

UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Grado
CURSO 2017/18

*Caracterización de propiedades mecánicas de paneles
sándwich de polietileno y espuma polietileno/poliuretano*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNA/O

Diego García Torres

TUTORAS/ES

Manuel Jesús González Castro

FECHA

DICIEMBRE 2017



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO 2017/18**

*Caracterización de propiedades mecánicas de paneles
sándwich de polietileno y espuma polietileno/poliuretano*

Grado en Ingeniería Mecánica

MEMORIA

Resumen

Caracterización de propiedades mecánicas de paneles sándwich de polietileno y espuma polietileno/poliuretano

Castellano

Debido al gran aumento del uso del panel sándwich en la industria, es necesario conocer su comportamiento estructural, para lograr optimizar todo el potencial de este tipo de estructuras. Es necesario caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales que constituyen el panel sándwich. En el presente trabajo se realiza un ensayo de flexión a 3 puntos para obtener el módulo elástico aparente y la resistencia a flexión según la norma **UNE-ISO 1209-2:2007**. También se ensaya una probeta de panel sándwich para recabar datos de su comportamiento y compararlos con los resultados obtenidos de la simulación por MEF.

Al mismo tiempo se realiza un ensayo de fluencia en flexión para conseguir determinar si este tipo de estructuras presentan fluencia. Encargar este tipo de ensayos a laboratorios externos es muy caro debido a la larga duración que conlleva. Por este motivo se realiza un ensayo de bajo coste para determinar aproximadamente si la fluencia es importante en este tipo de productos.

Galego

Debido ao gran incremento no uso do panel sándwich na industria, é necesario coñecer o seu comportamento estrutural, para obter todo o potencial deste tipo de estruturas. É necesario caracterizar as propiedades mecánicas dos materiais que compoñen o panel sándwich. No presente traballo realízase unha proba de flexión de 3 puntos para obter o módulo elástico aparente e a resistencia á flexión de acordo coa norma **UNE-ISO 1209-2: 2007**. Tamén se proba unha probeta de panel sándwich para recoller datos sobre o seu comportamento e comparalos cos resultados obtidos da simulación por MEF.

Ao mesmo tempo, realízase unha proba de fluencia de fluidez para determinar se este tipo de estruturas teñen fluidez. Confiar este tipo de probas a laboratorios externos é moi caro debido ao longo tempo que implica. Por este motivo, lévase a cabo unha proba de baixo custo para determinar se a fluencia é importante neste tipo de productos.

English

Due to the great increase in the use of the sandwich panel in the industry, it is necessary to know its structural behavior, in order to optimize the full potential of this type of structure. It is necessary to characterize the mechanical properties of the materials that make up the sandwich panel. In the present work, a 3-point bending test is carried out to obtain the apparent elastic modulus and the flexural strength according to the **UNE-ISO 1209-2: 2007** standard. A sandwich panel test piece is also tested to collect data on its behavior and compare them with the results obtained from the simulation by MEF.

At the same time, a fluence fluency test is carried out to determine if this type of structures have fluency. Entrusting this type of tests to external laboratories is very expensive due to the long duration involved. For this reason, a low-cost test is carried out to determine approximately whether creep is important in this type of product.

ÍNDICE:

1	Introducción	11
1.1	Objeto	11
1.2	Alcance	11
1.3	Normativa aplicable.....	11
1.3.1	Legislación española	11
1.3.2	Directivas europeas	12
2	Panel sándwich	13
2.1	Introducción al panel sándwich	14
2.2	Caracterización de las propiedades mecánicas de un panel sándwich	17
3	Ensayo de flexión.....	19
3.1	Objetivos	19
3.2	Normativa.....	19
3.3	Montaje experimental	21
3.3.1	Construcción y acondicionamiento de la célula de carga	21
3.3.2	Calibración del sensor de fuerza.....	23
3.4	Probetas.....	25
3.5	Procedimiento experimental	28
3.6	Resultados	28
4	Ensayo de fluencia.....	39
4.1	Objetivo.....	39
4.2	Normativa aplicable.....	39
4.3	Montaje experimental	41
4.3.1	Bastidor	41
4.3.2	Medición del desplazamiento.....	44
4.3.3	Electrónica y control	45
4.4	Probetas.....	46
4.5	Procedimiento experimental	50
4.6	Resultados	51
5	Simulación por el Método de Elementos Finitos	59
5.1	Materiales	59
5.2	Sujeciones	60
5.3	Cargas	61
5.4	Mallado	62

5.5	Resultados de la simulación.....	63
6	Conclusiones.....	65
	Agradecimientos	67

Anexo 1. Bibliografía

Anexo 2. Presupuesto

Anexo 3. Esquema eléctrico

Anexo 4. Planos

Anexo 5. Hojas de características

Ilustraciones:

Ilustración 1: Algunos de los productos que comercializa Rotogal	13
Ilustración 2: Perfil de contenedor con núcleo de PUR	13
Ilustración 3: Perfil de contenedor con núcleo de EPE	14
Ilustración 4: Pallet europeo fabricado por Rotogal.....	14
Ilustración 5: Esquema de un panel sándwich.....	15
Ilustración 6: Comparación de estructuras respecto a la flexión	15
Ilustración 7: Viga en I sometida a flexión	17
Ilustración 8: Vista lateral de la probeta y apoyos	19
Ilustración 9: Diagrama típico de fuerza frente a desplazamiento	20
Ilustración 10: Micro Load Cell (0-20kg) - CZL635	22
Ilustración 11: Acoplamiento del sensor de fuerza a la máquina universal de ensayo.....	22
Ilustración 12: Phidget Bridge, amplificador de puente de Wheatstone	23
Ilustración 13: Plano de la función $f(x,y)$	24
Ilustración 14: Probeta 1. Piel de Polietileno	25
Ilustración 15: Probetas 2 y 3. Panel sándwich grueso y delgado	26
Ilustración 16: Probetas 4 y 5. Espuma de Poliuretano	27
Ilustración 17: Probeta 1. Gráfica fuerza frente a desplazamiento.....	28
Ilustración 18: Probeta 1. Secuencia del ensayo de flexión	29
Ilustración 19: Probeta 2. Gráfica fuerza frente a desplazamiento.....	30
Ilustración 20: Probeta 2. Secuencia del ensayo de flexión	31
Ilustración 21: Probeta 3. Gráfica de fuerza frente a desplazamiento	32
Ilustración 22: Probeta 3. Secuencia del ensayo de flexión	33
Ilustración 23: Probeta 4. Gráfica de fuerza frente a desplazamiento	34
Ilustración 24: Probeta 4. Secuencia del ensayo de flexión	35
Ilustración 25: Probeta 5. Gráfica de fuerza frente a desplazamiento	36
Ilustración 26: Probeta 5. Secuencia del ensayo de flexión	37
Ilustración 27:Características del aparato de fluencia	40
Ilustración 28: Idea conceptual de la aplicación de la carga.	41
Ilustración 29: Vista de la máquina de ensayo de fluencia.....	42
Ilustración 30: Imagen real de la máquina de ensayo de fluencia	42
Ilustración 31: Alzado de la máquina de ensayo de fluencia	43
Ilustración 32: Planta de la máquina de ensayo de fluencia.....	43
Ilustración 33: Perfil Izquierdo de la máquina de ensayo de fluencia.....	43
Ilustración 34: Potenciómetro deslizando RS30 de Alps de 10 k Ω	44
Ilustración 35: Colocación del potenciómetro en la máquina de ensayo a fluencia	44
Ilustración 36: Microcontrolador Arduino con el módulo Data Logger Shield ensamblado	45
Ilustración 37: Screw shield para Arduino	45
Ilustración 38: Imagen de la conexión de los potenciómetros a Arduino	46
Ilustración 39: Probetas 9 y 10. Panel sándwich delgado	47
Ilustración 40: Probetas 6 y 7. Panel sándwich grueso	48
Ilustración 41: Probetas 8 y 9. Panel sándwich grueso	49
Ilustración 42: Probeta 10. Variación del desplazamiento frente al tiempo.....	51
Ilustración 43: Probeta 10. Variación de la deformación frente al tiempo	51
Ilustración 44: Probeta 10. Variación del módulo elástico frente al tiempo	51
Ilustración 45: Probeta 11. Variación del desplazamiento frente al tiempo	52

Ilustración 46: Probeta 11. Variación de la deformación frente al tiempo	52
Ilustración 47: Probeta 11. Variación del módulo elástico frente al tiempo	52
Ilustración 48: Probeta 6. Variación del desplazamiento frente al tiempo	53
Ilustración 49: Probeta 6. Variación de la deformación frente al tiempo	53
Ilustración 50: Probeta 6. Variación del módulo elástico frente al tiempo	53
Ilustración 51: Probeta 7. Variación del desplazamiento frente al tiempo	54
Ilustración 52: Probeta 7. Variación de la deformación frente al tiempo	54
Ilustración 53: Probeta 7. Variación del módulo elástico frente al tiempo	54
Ilustración 54: Probeta 8. Variación del desplazamiento frente al tiempo	55
Ilustración 55: Probeta 8. Variación de la deformación frente al tiempo	55
Ilustración 56: Probeta 8. Variación del módulo elástico frente al tiempo	55
Ilustración 57: Probeta 9. Variación del desplazamiento frente a tiempo	56
Ilustración 58: Probeta 9. Variación de la deformación frente a tiempo	56
Ilustración 59: Probeta 9. Variación del módulo elástico frente a tiempo	56
Ilustración 60: Materiales aplicados a los sólidos	60
Ilustración 61: Sujeciones aplicadas a la pieza	61
Ilustración 62: Cargas aplicadas a la pieza	61
Ilustración 63: Conexión de conjunto de contactos	62
Ilustración 64: Malla general de toda la pieza	62
Ilustración 65: Mallado con elementos de menor tamaño en las superficies de contacto	63
Ilustración 66: Resultados del desplazamiento de la simulación bajo una carga de 81.464 N	63
Ilustración 67: Probeta 2. Comparación del ensayo real con la simulación	64
Ilustración 68: Probeta 3. Comparación del ensayo real con la simulación	64

Tablas:

Tabla 1: Efecto del espesor del núcleo en las propiedades mecánicas de la estructura	15
Tabla 2: Materiales de mayor utilización en las estructuras sándwich	16
Tabla 3: Dimensiones recomendadas de probeta	21
Tabla 4: Dimensiones de las probetas. Ensayo de flexión	25
Tabla 5: Parámetros del ensayo de flexión	28
Tabla 6: Comparación del módulo elástico obtenido con el de MATWEB	36
Tabla 7: Dimensiones de las probetas del ensayo de fluencia	46

1 INTRODUCCIÓN

El panel sándwich supone un avance en el diseño estructural en industrias como la naval y aeroespacial pues permite el diseño de estructuras con alta rigidez y resistencia con bajo peso. En industrias como la conservera, alimentación, transporte, almacenaje, etc. La ventaja de utilizar estos materiales es doble, pues se consiguen recipientes, contenedores, pallets que poseen una elevada rigidez a flexión y con los materiales adecuados, que sean isotérmicos, es decir son capaces de aislar del calor.

En cuanto al diseño, los paneles sándwich suponen una mayor complejidad en comparación con los materiales convencionales (aceros, aleaciones, titanio, etc.) cuyas propiedades son isotropas. En cambio, en la estructura sándwich el comportamiento mecánico depende de un mayor número de variables, tanto en el diseño del propio panel como el de su composición geométrica de la estructura. Esto crea la necesidad de investigar este tipo de materiales para conseguir un conocimiento mayor, necesario para realizar simulaciones mediante MEF del comportamiento mecánico y lograr, con ayuda de estos estudios por simulación, su completa optimización.

1.1 Objeto

El objeto del presente trabajo es la caracterización de los materiales que constituyen el panel sándwich, para posteriormente simular mediante MEF el comportamiento de la estructura y comparar su comportamiento estructural con el obtenido en el ensayo de flexión. Además, se realiza un ensayo de fluencia al panel sándwich para averiguar si presenta visco elasticidad.

1.2 Alcance

- Búsqueda de la normativa necesaria para conocer los ensayos necesarios para la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales que constituyen el panel sándwich y para determinar su comportamiento en fluencia.
- Caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales que forman el panel sándwich mediante un ensayo de flexión en 3 puntos.
- Diseño y construcción de una máquina de ensayo en la cual se realiza el ensayo de fluencia en flexión por el método de carga en 3 puntos.
- Simulación por el Método de Elementos Finitos con el software SolidWorks para comparar el comportamiento simulado con los resultados obtenidos en el ensayo de flexión.

1.3 Normativa aplicable

Este apartado tiene como objetivo informar de la normativa y requisitos mínimos que debe cumplir cualquier máquina, equipo de laboratorio o taller, utilizada para docencia o investigación, con el fin de que su compra o diseño reúna los requisitos básicos de seguridad, cumpla la legislación vigente, y su utilización en el trabajo se realice en condiciones de seguridad.

Las disposiciones legales tanto en ámbito nacional como las de carácter comunitario de aplicación en este proyecto se recogen a continuación.

1.3.1 Legislación española

Ley 31/1995: Ley de Prevención de Riesgos Laborales.

Ley de Industria: 21/1992 - Seguridad y calidad industrial.

R.D.: 1435/1992 - Máquinas, componentes de seguridad. Marcado "CE"

R.D.: 56/1995 que modifica parte del texto del R.D. 1435/1992.

R.D.: 1215/1997 - Equipos de trabajo. Disposiciones mínimas de seguridad y de salud.

R.D.: 444/1994 - Aparatos que pueden crear perturbaciones electromagnéticas.

R.D.: 1644/2008 - Normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas

1.3.2 Directivas europeas

Directiva 98/97/CE

Directiva 2006/42/CE

2 PANEL SÁNDWICH

El panel sándwich que se caracteriza en este trabajo es un palet europeo fabricado por la empresa Rotogal, empresa que dedica a la fabricación de productos de plásticos mediante rotomoldeo. Comercializa bins isotérmicos, monopared y de depuración. Sus principales clientes son empresas de sectores como la industria conservera, sector cárnico, alimentación, almacenaje, transporte, etc.



Ilustración 1: Algunos de los productos que comercializa Rotogal

Rotogal, en cuanto a su composición estructural, posee dos tipos de contenedores, rotomoldeados de doble pared con aislamiento de PUR, y rotomoldeados con aislamiento EPE de máxima resistencia.



