato pueda apoyarse sobre una superficie amplia, plana e uniforme.

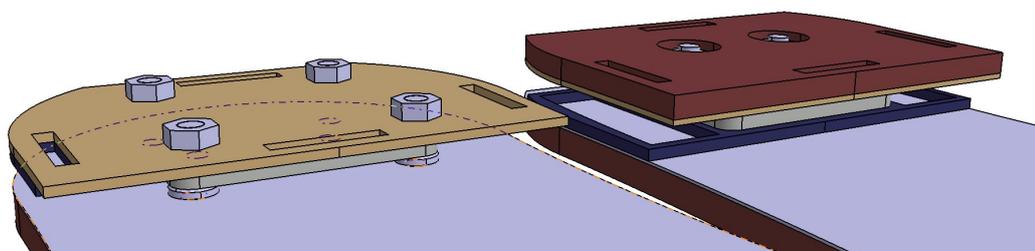


Figura 7.25: Inclusión de capa superior de caucho.

7.2.6. Aligeramiento de las pletinas inferiores (Antiguas pletinas superiores)

Las nuevas pletinas inferiores están diseñadas para aportar una rigidez en el entorno de la suela de acero que limitan su deformación, además de permitir un juego para que la cabeza de la célula pueda fletar libremente.

Debido a ello, el espesor de dicha pieza ha sido aumentada, y por tanto su peso, que ya era problemático en la versión anterior. Teniendo en cuenta que las zonas de la pletina alejadas del lugar de contacto de la célula no necesitan especialmente una gran rigidez, se ha decidido aligerar esas zonas, eliminando material de la pletina y dejando solo el contorno de esta (Figuras 7.26 7.27 7.28). De esta manera se consigue disminuir, en lo posible, el peso total del zanco, sin que por ello permita que la plantilla de acero se deforme demasiado en el entorno cercano de las células de carga, donde podría ser más problemático.

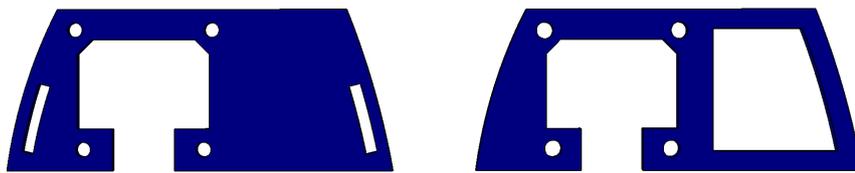


Figura 7.26: Aligeración de la pletina de la célula superior.

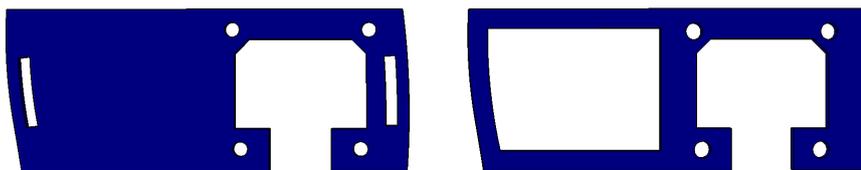


Figura 7.27: Aligeración de la pletina de la célula media.

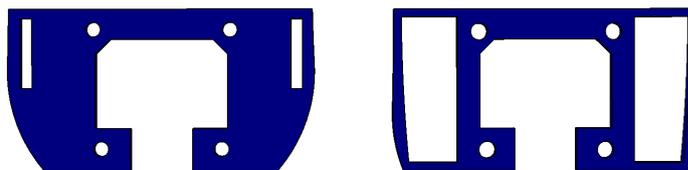


Figura 7.28: Aligeración de la pletina de la célula talonar.

7.2.7. Recorte de las puntas de la plancha de acero

Con el objetivo de disminuir el peso total de los zancos de carga, las partes más extremas de los zancos, que corresponderían a la punta de la suela y el talón, han sido eliminadas, suprimiendo todo el material confinado, que correspondería a parte de la plantilla de acero más su zona de caucho correspondiente (Figura 7.29). Esto es debido a que son partes que no cumplen ninguna función específica, pues son zonas alejadas de las zonas de contacto o apoyo de los zapatos del operario.