Ilustración 2: Perfil de contenedor con núcleo de PUR

Fabricado en doble pared de Polietileno con un aislamiento de espuma de poliuretano (PUR) de célula cerrada muy resistente (ilustración 2), posee una gran capacidad isotérmica haciéndolo idóneo para productos que sean susceptibles de necesitar dicha propiedad.



Ilustración 3: Perfil de contenedor con núcleo de EPE

Fabricado en doble pared sándwich de Polietileno con un aislamiento de espuma de polietileno (EPE), ilustración 3, posee una gran resistencia contra impactos y en apilado, aunque su capacidad isotérmica es inferior a la del contenedor con núcleo de PUR. Su utilización es principalmente para procesado, almacenaje y transporte de carne

El pallet europeo, ilustración 4, es el producto del cual se obtiene el panel sándwich. Fabricado en Polietileno con un núcleo de Poliuretano, es un producto ideal para realizar el presente trabajo. El Polietileno tiene una densidad de 936 kg/m^3 , mientras que la espuma de Poliuretano es de 40 kg/m^3 .

De este pallet se extrajeron dos tipos de probetas de panel sándwich. De la superficie superior, la que soporta la carga, hay un panel sándwich con un espesor nominal de 40 mm, el cual será denominada como grueso. Por otro lado, en la viga inferior que está entre los pilares exteriores del pallet, hay un panel sándwich con un espesor nominal de 20 mm. Más adelante se detallan los espesores de cada material en ambos tipos de paneles.



Ilustración 4: Pallet europeo fabricado por Rotogal

Según el fabricante, el pallet tiene una carga máxima estática de 2000 kg y una carga máxima dinámica de 1000 kg. Esto obliga a realizar un ensayo de fluencia al panel sándwich para averiguar si los materiales que forman la estructura presentan fluencia.

2.1 Introducción al panel sándwich

El panel sándwich está formado por dos pieles resistentes que encierran un núcleo (core), que por lo general es de baja densidad. Entre la piel y el núcleo se coloca un adhesivo para conseguir la unión entre ambas partes. En la ilustración 5 se muestra imagen esquemática.

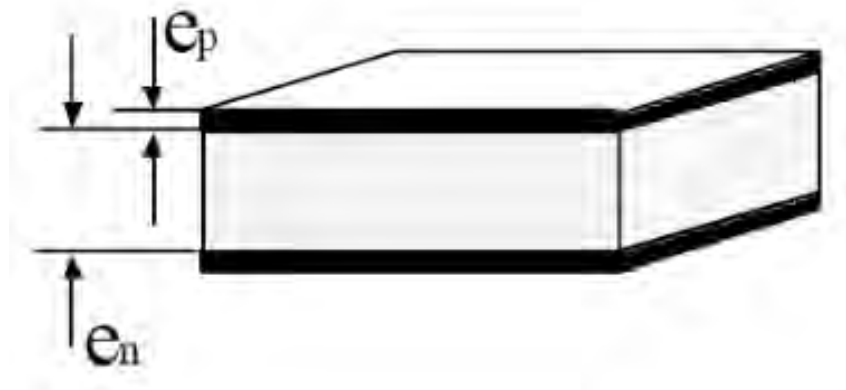


Ilustración 5: Esquema de un panel sándwich

Donde:

- e_p : espesor de la piel
- e_n : espesor del núcleo

Cada componente tiene una función determinada. Las pieles exteriores son los elementos resistentes, será el material con una rigidez más elevada, el núcleo, material de mayor ligereza, se encarga de transmitir los esfuerzos cortantes y, por último, el adhesivo o interfase que se encarga de mantener unidas las dos pieles al núcleo.

El material del núcleo se elige para aligerar el peso de la estructura, y debe ser compatible con el material de las pieles, y con los métodos de fabricación usados. Si se eligen bien los materiales se puede conseguir relaciones de rigidez y resistencia frente al peso mejores de las que se pueden llegar a lograr con estructuras convencionales.

Con este tipo de construcciones se logra elevados valores de rigidez a flexión con un peso ínfimo, en comparación con las estructuras convencionales. Las características que más cabe citas son las siguientes:

- Bajo peso. Permite excelente comportamiento en estructuras de placas reduciendo el peso de material gracias a la introducción del núcleo.
- Rigidez a flexión. Para ilustrar este aspecto, se muestra en la tabla 1 una comparación de la rigidez a flexión, resistencia y peso de varias configuraciones geométricas de la estructura de un panel en función del espesor.



Ilustración 6: Comparación de estructuras respecto a la flexión

Espesor núcleo	0	t	3t
Rigidez a flexión	1	7	37
Resistencia	1	3,5	9,25
Peso	1	1,03	1,06

Tabla 1: Efecto del espesor del núcleo en las propiedades mecánicas de la estructura

En la tabla 1 queda claro que, sin incrementar prácticamente el peso, la rigidez a flexión y la resistencia aumentan considerablemente en la segunda y tercera solución respecto de la primera.

- Propiedades de aislamiento térmico y acústico.

Las características más desfavorables derivadas del uso de este tipo de estructuras son:

- Mala resistencia al fuego de determinados materiales que se utilizan en el núcleo. El riesgo al fuego con materiales más estructurales convencionales es menor.
- Punzonamiento o hundimiento local. Frente a cargas de impacto, es sensible a producir fallo en el núcleo a causa de la compresión cuando las pieles son muy delgadas.
- Baja hermeticidad frente al agua, lo que conlleva una degradación del adhesivo y posteriormente del núcleo.

En cuanto a la fabricación de las estructuras sándwich, las pieles se pueden curar por separado y adherir posteriormente al núcleo, co-curar con el núcleo en una única operación o una combinación de ambos métodos. Al hacerlo por separado se asegura un mejor acabado superficial de las pieles, pero puede presentar problemas de ajuste entre la piel y el núcleo. El proceso de co-curar, por el contrario, presenta un mejor ajuste de las pieles al núcleo, pero un peor acabado superficial lo que conlleva unas propiedades mecánicas más pobres.

En la tabla 2 se recogen los materiales más utilizados tanto en las pieles como el núcleo, así como la estructuración geométrica de este último.

	PIELES	NÚCLEOS
Expandido	Metales Laminados Contrachapados termoplásticos*	Espuma de poliuretano Espuma de poliestireno*
Placa nervada	amianto/cemento Metales Laminados	Metal Material compuesto.
Nido de abeja	Contrachapados Laminados Aluminio	Madera Nido de abeja de cartón Nido de abeja de Aluminio

*NOTA IMPORTANTE: Las resinas poliésteres atacan a las espumas de poliestireno.

Tabla 2: Materiales de mayor utilización en las estructuras sándwich

En este tipo de estructuras las caras o pieles del material compuesto soportan casi todos los esfuerzos en el plano y los momentos de flexión fuera del plano, proporcionando casi toda la rigidez a flexión pues tiene un módulo de elasticidad mucho mayor que el del núcleo, y están situadas a una distancia mayor del eje neutro de la estructura. El núcleo por otra parte transmite el cortante como una flexión alrededor del eje neutro de la estructura. El núcleo también aporta rigidez a cortante a través del espesor y estabiliza las cargas de las pieles pudiendo así soportar mayores esfuerzos que una placa delgada sometida a cargas de pandeo.

La idea básicamente para entender el comportamiento de este tipo de estructuras en cuanto a resistencia mecánica es que al separar las pieles se consigue aumentar la rigidez a flexión actuando de forma similar a una viga en I. Es decir, el ala inferior soporta esfuerzos de tracción y la superior esfuerzos de compresión (suponiendo una flexión que tracciona el ala inferior y comprime el ala superior). Por tanto, el núcleo hace una función similar al alma de la viga, resistiendo las cargas de cortadura transversal.

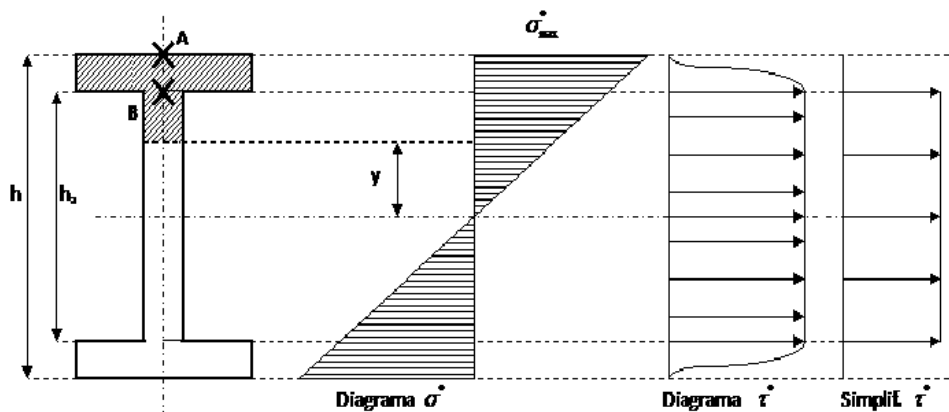


Ilustración 7: Viga en I sometida a flexión

Por tanto, se pueden considerar las siguientes hipótesis en las estructuras sándwich en cuando a comportamiento mecánico:

- Las pieles resisten todas las cargas en el plano y los momentos flectores.
- El núcleo separa las pieles y transmite cortadura entre ambas de manera que se pueden considerar efectivos respecto a un eje neutro común.
- Las cargas fuera del plano se suponen reaccionadas por el núcleo.

Aunque la rigidez a flexión se ve incrementada significativamente con respecto a una construcción monolítica con el mismo peso, no ocurre lo mismo con la rigidez plana y la resistencia.

2.2 Caracterización de las propiedades mecánicas de un panel sándwich

Para conocer el comportamiento de un panel sándwich se necesita conocer las propiedades mecánicas de los materiales que componen la estructura. Para ello se realizará un ensayo de flexión a 3 puntos, con el cual se obtiene el módulo elástico de flexión de la probeta y la resistencia a flexión. Se efectúa este ensayo a la piel, al núcleo y al panel sándwich. Se realiza según la norma **UNE-ISO 1209-2:2011**.

Por otra parte, es necesario conocer si el panel sándwich presenta fluencia, es decir, un incremento en la deformación con respecto del tiempo bajo una carga constante. Para llevar a cabo este ensayo, en el cual la probeta está sometida a una flexión en 3 puntos, se diseña y construye una máquina para efectuar el experimento según la norma **UNE-EN ISO 899-2:2003**.

3 ENSAYO DE FLEXIÓN

3.1 Objetivos

El objetivo de este ensayo es caracterizar las propiedades mecánicas de los dos materiales que forman el panel sándwich por separado, es decir, se efectúa un ensayo a una probeta del núcleo y otro a una probeta de la piel. También se realiza el experimento a dos probetas sándwich, una gruesa y otra delgada, para recoger datos de su comportamiento estructural y comprobar mediante MEF el resultado obtenido en la caracterización de los componentes que constituyen la estructura sándwich.

El ensayo se realiza en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol con una máquina Servosis serie ME-402/10 equipada con el software PCD2K, que tiene una carga máxima de 10 toneladas. Al poseer una carga máxima tan alta, su sensibilidad para medir fuerza en magnitudes de Newtons es insuficiente, pues o tendría un ruido muy elevado o directamente no detecta cargas de magnitudes tan pequeñas. Por tanto, es necesario construir una célula carga con más sensibilidad en este rango de cargas.

3.2 Normativa

La norma que se aplica para conseguir la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales que constituyen el panel sándwich es la **UNE-ISO 1209-2:2007**. Esta especifica un método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad en flexión aparente de los materiales celulares rígidos.

Principalmente, en este ensayo se aplica una carga a velocidad uniforme por medio de un cabezal sobre una probeta que se sujeta sobre dos puntos. La carga se aplica perpendicularmente a la probeta en su posición media entre los puntos de soporte (véase la ilustración 9). Se registra la curva carga/desplazamiento, a partir de la cual, se calcula la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad aparente.

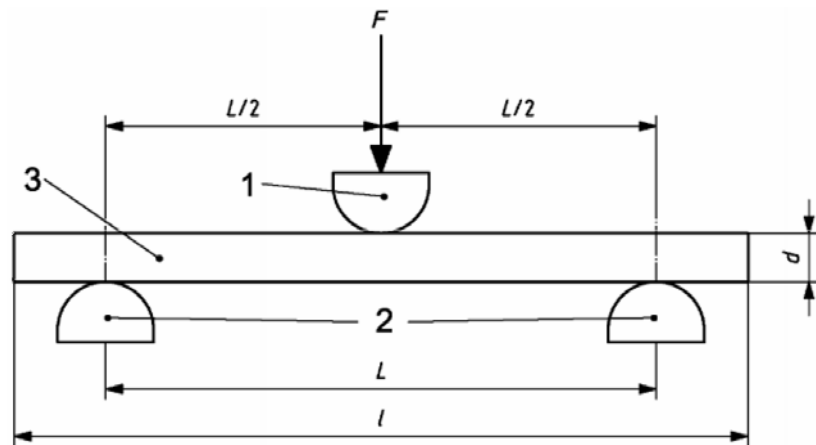


Ilustración 8: Vista lateral de la probeta y apoyos

Leyenda

- 1 Cabezal móvil con un cilindro que tenga un radio de 15 ± 1 mm
- 2 Apoyos con un radio de 15 ± 1 mm
- 3 Probeta

- L Distancia entre apoyos
- l Longitud de la probeta
- d Espesor de la probeta
- F Fuerza aplicada

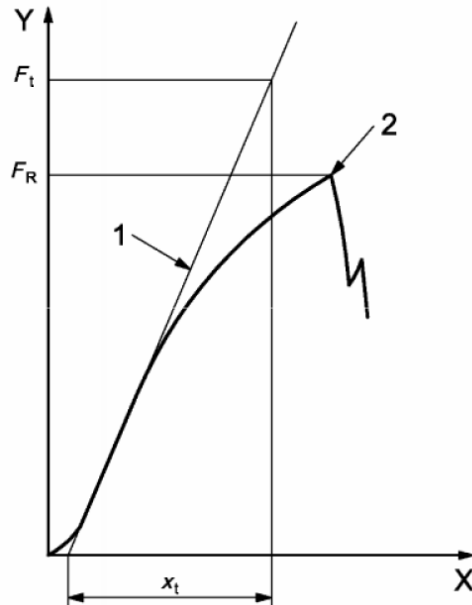


Ilustración 9: Diagrama típico de fuerza frente a desplazamiento

donde:

- X Deformación (mm)
- Y Fuerza (N)
- 1 tangente
- 2 punto de rotura

La resistencia a flexión viene dada por la ecuación 1:

$$R = 1.5 \cdot F_R \frac{L}{bd^2} \text{ [MPa]} \quad \text{Ec.1}$$

donde:

- F_R es la fuerza de rotura en N
- L es la distancia entre los apoyos en mm
- b es la anchura de la probeta en mm
- d es el espesor de la probeta en mm

El módulo de elasticidad en flexión aparente viene dado por la ecuación 2:

$$E = \frac{L^3}{4bd^3} \cdot \frac{F_t}{x_t} \text{ [MPa]} \quad \text{Ec.2}$$

donde:

- F_t es la fuerza en N correspondiente a la deformación x_t
- x_t es el desplazamiento correspondiente en mm
- L, b y d tienen el mismo significado que el definido en la expresión anterior

En cuanto a la forma y dimensiones de la probeta, esta debe ser un paralelepípedo rectangular y que tenga las dimensiones dadas en la tabla 3.

Dimensión	Dimensión recomendada (mm)	Límite(s) en las dimensiones (mm)
Longitud	350	$\geq (L+50)$
Anchura, b	4d	$\geq 2d$
Espesor, d	25	15 a 38 mm
Distancia entre apoyos, L	300	12d a 16d

Tabla 3: Dimensiones recomendadas de probeta

La norma **UNE-ISO 1209-2:2007** en principio, únicamente es válida para caracterizar el núcleo. Para obtener las propiedades de la piel, la norma a utilizar es **UNE-ISO 178 (2001)** la cual especifica un método para la determinación de las propiedades de flexión de materiales plásticos rígidos y semi-rígidos. También indica que el método no resulta adecuado para ser utilizado para ser utilizado con materiales celulares rígidos o con estructuras tipo multicapa que contengan material celular. Como es de interés ensayar el panel sándwich para recabar datos de su comportamiento a flexión, parece que los más adecuado es aplicar la **UNE-ISO 1209-2:2007**.

Se revisaron normativas americanas, **ASTM C393** y **ASTM D790**.

La **ASTM C393** es específica para estructuras sándwich y permite obtener distintos parámetros está especificada para probetas que tengan una relación de espesor de la piel con el espesor del núcleo, menor de 0.1, condición que no cumple nuestra probeta sándwich.

La **ASTM D790** se utiliza para caracterizar las propiedades mecánicas de plásticos por el método de flexión. Esta norma indica las mismas ecuaciones que la **UNE-ISO 1209-2:2007** para calcular las propiedades mecánicas.

Al no encontrar ninguna norma específica para estructuras sándwich fuera adecuada para la probeta que se tiene, se decide aplicar la norma **UNE-ISO 1209-2:2007** pues cumple dos condiciones, su probeta recomendada es muy similar al panel sándwich, y teniendo una distancia entre apoyos de 300 mm, facilita el ensayo al poder aplicar una carga más pequeña.

3.3 Montaje experimental

Como se ha comentado ya con anterioridad, la célula de carga de la máquina universal no tiene la suficiente sensibilidad como para realizar el ensayo correctamente con este tipo de materiales. Al estar calibrada para medir cargas en kN, si se realizara el experimento, los datos de carga tendría un ruido inmenso siendo casi imposible obtener resultados válidos. Por ello, se construye una célula de carga que será capaz de medir la fuerza con mayor exactitud, hasta un máximo de 400 N. En definitiva, se medirá el desplazamiento con la máquina universal del laboratorio y la fuerza con la nueva célula de carga.

3.3.1 Construcción y acondicionamiento de la célula de carga

Este dispositivo está formado por dos micro-células de 20 kg (ilustración 10), fabricadas por Phidgets. Para no confundir términos, se llama sensor de fuerza al montaje y célula de carga a los dos instrumentos de Phidgets. Para la construcción del sensor de fuerza, se utilizan dos perfiles y diversa tornillería para unir el soporte de la maquina con el rodillo de carga y se unen los dos perfiles con las dos células de carga, midiendo así la carga. En la ilustración 11 se muestra el acoplamiento. La máxima carga que será capaz de medir el

sensor de fuerza es de 400 N, pues cada una de las células es capaz de medir como máximo una carga de 20 kg.

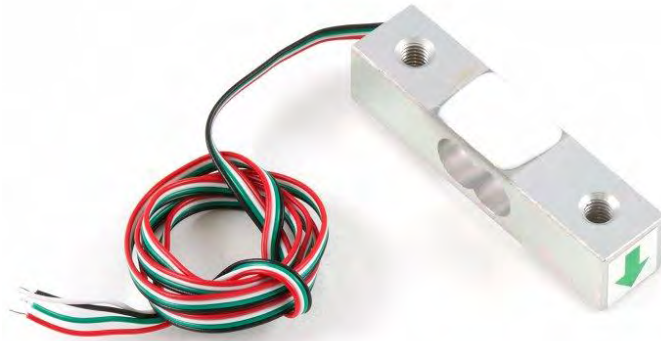


Ilustración 10: Micro Load Cell (0-20kg) - CZL635



Ilustración 11: Acoplamiento del sensor de fuerza a la máquina universal de ensayo

Las células de carga están formadas por 4 galgas extensiométricas colocadas formando un puente de Wheatstone. Una galga extensiométrica o extensómetro se basa en el efecto piezorresistivo, que es la propiedad que tienen ciertos materiales de cambiar el valor nominal de su resistencia cuando se les somete a ciertos esfuerzos y se deforman en dirección de los ejes mecánicos. El puente de Wheatstone es un circuito que tiene una sensibilidad muy pequeña por lo que es necesario amplificar para reducir interferencias electromagnéticas y tener una mayor sensibilidad.

Para acondicionar la señal se utiliza un amplificador, un Phidget Bridge que permite conectar hasta 4 puentes a la vez (ilustración 12).



Ilustración 12: Phidget Bridge, amplificador de puente de Wheatstone

3.3.2 Calibración del sensor de fuerza

Una vez acondicionada la señal de salida del sensor de fuerza, es necesario una calibración para que la carga medida sea equivalente con la real. Para ello se carga con distintos pesos, que van de 1 a 10.32 kg y en distinto lugar a lo largo del perfil. Al tener dos células de carga, la salida será función de las dos señales acondicionadas por lo tenemos que linealizar los datos para obtener una función que sea dependiente de dos variables. La función obtenida es un plano. En la ilustración 10 se muestra los resultados de la linealización realizada en Matlab con la función Curve Fitting Toolbox. Se observa como el R^2 es de 1.0000, parámetro que indica que la linealización es correcta.

Estos diferentes pesos equivalen a un valor distinto de tensión de cada célula. Se tiene una variable dependiente que es la fuerza y su valor depende de los dos valores de tensión de las células de carga. Linealizando estos datos se obtiene un plano, que se muestra en la ilustración 10. Se observa que el valor de R^2 es de 1.0000 y por lo tanto la calibración es correcta.

La función del plano es:

$$f(x, y) = 178.8 \cdot V_1 + 181 \cdot V_2 - 23.95$$

Ec.3

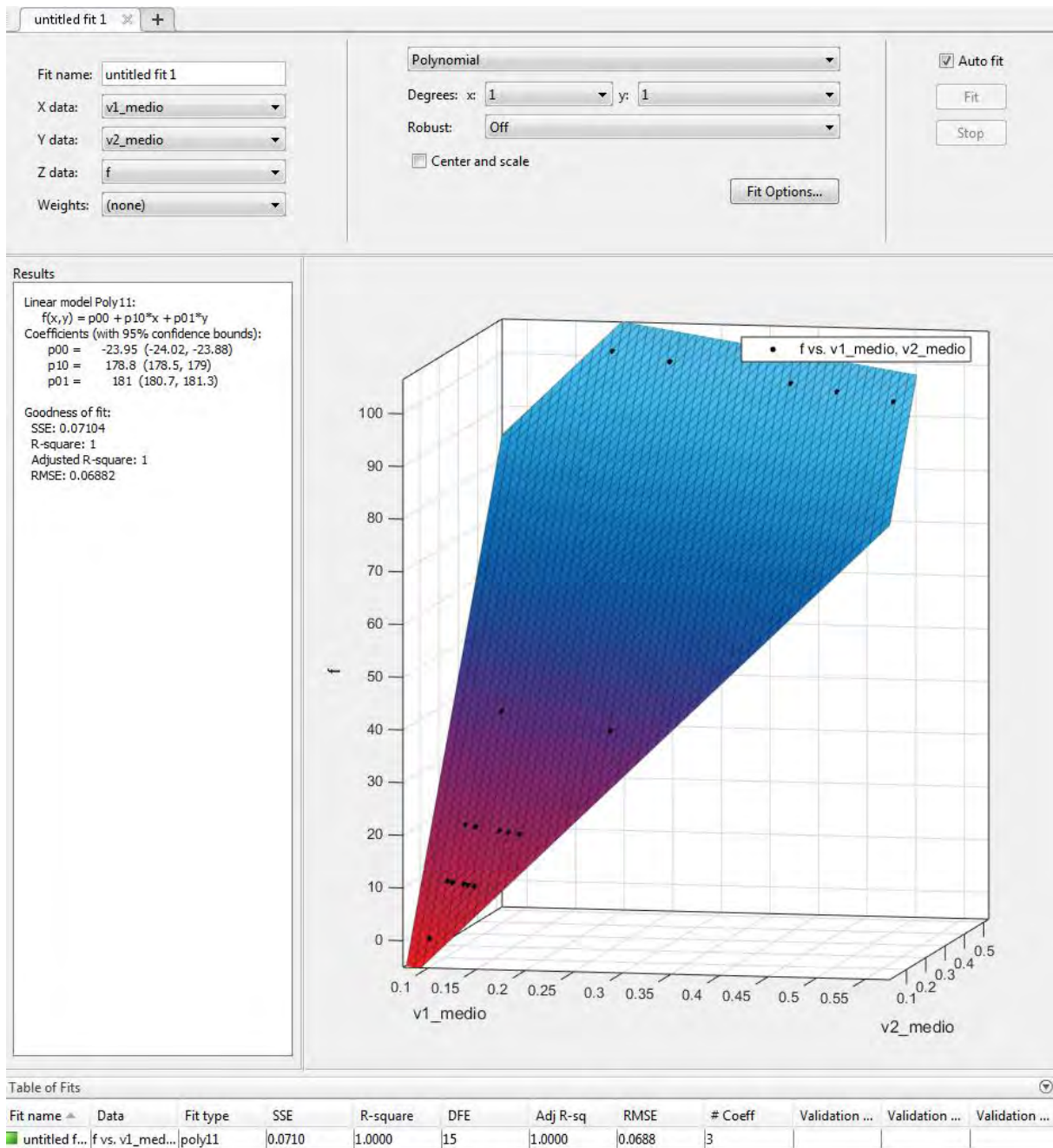


Ilustración 13: Plano de la función $f(x,y)$

3.4 Probetas

En este apartado se indican las dimensiones de las probetas, junto con unas ilustraciones de las mismas.

	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
Material	Polietileno (piel)	Sándwich grueso	Sándwich delgado	Espuma PUR (núcleo)	Espuma PUR (núcleo)
Longitud	375	385	385	280	315
Anchura, b	100	100	100	100	100
Espesor piel superior	-	10	4	-	-
Espesor piel inferior	5.5	6	6	-	-
Espesor núcleo	-	25	10	26.5	10
Espesor total, d	5.5	41	20	26.5	10

Tabla 4: Dimensiones de las probetas. Ensayo de flexión

La longitud de la probeta 4 es de menor tamaño porque al intentar despegarle la piel, no se hizo con el suficiente cuidado por lo que terminó partiéndose.

La probeta 5 es un núcleo de un panel sándwich delgado. Al cortar el pallet en la preparación de la probeta, se observó como el núcleo estaba “incompleto” debido a que durante su fabricación, la espuma de Poliuretano no se expandió correctamente por esta zona del pallet.



Ilustración 14: Probeta 1. Piel de Polietileno



Ilustración 15: Probetas 2 y 3. Panel sándwich grueso y delgado



Ilustración 16: Probetas 4 y 5. Espuma de Poliuretano

3.5 Procedimiento experimental

Se coloca la probeta de ensayo simétricamente orientada con respecto a los apoyos y se aplica una fuerza creciente perpendicular al eje longitudinal de la probeta mediante el movimiento del cabezal móvil a una velocidad constante de 20 mm/min.

Parámetro	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4	Probeta 5
Velocidad (mm / min)	20	6	6	20	20
Distancia entre apoyos (mm)	300	300	300	250	250

Tabla 5: Parámetros del ensayo de flexión

La velocidad del ensayo en las probetas 2 y 3 no es de 20 mm porque parece una velocidad muy elevada para aplicar a este tipo de probetas. Por lo tanto, se buscó alguna normativa cuya probeta fuera estructura sándwich. La norma americana **ASTM C393 – 11**, indica una velocidad de 6 mm/min.

Como se ha mencionado anteriormente, la probeta 4 es de una longitud inferior que el resto de probetas por lo que no ha podido ser ensayada con la misma distancia entre apoyos. Al ser la probeta 5 del mismo material, se ha decidido aplicar el mismo valor en este parámetro para obtener resultados, en principio, de mayor similitud.

3.6 Resultados

En este apartado se representan los ensayos de cada probeta por separado.

Probeta 1: Polietileno con densidad de 936 kg/m³. Piel del panel sándwich.