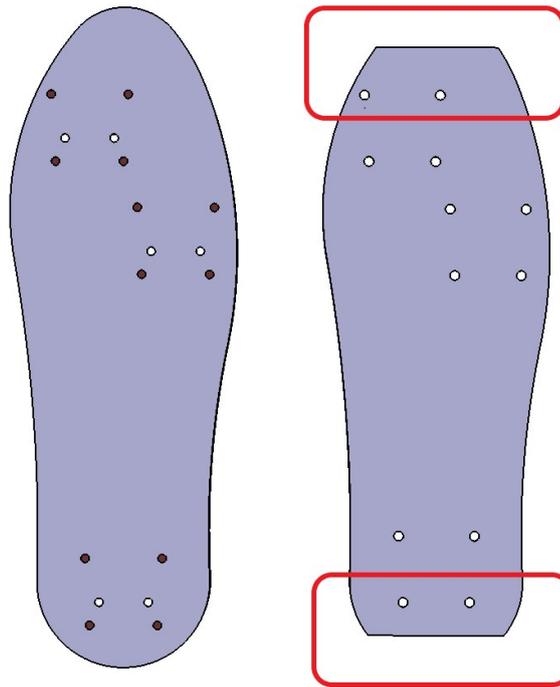


Figura 7.29: Recorte de material en plancha de acero y suela de caucho.

7.3. Otras alternativas de mejora

A parte de esta segunda versión propuesta, se pueden barajar otras opciones con modificaciones más profundas que podrán resultar una alternativa eficaz de cara lograr un comportamiento de los zancos satisfactorio:

- **Inversión total del zanco:**

Respecto a la primera versión de los zancos, se puede barajar una posible variante, en la que se invierte totalmente el zanco, siendo la suela continua de acero la que se sitúe en la parte superior, donde se apoyaría la suela del zapato del operario, y pasando los amarres frontal y posterior a la parte inferior del zanco, en contacto físico con el suelo.

De esta manera, esta nueva versión del zanco podría adaptarse mejor a

la deformación de la suela durante las mediciones.

Esta distribución se ha utilizado para el uso de algunas plataformas de fuerza wearable, como por ejemplo las XSENS ForceShoeTM, desarrolladas en colaboración con las NASA (Figura 7.30)



Figura 7.30: XSENS ForceShoeTM [7].

■ Variación en número y tamaño de las células:

Otro aspecto a valorar es la posible modificación en el número, disposición y modelo de las células de carga. Aquellas zonas donde se encuentren las células de carga son zonas donde la rigidez es alta y por tanto la flexión que puede ofrecer el zanco limitada. Por ello, se pueden manejar varias alternativas:

- Uso de células más pequeñas: Escoger un modelo de células de menor tamaño, permitiendo mayor flexibilidad. En este caso, las células soportan un carga máxima menor, por lo que se estaría obligado a aumentar el número de ellas, pasando de tener 1 a 2 células de carga en la zona de los metatarsianos.
- Uso de células más grandes: A costa de aumentar el tamaño, se podría prescindir de la segunda célula de carga colocada en la parte superior del pie, pasando a tener solo 2 células en los puntos principales de presión, el talón y la zona de los metatarsianos [1]

Referencias

- [1] Abdul Hadi Abdul Razak, Aladin Zayegh, Rezaul K. Begg y Yufridin Wahab. Foot plantar pressure measurement system: A review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 12(7):9884–9912, 2012.
- [2] Carlos Mariano Casado Sánchez, Jesús De Sebastián Sanz, Ivan Muñoz Díaz, Alfonso Poncela Méndez y Antolín Lorenzana Ibán. Control de vibraciones en pasarelas peatonales. *Dyna (Spain)*, 86(3):318–327, 2011.
- [3] Jesús De Sebastian Sanz. *Análisis Del Estado Límite De Servicio Y Control De Vibraciones En Pasarelas Peadonales*. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, 2012.
- [4] Departamento de Diseño Avanzado de Maquinas. Universidad de Valladolid. Transductores de deformación (Galgas). 2018.
- [5] Departamento de Metrología Avanzada y Calidad Industrial. Universidad de Valladolid. HISTÓRICO certificados de calibración Proyector de Perfiles. page 2, 2017.
- [6] José A. Berna Gascón. Análisis de la presión plantar entre el pie dominante y no dominante en jugadores de fútbol profesional. *Terapeía: estudios y propuestas en ciencias de la salud*, (6):45–58, 2014.
- [7] Andrea Hanson, Brian Peters, Erin Caldwell, Nate Newby, Joe Sinka, Galen Kreutzberg y Lori Ploutz-Snyder. Portable load measurement device for use during ared exercise on iss. 2018.
- [8] Amaia Ilzarbe. *Análisis dinámico de las fuerzas de contacto órtesis- pierna mediante un modelo biomecánico tridimensional*. Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Barcelona, 2014.
- [9] Einar Thór Ingólfsson, Christos T. Georgakis y Jeppe Jönsson. Experimental studies and probabilistic modelling Pedestrian-induced lateral vibrations of footbridges. page 271, 2011.
- [10] Inc. Metronics. Manual QUADRA-CHEK 200, 2000.
- [11] Luis Moya Guindo. *Comportamiento dinámico de pasarelas peatonales*. Trabajo Fin de Máster, Universidad Politecnica de Madrid, 2015.
- [12] Jesus Rodríguez Celador. *Incorporación de dispositivos TMD en una maqueta de edificio de 2 plantas . Diseño , construcción y sintonizado .* Trabajo Fin de Grado, Universidad de Valladolid, 2016.