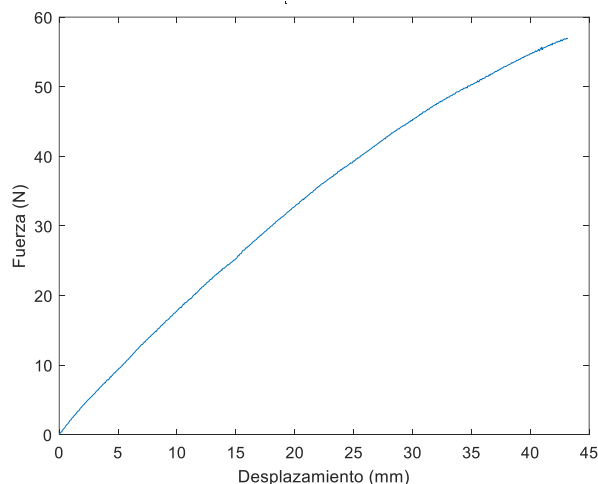


Ilustración 17: Probeta 1. Gráfica fuerza frente a desplazamiento

Se calcula el módulo elástico con la ecuación 2. El resultado es que el Polietileno tiene un módulo de elasticidad a flexión de:

$$E = 711,43 \text{ MPa}$$

Para obtener el resultado anterior se ha calculado el promedio de los diferentes valores del módulo de elasticidad en el intervalo de 10 a 30 N. El intervalo que se ha considerado más tangente a la curva.

La resistencia se obtiene con la ecuación 1, dando un valor de:

$$F_R = 8473,81 \text{ kPa}$$



t = 0 seg



t = 15 seg



t = 30 seg



t = 45 seg



t = 60 seg



t = 75seg



t = 90 seg



t = 105 seg

Ilustración 18: Probeta 1. Secuencia del ensayo de flexión

Probeta 2: Panel sándwich grueso

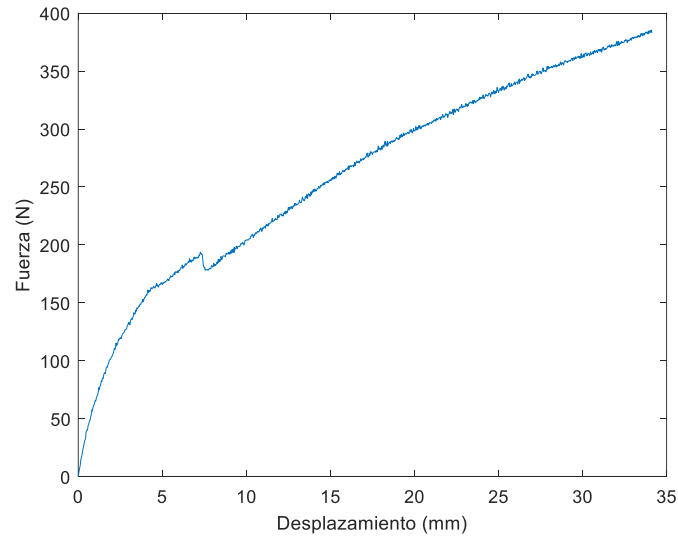


Ilustración 19: Probeta 2. Gráfica fuerza frente a desplazamiento

Aunque no se puede hablar de un módulo de elasticidad como tal, pues está compuesto por diferentes materiales, si se aplica la ecuación para caracterizar esta propiedad, la estructura sándwich proporciona el siguiente módulo de elasticidad en flexión:

$$E = 86,61 \text{ MPa}$$

Este valor ha sido obtenido con el promedio de los valores del intervalo de 0 a 50 N. Se observa como el valor es más cercano al valor del módulo elástico del núcleo que de la piel, pues este supone casi todo el espesor del panel.



t = 0 seg



t = 50 seg



t = 100 seg



t = 150 seg



t = 200 seg



t = 250 seg



t = 300 seg



t = 340 seg

Ilustración 20: Probeta 2. Secuencia del ensayo de flexión

Probeta 3: Panel sándwich delgado

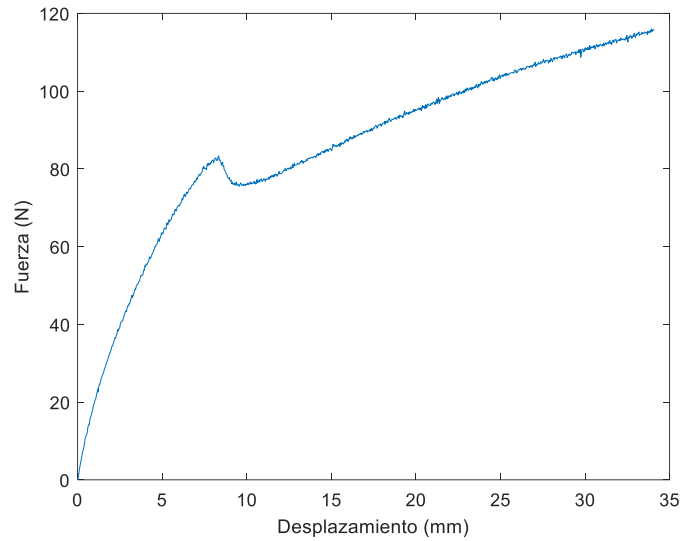


Ilustración 21: Probeta 3. Gráfica de fuerza frente a desplazamiento

De igual forma que en la probeta 2, se proporciona el módulo elástico de flexión, obtenido con el promedio de los valores en el intervalo de 0 a 40 N.

$$E = 163,23 \text{ MPa}$$

Se observa que el valor del módulo de flexión en la estructura sándwich delgada es alto que el de la probeta 2, pues en este caso, el espesor del núcleo es inferior lo que conlleva que su valor se acerque más al módulo elástico del Polietileno, la piel.



t = 0 seg



t = 50 seg



t = 100 seg



t = 150 seg



t = 200 seg



t = 250 seg



t = 300 seg



t = 340 seg

Ilustración 22: Probeta 3. Secuencia del ensayo de flexión

Probeta 4: Espuma de Poliuretano con densidad 40 kg/m³. Núcleo de panel sándwich

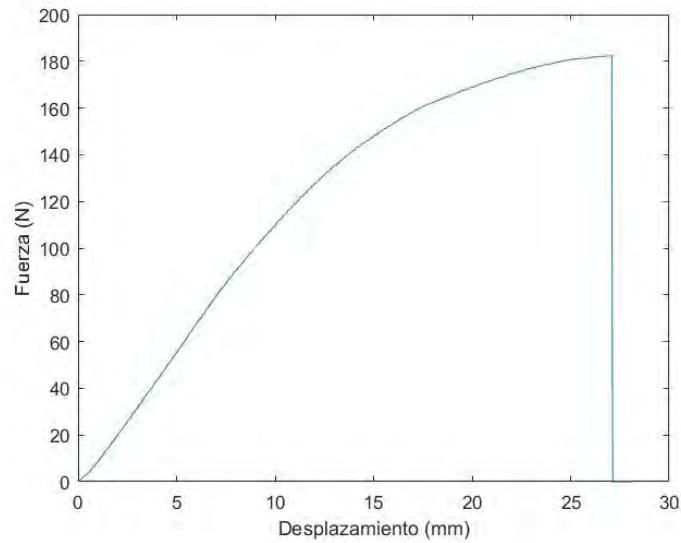


Ilustración 23: Probeta 4. Gráfica de fuerza frente a desplazamiento

El ensayo de esta probeta da como resultado el siguiente módulo elástico de flexión. Este valor se ha obtenido con el promedio de los valores del intervalo de 0 a 80 N, el intervalo de mayor linealidad de la curva.

$$E = 21,5 \text{ MPa}$$

La resistencia a flexión es:

$$F_R = 974,06 \text{ kPa}$$

Este ensayo es el único en el que se alcanza la carga de rotura.



t = 0 seg



t = 10 seg



t = 20 seg



t = 30 seg



t = 40 seg



t = 50 seg



t = 60 seg



t = 70 seg

Ilustración 24: Probeta 4. Secuencia del ensayo de flexión

Probeta 5: Espuma de poliuretano con densidad de 40 kg/m³. Núcleo de panel sándwich

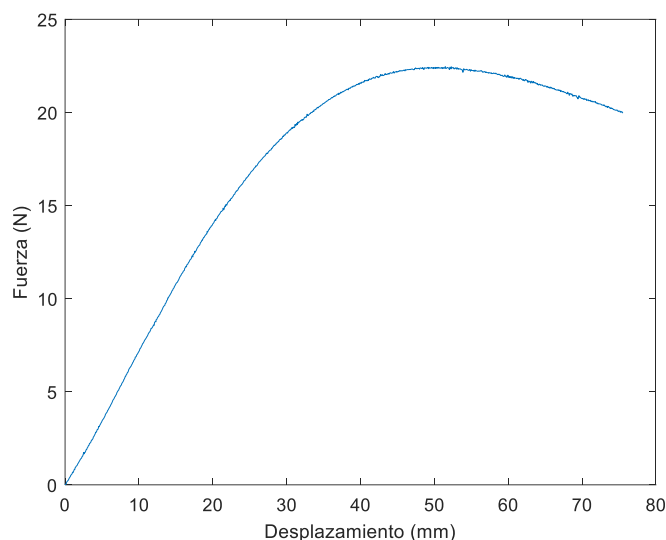


Ilustración 25: Probeta 5. Gráfica de fuerza frente a desplazamiento

Al igual que en las probetas anterior, se muestra los resultados del módulo elástico de flexión y la resistencia. El módulo ha sido obtenido con el promedio de los valores del intervalo de 0 a 15 N.

$$E = 22,97 \text{ MPa}$$

$$F_R = 763,9 \text{ kPa}$$

Comparación del módulo elástico a flexión obtenidas en los ensayos con las de la base de datos MATWEB.

Módulo Elástico de flexión (MPa)	Probeta 1 (PE)	Probeta 4 (espuma PUR)	Probeta 5 (espuma PUR)
Ensayo	711,43	21,5	22,97
MATWEB	500 - 900	21,5	21,5

Tabla 6: Comparación del módulo elástico obtenido con el de MATWEB

Comparando los resultados obtenidos, parece que la caracterización del núcleo es correcta pues los valores del módulo elásticos son casi iguales. En cuanto, a la piel, el resultado está dentro del intervalo, lo que es positivo. De todos modos, el intervalo es tan grande que no se puede asegurar que la caracterización haya sido correcta. Se analizará con un modelo de elementos finitos el comportamiento del panel sándwich y se comparan ambos resultados para tener una conclusión definitiva.



t = 0 seg



t = 30 seg



t = 60 seg



t = 90 seg



t = 120 seg



t = 150 seg



t = 180 seg



t = 210 seg

Ilustración 26: Probeta 5. Secuencia del ensayo de flexión

4 ENSAYO DE FLUENCIA

4.1 Objetivo

El objetivo de este experimento es discernir si el panel sándwich presenta fluencia en flexión bajo la carga en 3 puntos. Realizar este tipo de ensayos en laboratorios externos resulta muy caro debido a la larga duración del experimento, por lo que se plantea realizar un ensayo de bajo coste, para determinar de forma aproximada si la fluencia es importante en este tipo de productos.

Este ensayo se realiza a un total de 6 probetas, 4 sándwich grueso y 2 sándwich delgado. Para llevar a cabo el experimento se diseña y construye una estructura para la realización del ensayo en 3 puntos. Para medir el desplazamiento de la sección media de la probeta, sección donde se aplica la carga, se utilizan potenciómetros lineales, que serán descritos más adelante.

4.2 Normativa aplicable

Para la realización de este ensayo se aplica la norma **UNE-EN ISO 899-2: 2003**. Esta norma especifica un método para la determinación de la fluencia en flexión de plásticos en forma de probetas normalizadas en condiciones especificadas, tales como el tratamiento previo, temperatura y humedad. Se aplica solamente a una barra soportada libremente y cargada en el punto medio de la separación entre apoyos (ensayo de carga en tres puntos).

El método es adecuado para su utilización en materiales plásticos rígidos, y semi-rígidos, no reforzados, cargados con fibras, en forma de probetas con forma de halterio, moldeadas directamente o mecanizadas a partir de hojas o de artículos moldeados.

Si las propiedades de fluencia en flexión se han de utilizar con fines de diseño técnico, los materiales plásticos deberían someterse a ensayo en un amplio intervalo de esfuerzos, tiempos y condiciones ambientales.

La fluencia es el incremento de la deformación con respecto al tiempo, cuando se aplica un esfuerzo constante.

La flecha es la distancia sobre la que la superficie superior o inferior de la probeta, en su sección media, se desvía de su posición original durante la flexión.

El bastidor de ensayo, que comprende un armazón rígido con dos soportes, uno para cada extremo de la probeta, debe estar plano y debe haber espacio suficiente debajo de la probeta para que ésta se pueda doblar bajo la carga estática en el punto medio de la separación entre apoyos.

El sistema de carga tiene que ser capaz de asegurar que la carga se aplica suavemente, sin causar una sobrecarga momentánea, y que la carga se mantiene dentro del $\pm 1\%$ de la carga deseada.

El dispositivo de medición de la flecha, formado por cualquier dispositivo, esté o no en contacto con la probeta, capaz de medir la flecha de la probeta bajo carga sin influir en el comportamiento de dicha probeta por efectos mecánicos. La exactitud del dispositivo de medición de la flecha debe ser del $\pm 1\%$, como mínimo, de la flecha final.

Se elige el esfuerzo de manera que la flecha no sea superior a 0.1 veces la distancia entre apoyos, en cualquier instante durante el ensayo.

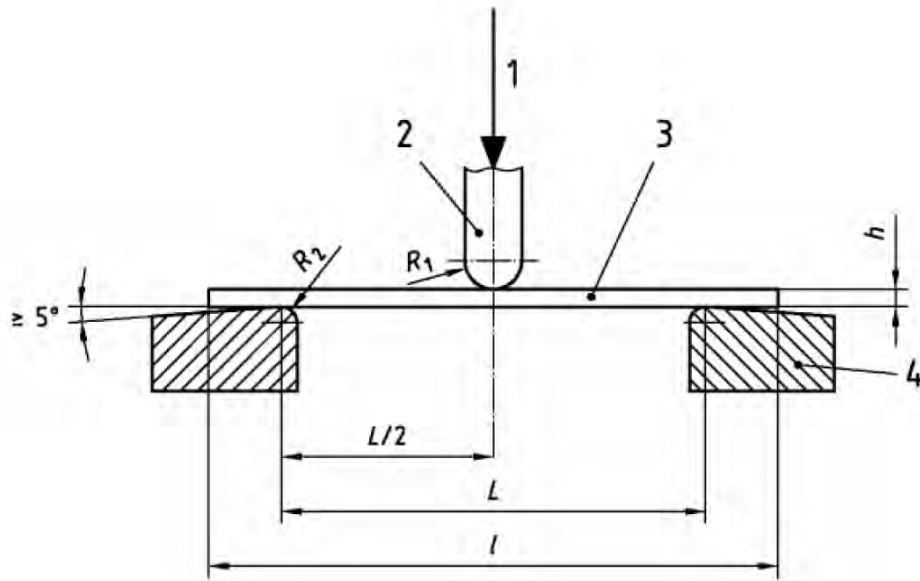


Ilustración 27: Características del aparato de fluencia

Leyenda:

- 1 Fuerza aplicada, F
- 2 Útil de carga
- 3 Probeta
- 4 Soporte

El módulo de fluencia de flexión se calcula con la ecuación 4:

$$E = \frac{L^3 \cdot F}{4bh^3 \cdot s_t} \text{ [MPa]} \quad \text{Ec.4}$$

donde:

- L es la distancia, en mm, entre los soportes de la probeta
- F es la fuerza aplicada, en N
- b es la anchura de la probeta en mm
- h es el espesor de la probeta en mm
- s_t es la flecha, en mm, en el punto medio de separación entre soportes, en el tiempo t

La deformación por fluencia en flexión se calcula utilizando la ecuación 5:

$$\varepsilon_t = \frac{6 \cdot s_t \cdot h}{L^2} \quad \text{Ec.5}$$

donde:

- s_t es la flecha, en mm, en el punto medio de separación entre soportes, en el tiempo t
- h es el espesor de la probeta en mm
- L es la distancia, en mm, entre los soportes de la probeta

Con estas dos ecuaciones se representan las curvas de fluencia correspondientes.

4.3 Montaje experimental

En este apartado se explica el diseño de la máquina de ensayo de fluencia. Primero se explica el bastidor para continuar con la medición del desplazamiento y terminar con la electrónica y control.

4.3.1 Bastidor

El diseño del bastidor se realiza con la idea de ensayar un total de 6 probetas a la vez. La primera idea conceptual para aplicar la carga a las probetas era colocando unos discos de pesas sobre una varilla de forma que el centro del disco quedaría en el punto intermedio de la probeta.

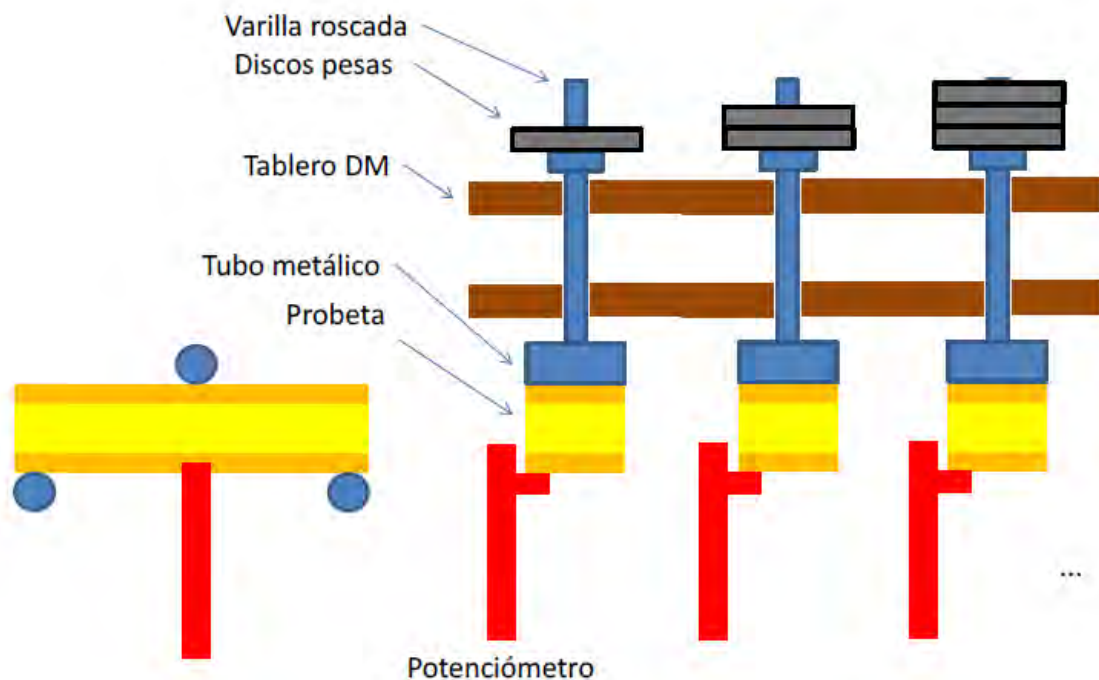


Ilustración 28: Idea conceptual de la aplicación de la carga.

La principal ventaja es que la aplicación de la carga queda muy centrada en la probeta y se logra con un reducido número de material. El problema de este concepto es que los discos son de gran tamaño por lo que sería necesaria una elevada distancia entre dos probetas contiguas, aumentando considerablemente el tamaño del bastidor.

Debido a este inconveniente, la solución final ha sido fijar un perfil de aluminio en U en la parte superior de la varilla, colgando las pesas en los extremos del perfil. De esta manera se tiene una aplicación de la carga equilibrada y es posible que la distancia entre las probetas sea menor. El principal inconveniente es que, al estar colgando las pesas, éstas dificultan la posible necesaria manipulación de las probetas, el medidor del desplazamiento, etc.

En la ilustración 29 se muestra una vista del ensamblaje realizado en SolidWorks. La pieza 1 es un tablero de dm el cual es la base de la máquina. La 2 es un perfil cuadrado de madera, que está atornillado al tablero por debajo, y al cual se fija los tubos de acero, pieza 3, que serán los apoyos de las probetas. Ambos tubos estarán separados 300 mm.

En cuanto a la carga, es importantísimo que se aplique de forma vertical. Para ello, se utilizan dos tablas de dm, pieza 6, que harán la función de guías. Se les realiza unos taladros concéntricos por donde se pasa una varilla roscada y se separan las dos guías una distancia suficiente para asegurar que la carga aplicada es adecuada. Se utilizan patas de

acero (5) para separar las guías. Las dos patas inferiores se fijan con tornillos a un taco de madera (4). A las guías se les realiza 6 taladros de M16 con 95 mm de separación entre ellos. La aplicación de la fuerza se realiza con una varilla roscada M12, que se coloca en el interior de un tubo de PVC para que la varilla no se quede encaja en las guías. La 6 es un perfil en U con un taladro M12 para fijar la varilla al perfil con dos tuercas. De esta forma se transmite la carga desde el perfil a la probeta.

En el anexo 4 se encuentran los planos del bastidor y plano explosionados para mostrar algunos de los detalles del ensamblaje.

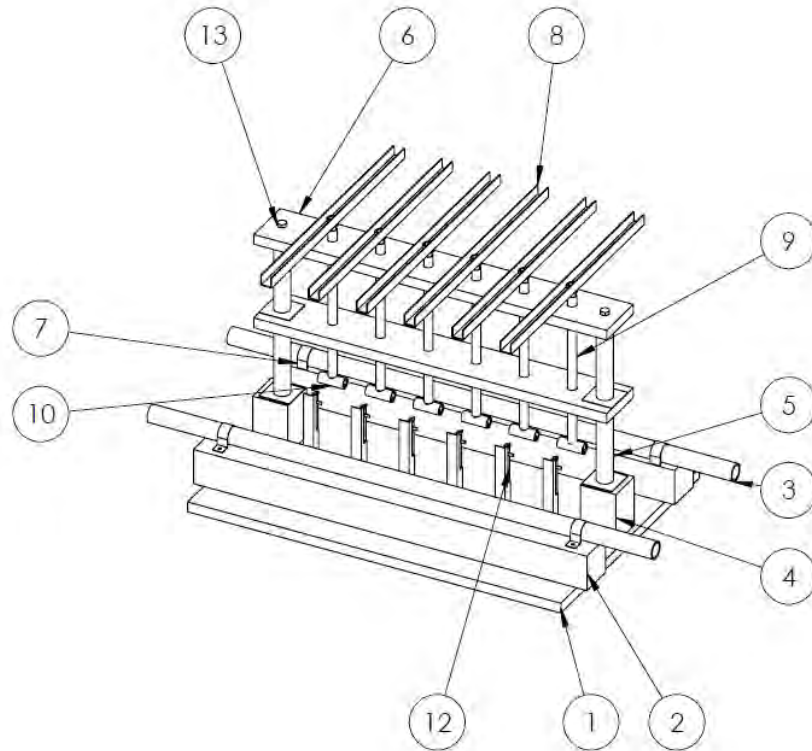


Ilustración 29: Vista de la máquina de ensayo de fluencia



Ilustración 30: Imagen real de la máquina de ensayo de fluencia

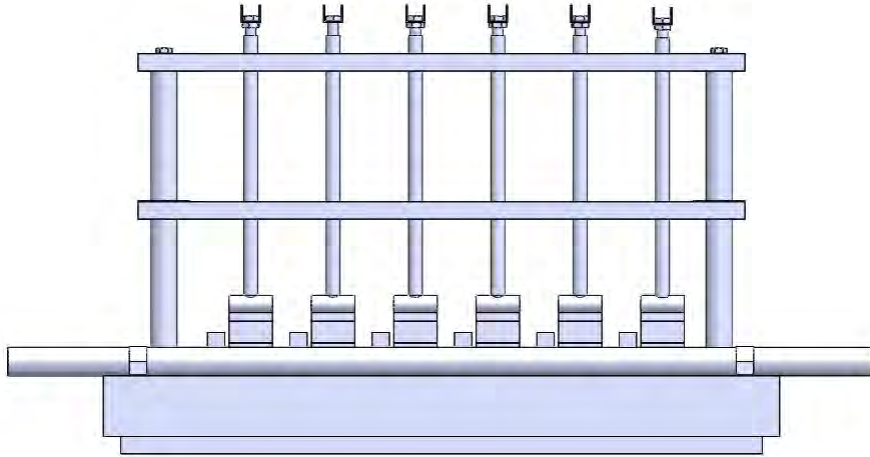


Ilustración 31: Alzado de la máquina de ensayo de fluencia

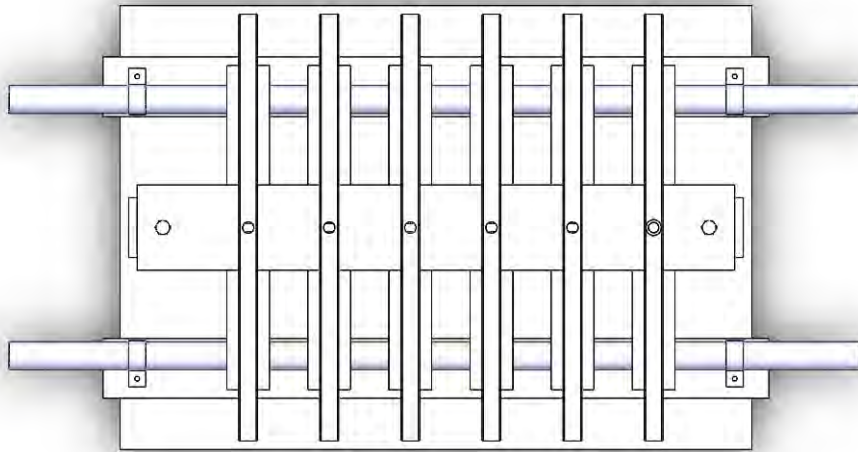


Ilustración 32: Planta de la máquina de ensayo de fluencia

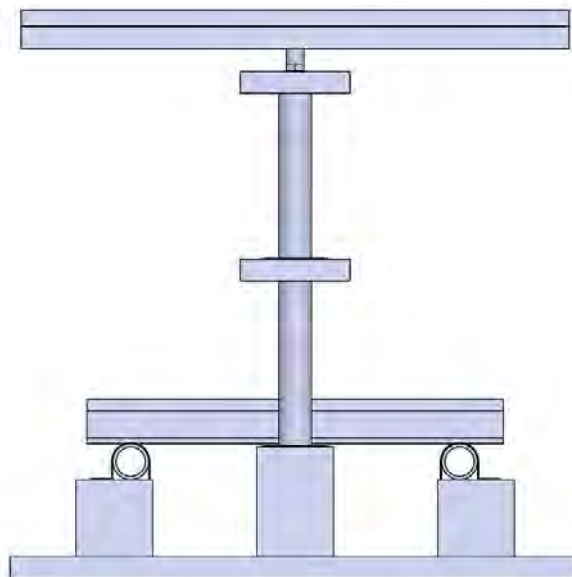


Ilustración 33: Perfil izquierdo de la máquina de ensayo de fluencia

4.3.2 Medición del desplazamiento

Como se ha dicho con anterioridad, la flecha de la sección media de la probeta se mide con un potenciómetro deslizante de 10 k Ω .



Ilustración 34: Potenciómetro deslizante RS30 de Alps de 10 k Ω

Este potenciómetro deslizante de Alps, que está diseñado para aplicaciones de audio, tiene una longitud de cuerpo de 75 mm y un recorrido del actuador de 60mm. El actuador, que es la pequeña palanca cónica metálica que se observa en la ilustración 34, se colocará por debajo de la probeta justo en la sección intermedia, midiendo así el desplazamiento. El potenciómetro se atornilla a un perfil L de aluminio de unos 120 mm de altura quedando justo al lado de la probeta como se muestra en la ilustración 35.



Ilustración 35: Colocación del potenciómetro en la máquina de ensayo a fluencia

4.3.3 Electrónica y control

La lectura del potenciómetro deslizante se realiza con un Arduino Leonardo, un microcontrolador ATmega32U4, que dispone de USB nativo por hardware y por lo tanto no necesita conversión serie-USB. Además, tiene hasta 12 entradas analógicas, más que suficientes para leer el desplazamiento de las probetas.

Debido a la larga duración del ensayo, unas 1000 horas, los datos leídos por el microcontrolador, serán grabados en una tarjeta microSD. Para ello se adquiere un módulo compatible con Arduino, Adafruit Data Logger Shield. Además, este módulo contiene un RTC (Real Time Clock) que, después de ajustar, mantiene la hora incluso cuando el microcontrolador esté sin alimentación. De esta forma se grabará en la tarjeta microSD la lectura de cada potenciómetro junto con la hora a la que toma la medida, pudiendo así obtener el desplazamiento respecto al tiempo. En la ilustración 36 se muestra este módulo ensamblado en un microcontrolador Arduino.