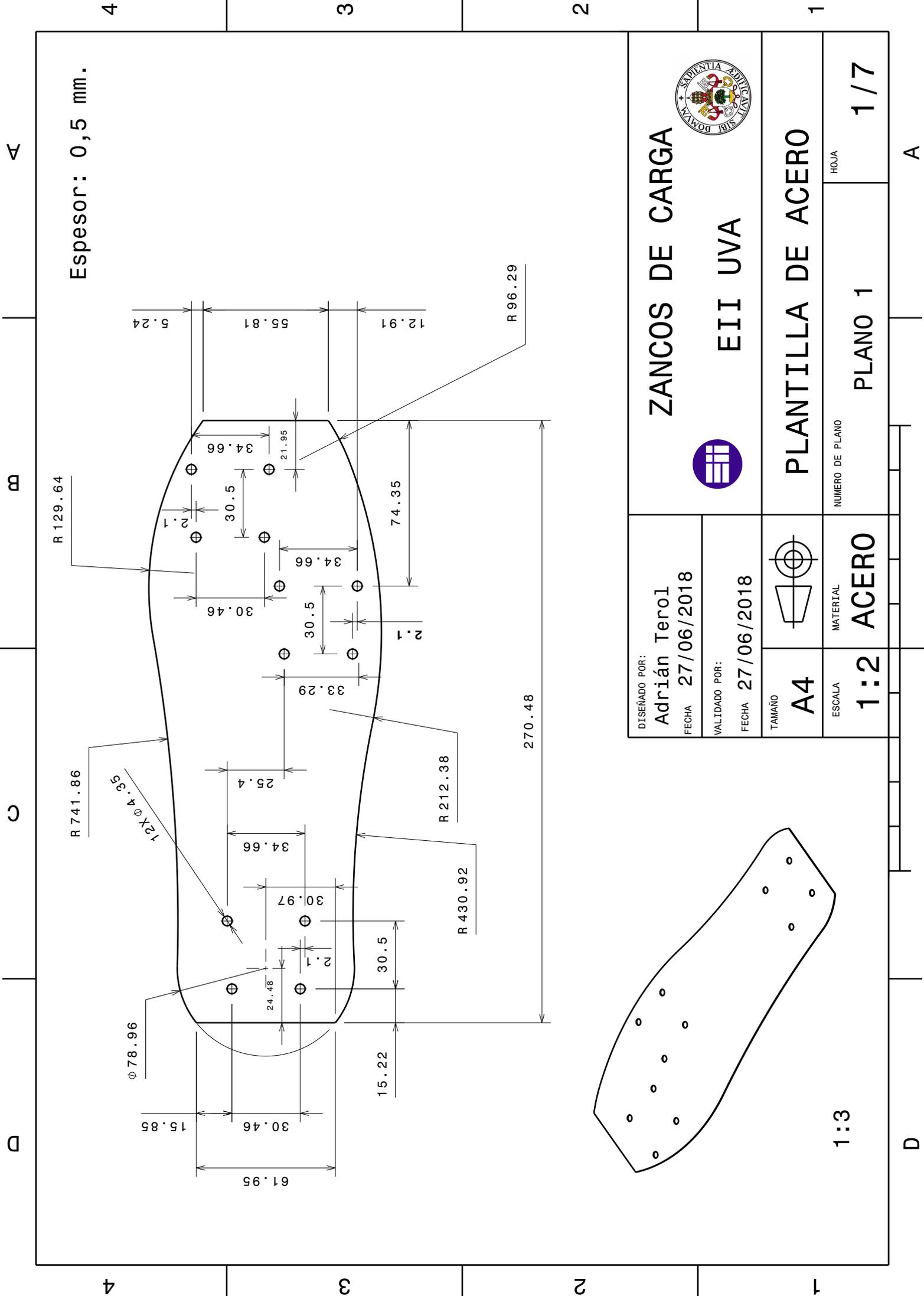
- [13] CAD TECH IBÉRICA S.A. *Manual CATIA v5r8 Español*. 2002.
- [14] Lin Shu, Tao Hua, Yangyong Wang, Qiao Qiao Li, David Dagan Feng y Xiaoming Tao. In-shoe plantar pressure measurement and analysis system based on fabric pressure sensing array. *IEEE transactions on information technology in biomedicine*, 14(3):767–775, 2010.
- [15] S. Živanović, A. Pavic y P. Reynolds. Vibration serviceability of foot-bridges under human-induced excitation: A literature review. *Journal of Sound and Vibration*, 279(1-2):1–74, 2005.