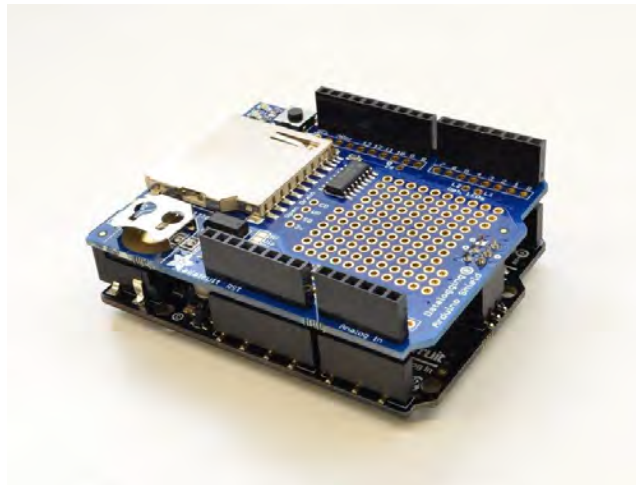


Ilustración 36: Microcontrolador Arduino con el módulo Data Logger Shield ensamblado

Se utiliza un screw shield para asegurar una correcta conexión eléctrica entre el microcontrolador y los potenciómetros deslizantes.

Los terminales de los potenciómetros se sueldan con cable de 0.5 mm y se conectan a la screw shield.



Ilustración 37: Screw shield para Arduino

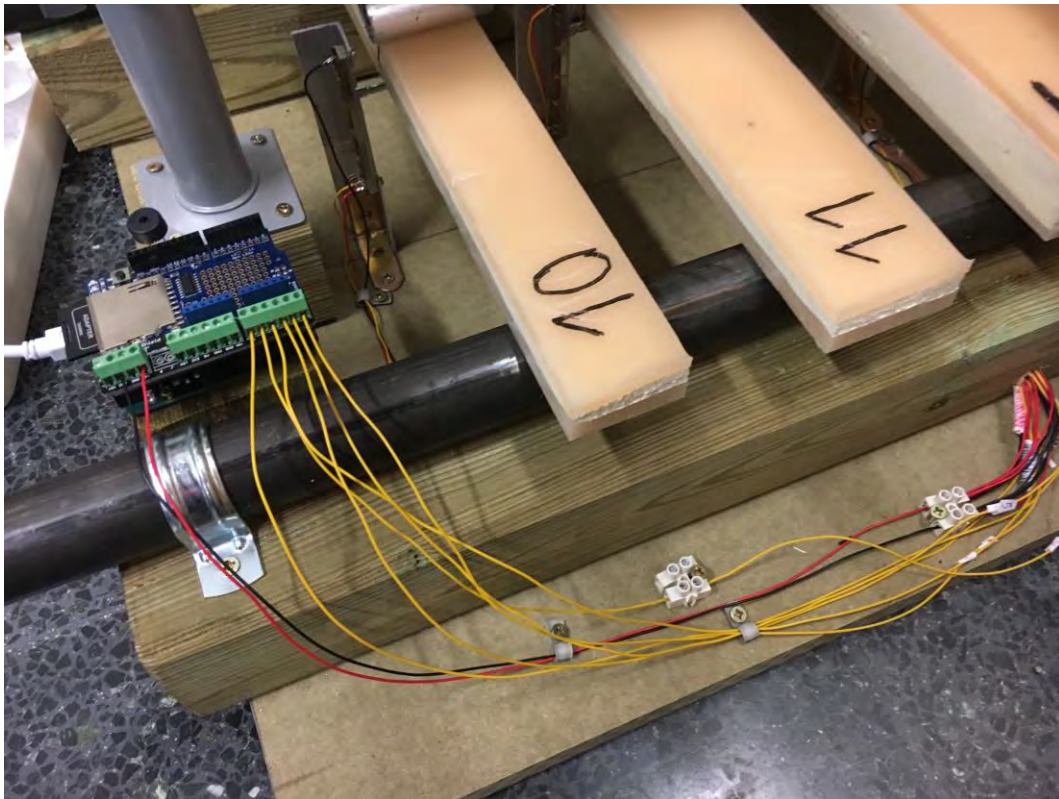


Ilustración 38: Imagen de la conexión de los potenciómetros a Arduino

4.4 Probetas

En este apartado se indican las dimensiones de las probetas y se muestran algunas ilustraciones de estas.

Probeta	6	7	8	9	10	11
Longitud (mm)	370	370	380	380	390	388
Anchura (mm)	50	50	50	50	41	50
Espesor piel superior (mm)	8	10	7.5	10	4	5
Espesor piel inferior (mm)	6	6	5	6	10	10
Espesor núcleo (mm)	29	26	29.5	25	6	6
Espesor total (mm)	43	42	42	41	20	21
Peso aplicado (kg)	4	6	10	14	4	6
Fuerza aplicada (N)	39.24	58.86	98.1	137.34	39.24	58.86

Tabla 7: Dimensiones de las probetas del ensayo de fluencia

Para este ensayo, se ha reducido la anchura de las probetas para poder ensayar un mayor número de estas sin aumentar en consideración las dimensiones del bastidor.



Ilustración 39: Probetas 9 y 10. Panel sándwich delgado

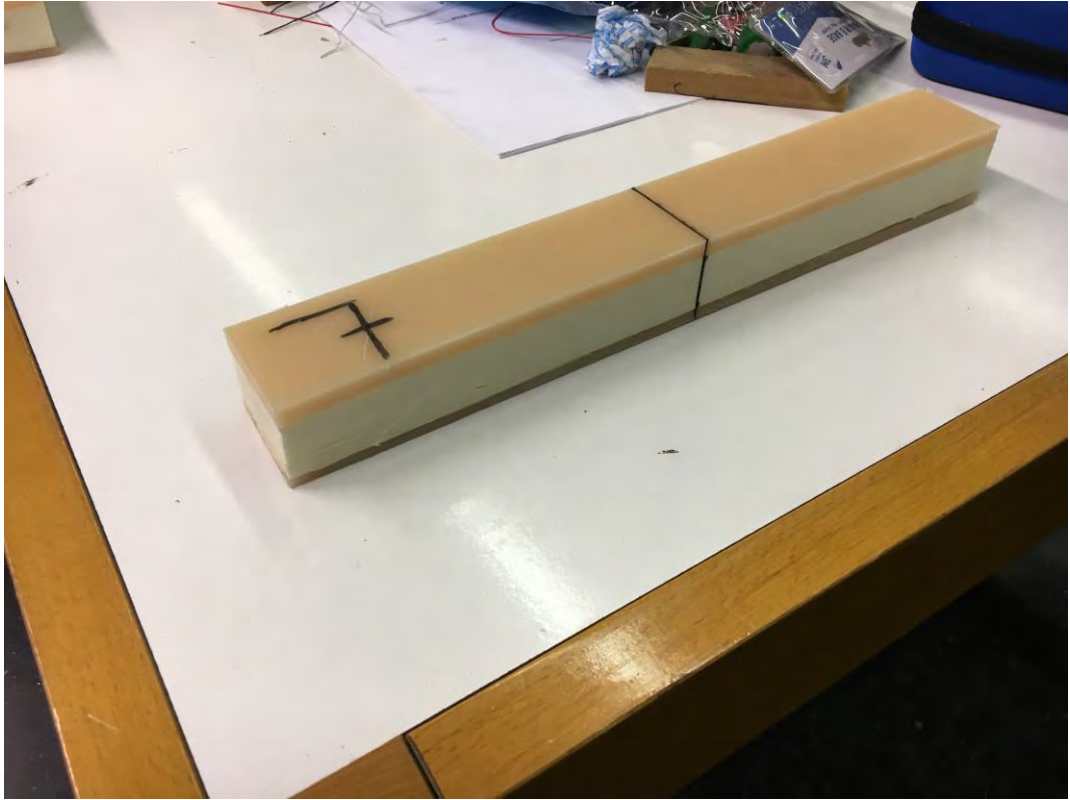


Ilustración 40: Probetas 6 y 7. Panel sándwich grueso



Ilustración 41: Probetas 8 y 9. Panel sándwich grueso

4.5 Procedimiento experimental

La probeta se carga progresivamente, de manera que la carga total de la probeta se alcance entre 1 y 5 segundos después del comienzo de la aplicación de la carga. Se utiliza la misma velocidad de carga para cada serie de ensayos sobre un material.

Se anota como $t = 0$ el momento en el que la probeta está completamente cargada. A no ser que la flecha se registre automática y o continuamente, se eligen los tiempos para efectuar las mediciones individuales en función de la curva de fluencia obtenida con el material particular bajo ensayo.

En este trabajo, la medición se realiza de forma automática cada 10 minutos.

La duración del ensayo es de 1000 horas. En este trabajo se han alcanzado las 960.

Aunque no se ha medido la temperatura durante el experimento, el lugar donde se ha realizado (Laboratorio de Ingeniería Mecánica) tiene un ambiente controlado, por lo que se puede suponer una temporada promedio de 21 °C.

4.6 Resultados

Gráficas del ensayo de la probeta 10, carga aplicada de 39.24 N (4 kg):

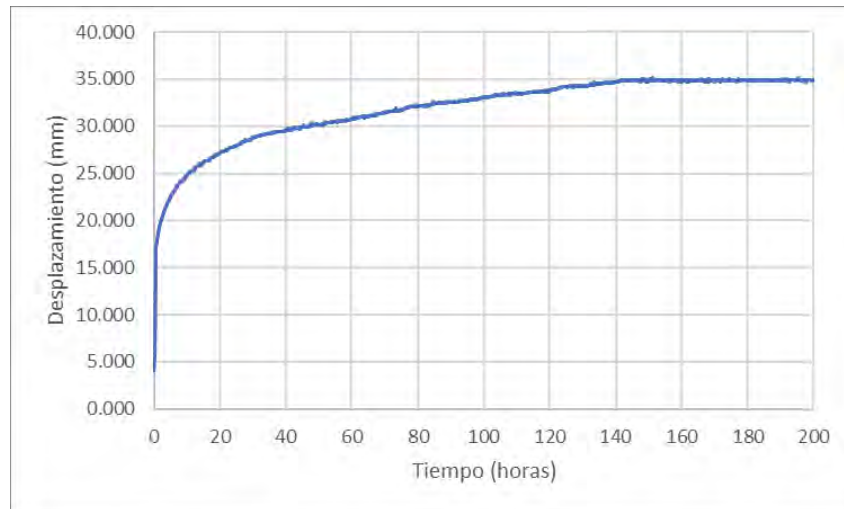


Ilustración 42: Probeta 10. Variación del desplazamiento frente al tiempo

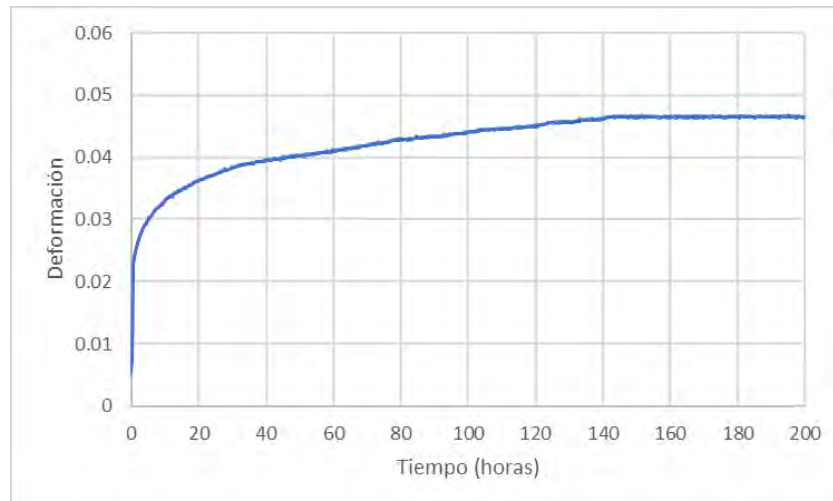


Ilustración 43: Probeta 10. Variación de la deformación frente al tiempo

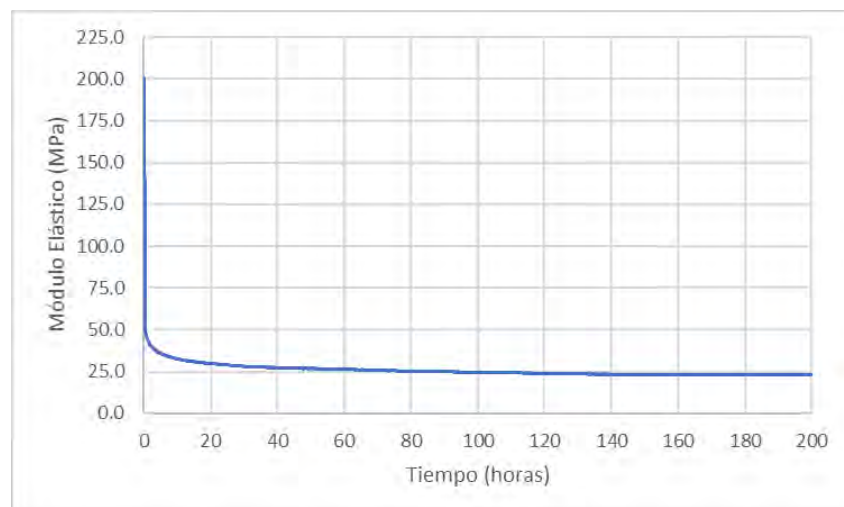


Ilustración 44: Probeta 10. Variación del módulo elástico frente al tiempo

Gráficas del ensayo de la probeta 11, carga aplicada de 58.86 N (6 kg):

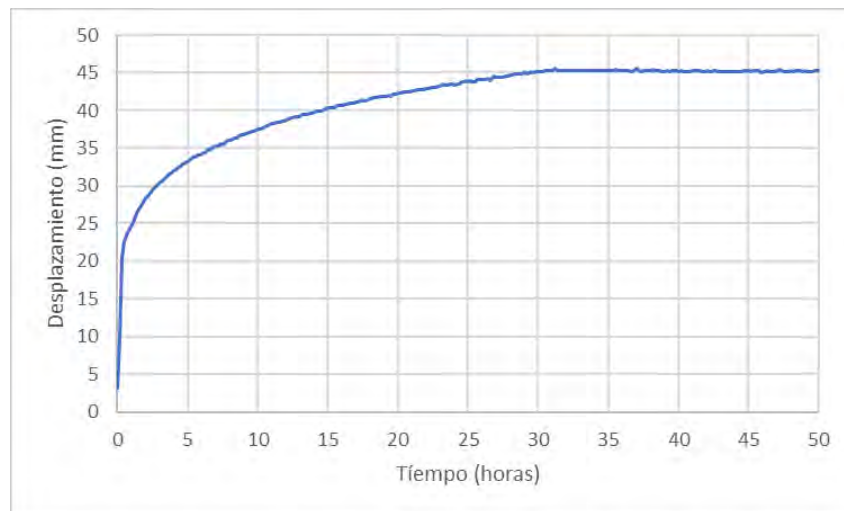


Ilustración 45: Probeta 11. Variación del desplazamiento frente al tiempo

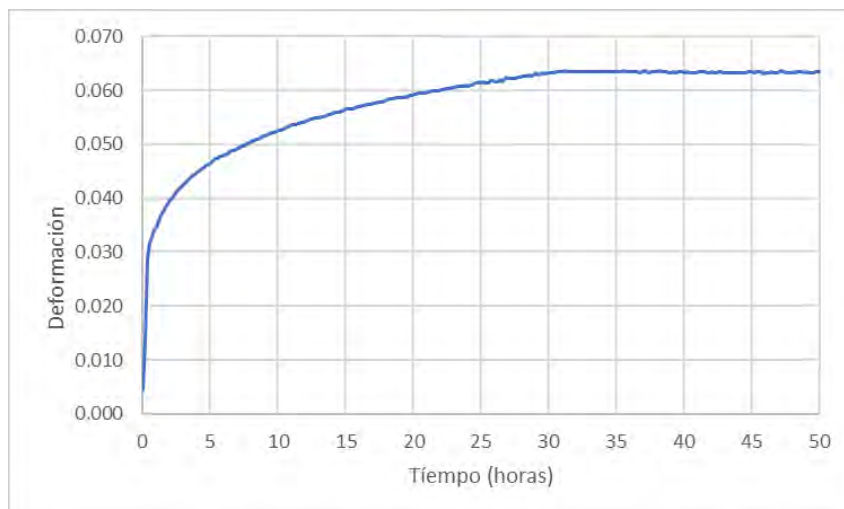


Ilustración 46: Probeta 11. Variación de la deformación frente al tiempo

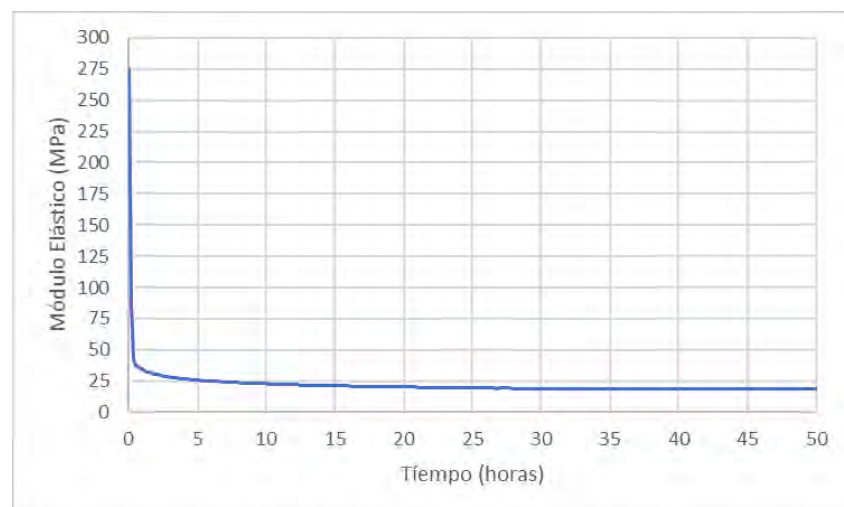


Ilustración 47: Probeta 11. Variación del módulo elástico frente al tiempo

Gráficas del ensayo de la probeta 6, carga aplicada de 39.24 N (4 kg):

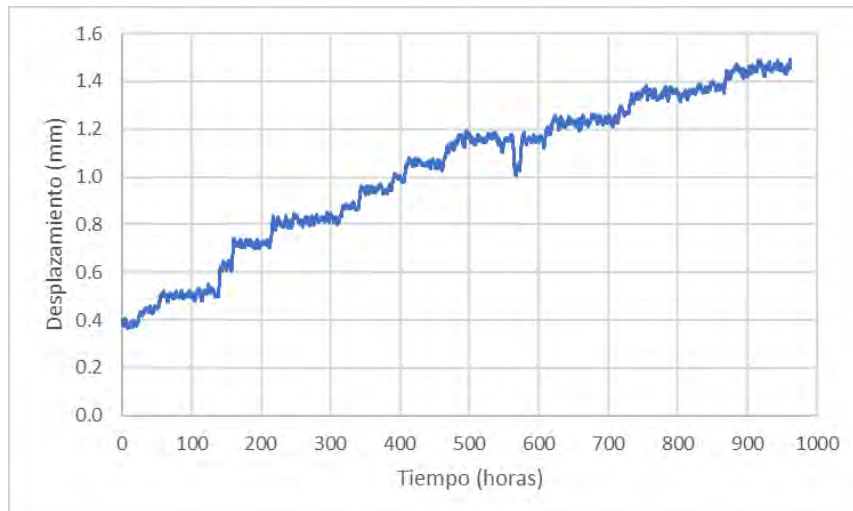


Ilustración 48: Probeta 6. Variación del desplazamiento frente al tiempo

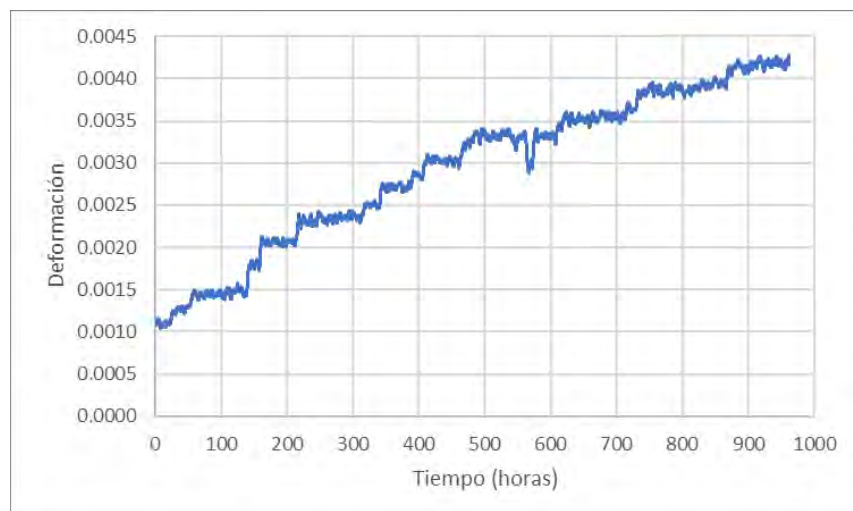


Ilustración 49: Probeta 6. Variación de la deformación frente al tiempo

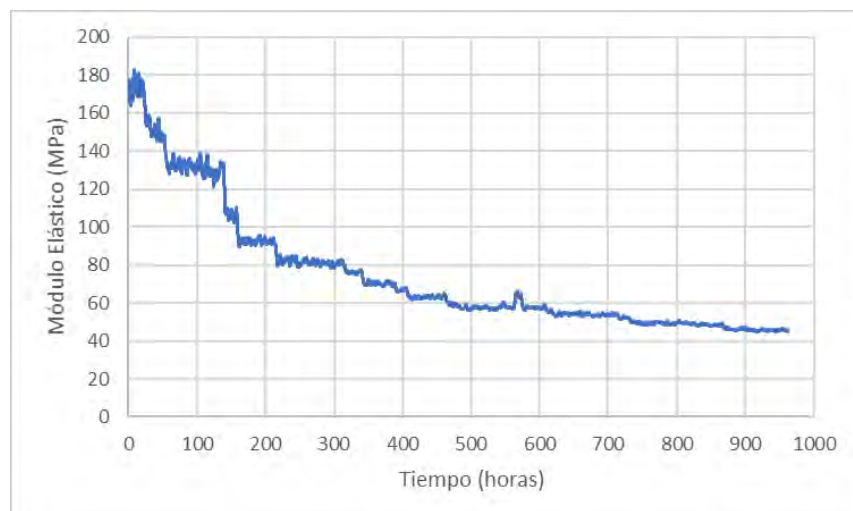


Ilustración 50: Probeta 6. Variación del módulo elástico frente al tiempo

Gráficas del ensayo de la probeta 7, carga aplicada de 58.86 N (6 kg):

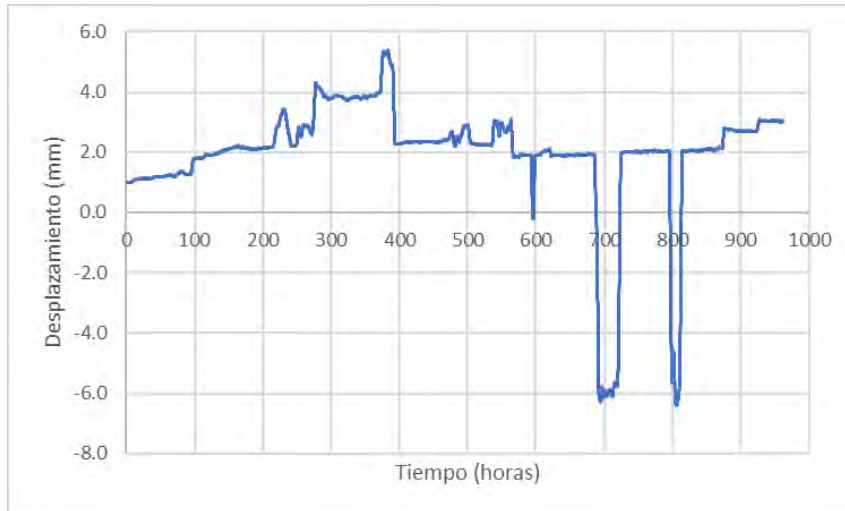


Ilustración 51: Probeta 7. Variación del desplazamiento frente al tiempo

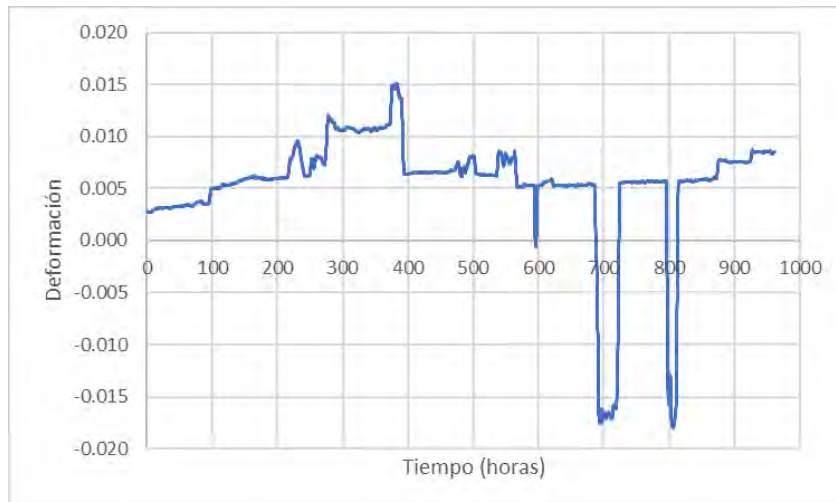


Ilustración 52: Probeta 7. Variación de la deformación frente al tiempo

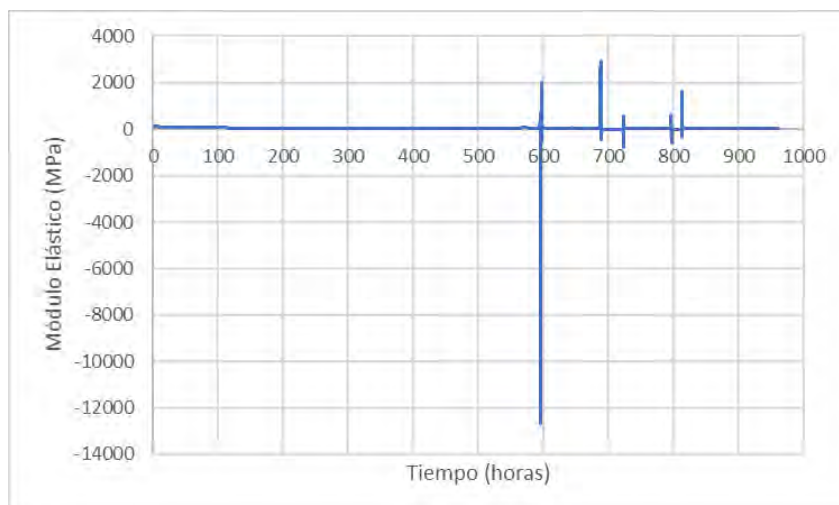


Ilustración 53: Probeta 7. Variación del módulo elástico frente al tiempo

Gráficas del ensayo de la probeta 8, carga aplicada de 98.1 N (10 kg):