Anejos: Planos

En este apartado se incluyen todos los planos necesarios para la fabricación de los componentes de la segunda versión de los zancos de carga, piezas modificadas de los componentes descritos en el apartado 4 del proyecto:

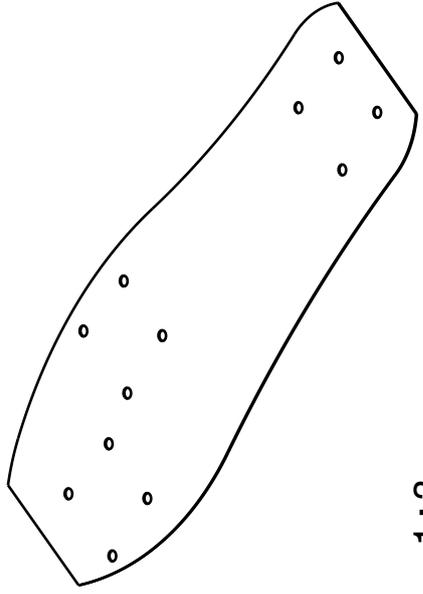
Indice de los planos:

1. Plantilla de acero.
2. Amarre frontal.
3. Amarre posterior
4. Pletina superior
5. Pletina inferior de la célula frontal.
6. Pletina inferior de la célula media.
7. Pletina inferior de la célula talonar.



Espesor: 0,5 mm.

DISEÑADO POR: Adrián Terol FECHA 27/06/2018			ZANCOS DE CARGA		
VALIDADO POR: FECHA 27/06/2018			EII UVA		
TAMAÑO A4		PLANTILLA DE ACERO		HOJA 1/7	
ESCALA 1:2	MATERIAL ACERO	NUMERO DE PLANO PLANO 1			



1:3

A

B

C

D

4

3

2

1

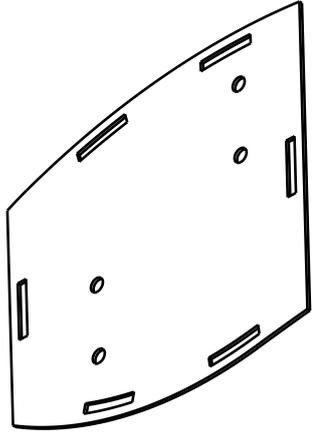
4

3

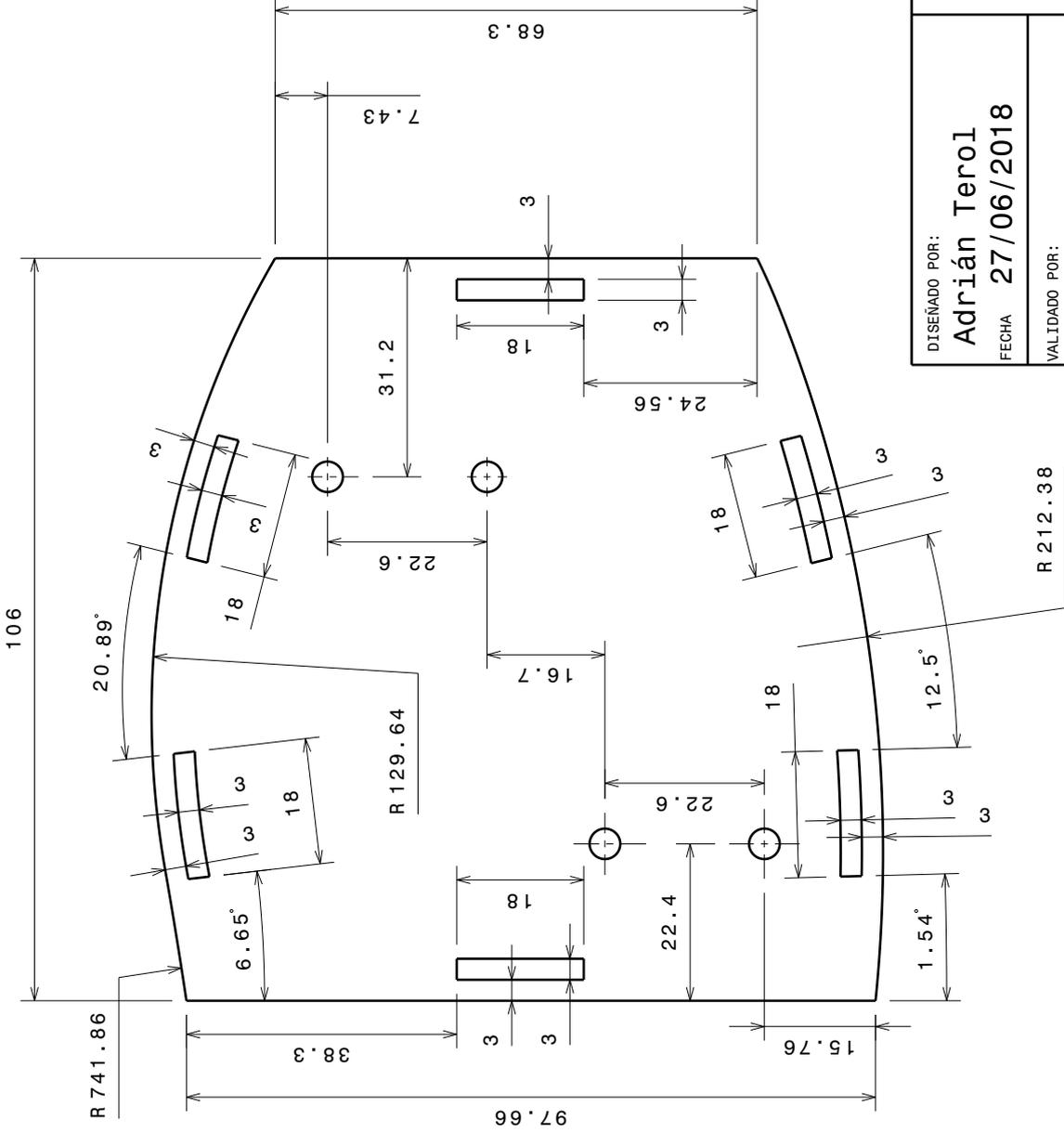
2

1

Espesor: 1 mm.



1:2



DISEÑADO POR:

Adrián Terol

FECHA 27/06/2018

VALIDADO POR:

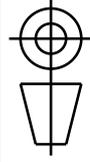
FECHA 27/06/2018

TAMAÑO

A4

ESCALA

1:1



MATERIAL

ACERO

DISEÑADO POR:

Adrián Terol

FECHA 27/06/2018

VALIDADO POR:

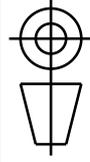
FECHA 27/06/2018

TAMAÑO

A4

ESCALA

1:1



MATERIAL

ACERO

ZANCOS DE CARGA



EII UVA

AMARRE FRONTAL

HOJA

PLANO 2

2/7

D

A

4 3 2 1

m

C

D

Espesor: 2,5 mm

30.3

R5.25

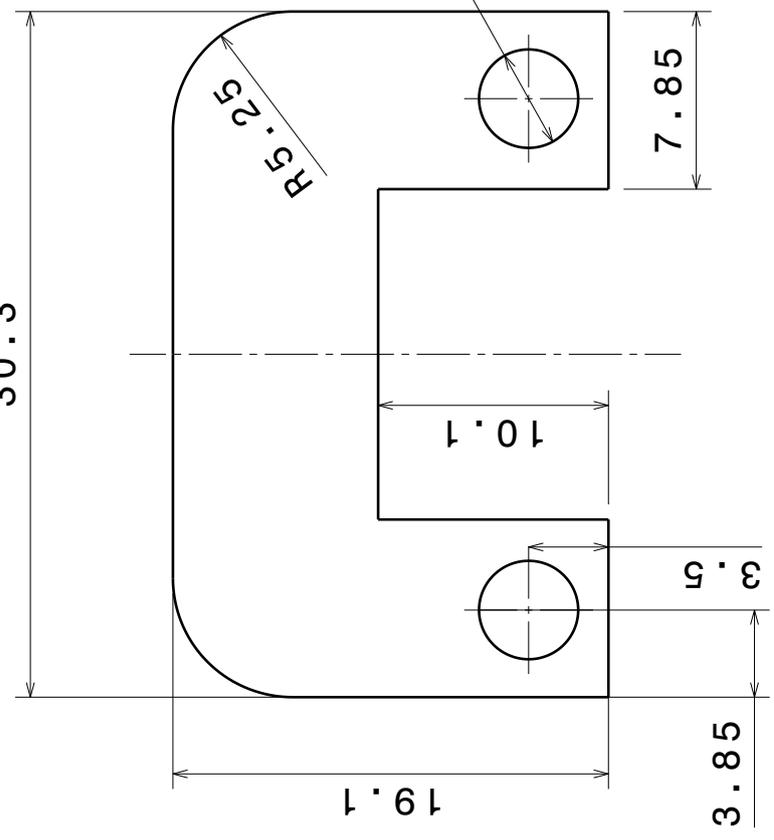
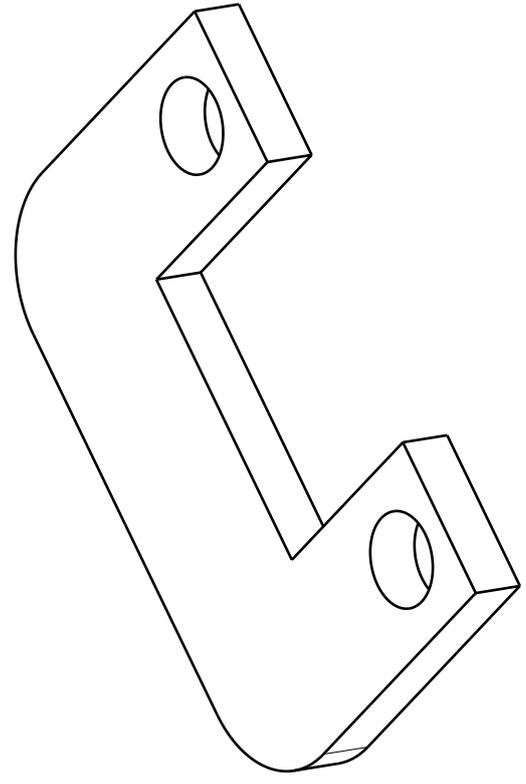
∅ 4.35

10.1

7.85

3.85

3.85



DISEÑADO POR:

Adrián Terol

FECHA 27/06/2018

VALIDADO POR:

FECHA 27/06/2018

TAMAÑO

A4

ESCALA

3:1



MATERIAL

ACERO



ZANCOS DE CARGA



EII UVA

PLETINA SUPERIOR

NUMERO DE PLANO

PLANO 4

HOJA

4/7

4 3 2 1

D

A

4

m

C

D

4

Esesor: 2 mm

11.84

74.44

34.66

4.78

R 129.64

5.45

19.25

23

41.6

9

135°

34

10.8

16

27.09

19.86

99.25

5.65

48.94

8.9

5

5

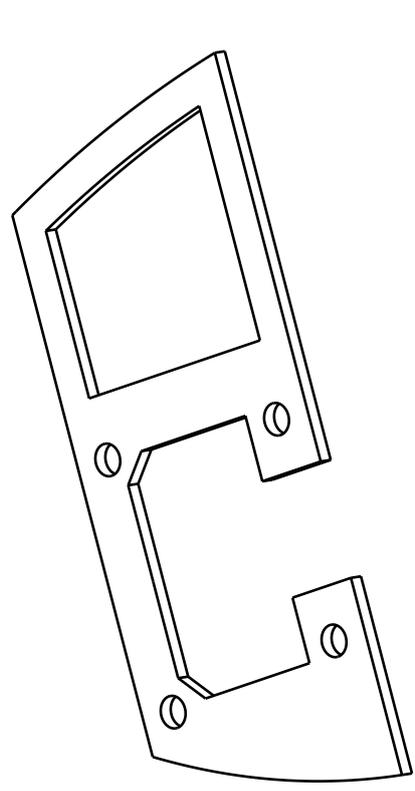
5

5

R 1212.38

3

3



2

2

DISEÑADO POR:

Adrián Terol

FECHA 27/06/2018

VALIDADO POR:

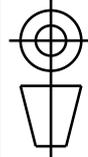
FECHA 27/06/2018

TAMAÑO

A4

ESCALA

1:1



MATERIAL

ACERO



ZANCOS DE CARGA



EII UVA

PLETINA INFERIOR DE LA CÉLULA FRONTAL

NUMERO DE PLANO

PLANO 5

HOJA

5/7

1

1

D

A

A

B

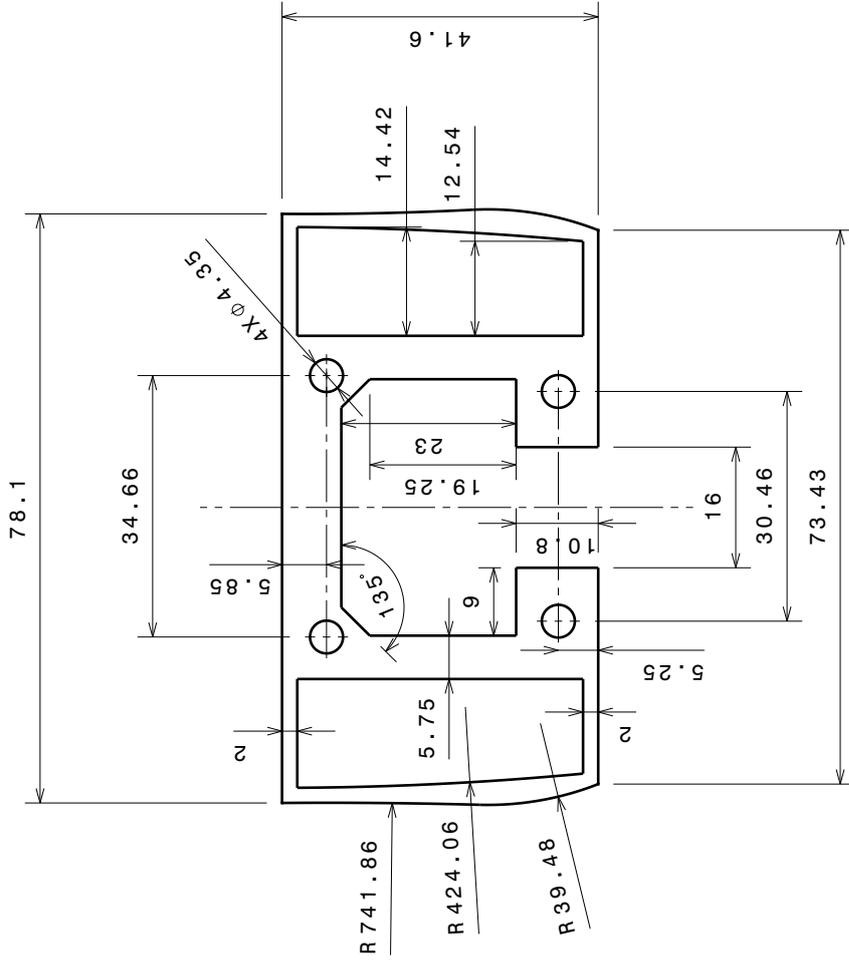
C

D

Espesor: 2 mm

4

4



3

3

2

2

1

1

DISEÑADO POR:

Adrián Terol

FECHA 27/06/2018

VALIDADO POR:

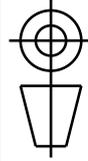
FECHA 27/06/2018

TAMAÑO

A4

ESCALA

1:1



MATERIAL

ACERO



ZANCOS DE CARGA



EII UVA

PLETINA SUPERIOR DE LA CÉLULA TALONAR

NUMERO DE PLANO

PLANO 7

HOJA

7/7

D

A