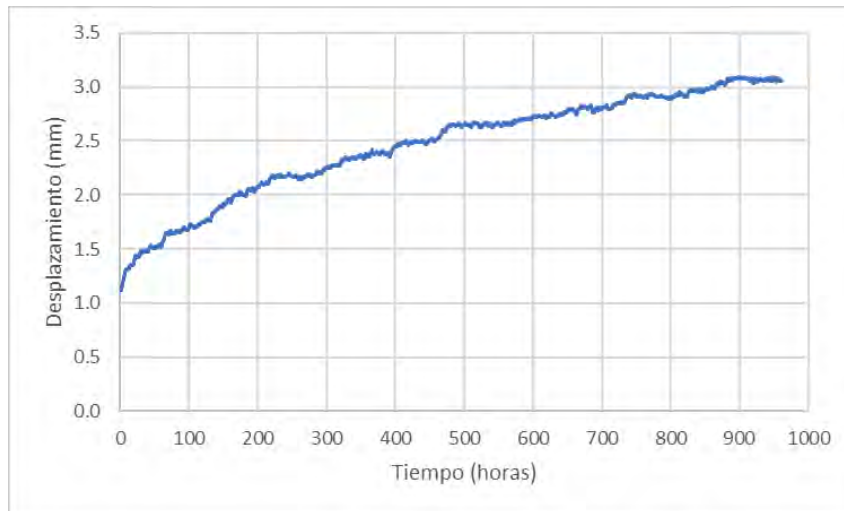


Ilustración 54: Probeta 8. Variación del desplazamiento frente al tiempo

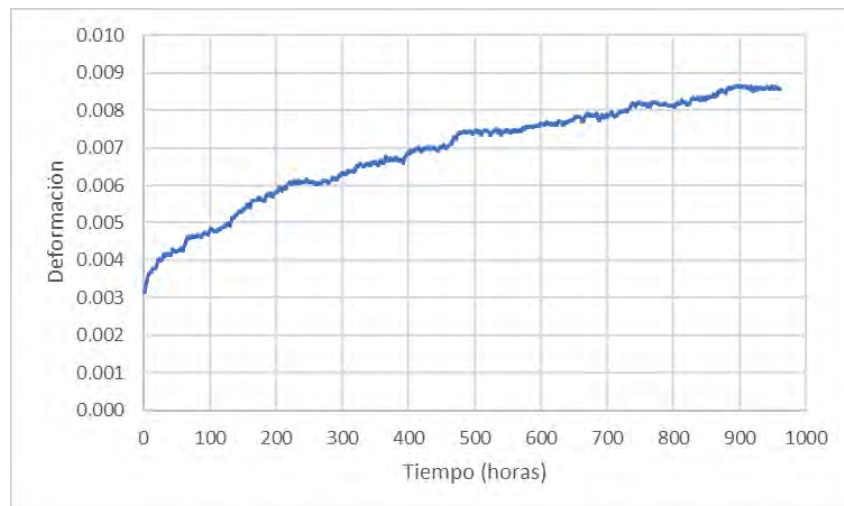


Ilustración 55: Probeta 8. Variación de la deformación frente al tiempo

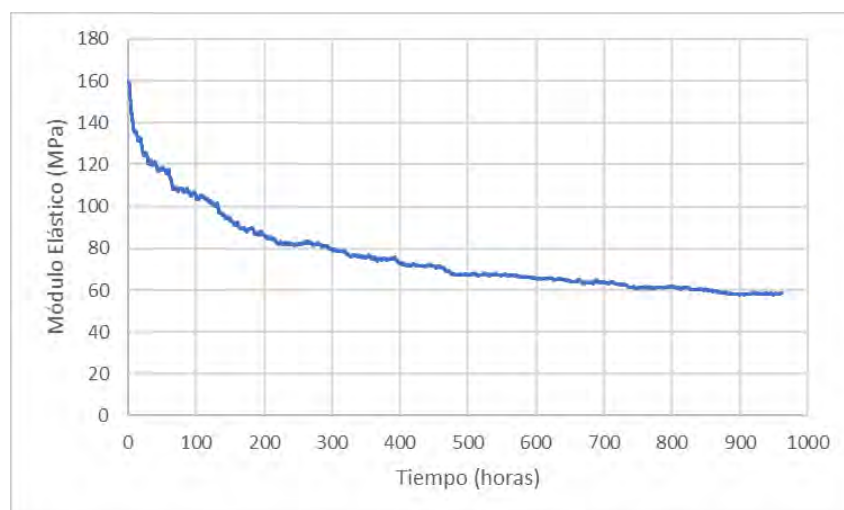


Ilustración 56: Probeta 8. Variación del módulo elástico frente al tiempo

Gráficas del ensayo de la probeta 9, carga aplicada de 137.34 N (14 kg):

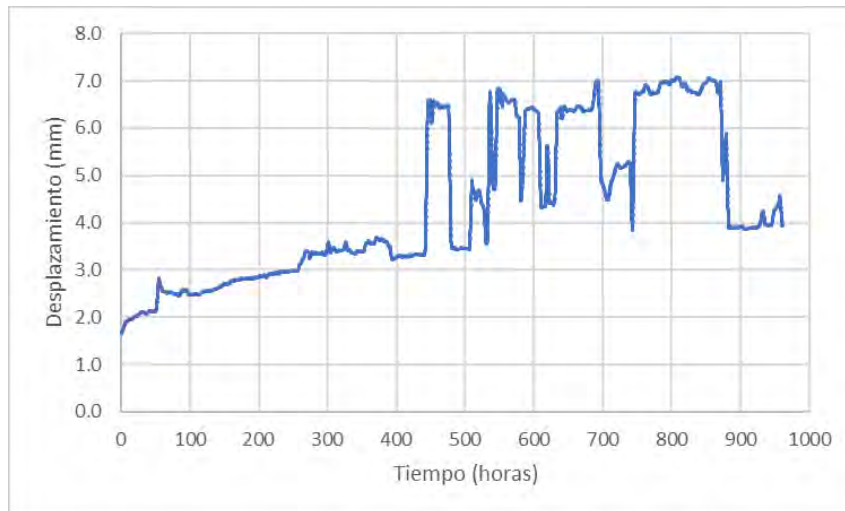


Ilustración 57: Probeta 9. Variación del desplazamiento frente a tiempo

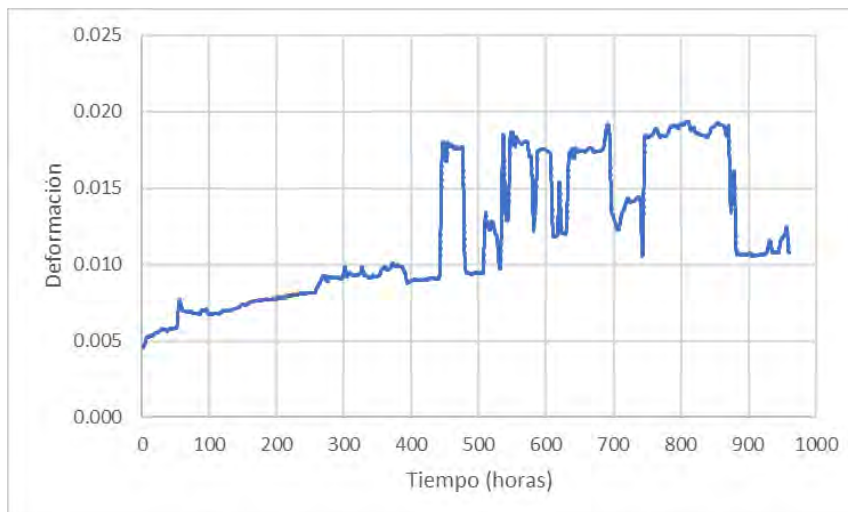


Ilustración 58: Probeta 9. Variación de la deformación frente a tiempo

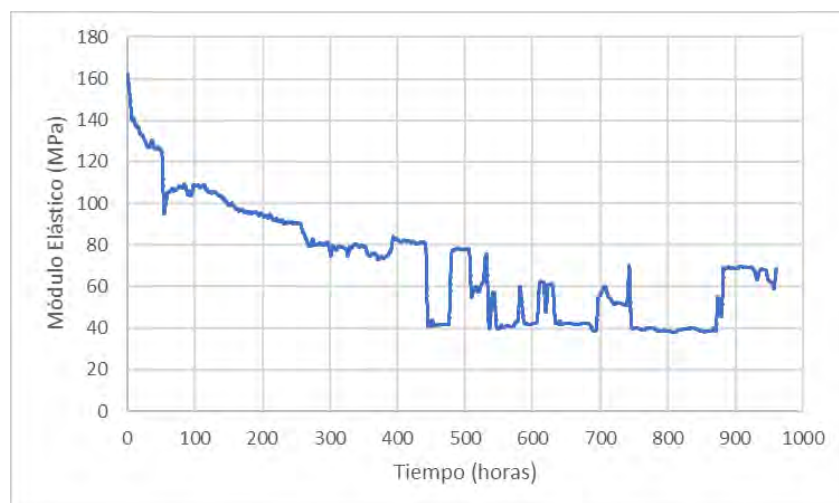


Ilustración 59: Probeta 9. Variación del módulo elástico frente a tiempo

Los resultados de las probetas 10 y 11, únicamente son válidos los obtenidos en las 200 y 50 primeras horas respectivamente. Esto se debe principalmente a que el panel sándwich delgado ha mostrado un valor de fluencia mucho más alto del previsto. En los ensayos de fluencia, se ha medido un desplazamiento de 38 mm para la probeta 10 y de 50 mm para la probeta 11 mientras que en el ensayo de flexión a 3 puntos de la probeta 3 para las cargas de 4 y 6 kg se obtuvo un desplazamiento de 2.5 y 4.48 mm. Esto supone que el perfil de aluminio no tiene suficiente recorrido para seguir descendiendo por lo que termina apoyándose en el tablero guía, reduciendo la carga que se le aplica a la probeta.

La principal hipótesis de la gran cantidad de fluencia mostrada por la estructura sándwich delgada, es una incorrecta elección de la carga aplicada, pues en el ensayo de flexión la probeta 3, la probeta tenía una anchura de 100 mm mientras que en este otro ensayo tiene un ancho de justo la mitad, 50 mm, mientras esto no sucede en las probetas de panel sándwich grueso. Hay que añadir que la probeta que soporta principalmente la carga es la probeta de mayor espesor pues es la que está en la superficie superior del pallet.

En cuanto a los datos de las probetas de estructura sándwich gruesa, el desplazamiento medido ha presentado un elevado ruido, por lo que se ha aplicado una media móvil con el objetivo de filtrar y que los resultados sean más claros. Además, los datos de dos de los ensayos pierden toda validez a partir de unas horas de ensayo pues son valores totalmente ilógicos. Es posible que se produjera un fallo en la conexión eléctrica de los potenciómetros a partir de esas horas.

La probeta 6 presenta una variación del desplazamiento, y la deformación casi constante hasta las 500 horas. A partir de este punto la pendiente de la curva es menor y convergiendo a un valor constante. También se observa como el módulo elástico disminuye de forma brusca durante las primeras horas para después converger a 50 MPa.

Los resultados de la probeta 7 son totalmente inservibles. A partir de la hora 200 el desplazamiento comienza a oscilar, llegando a presentar desplazamientos negativos, algo totalmente imposible, pues significaría que la probeta se deformara hacia arriba. Un fallo en la conexión eléctrica es la causa más probable, dando lecturas de conexión y desconexión.

En cuanto al ensayo de la probeta 8, se observa como el aumento del desplazamiento y consecuentemente de la deformación es casi constante durante toda la duración del ensayo, mientras que el módulo elástico cae más fuerte al inicio y termina convergiendo a 60 MPa.

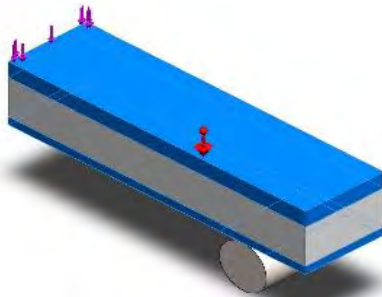
La probeta 9 presenta errores similares a los de la probeta 7 aunque menos significativos. A partir de la hora 400 la lectura del desplazamiento sube repentinamente y se mantiene durante un largo periodo de tiempo para después bajar. Esto no tiene ningún sentido pues al ser la carga constante, la probeta no está subiendo y bajando. Sin embargo, hay puntos que parecen seguir una cierta tendencia, presentando un valor del módulo elástico al final del ensayo muy similar a de las probetas 6 y 8.

En resumen, el panel sándwich presenta cierta fluencia pues la variación del módulo elástico desciende desde 160 MPa a cerca de 60 MPa durante la duración de todo el experimento, logrando el objetivo planteado en este ensayo.

5 SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Una vez conocidas las propiedades mecánicas de los materiales que constituyen el panel sándwich, es posible simular su comportamiento estructural por el método de elementos finitos; en este trabajo se utiliza el software de SolidWorks. Para ello se crea una pieza. Esta pieza está formada por un total de 4 sólidos, siendo 3 de ellos la probeta (piel superior, núcleo y piel inferior) y el cuarto el apoyo. De esta forma la simulación será más semejante a la realidad aplicando una restricción de contacto. La pieza se diseña con doble condición de simetría, por lo que se tiene un cuarto de la probeta de la estructura sándwich, reduciendo el tamaño de los cálculos a resolver.

5.1 Materiales



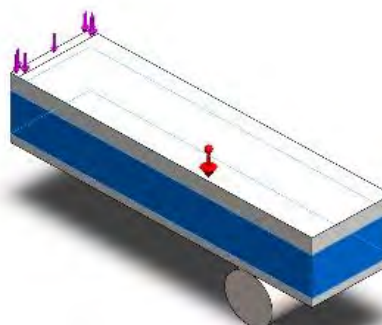
Polietileno:

Densidad: 936 kg/m³

Módulo elástico: 7.11e+8 N/m²

Límite elástico: 2.44e+9 N/m²

Coefficiente de Poisson: 0.4



Espuma de Poliuretano:

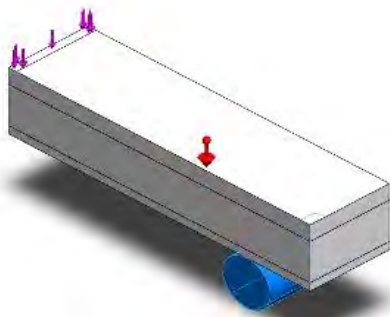
Densidad: 40 kg/m³

Módulo elástico: 2.2e+7 N/m²

Límite elástico: 2.35e+7 N/m²

Coefficiente de Poisson: 0.4





Acero aleado

Densidad: 7700 kg/m³

Módulo elástico: 2.1e+11 N/m²

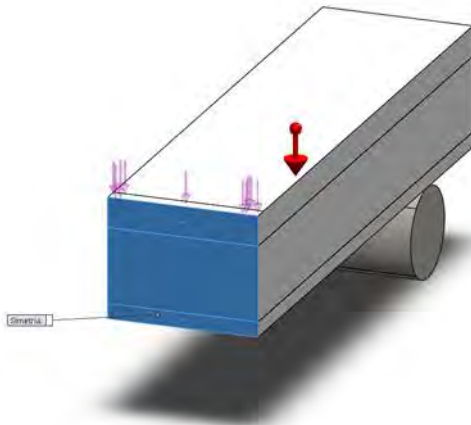
Límite elástico: 6.204e+8 N/m²

Coefficiente de Poisson: 0.28



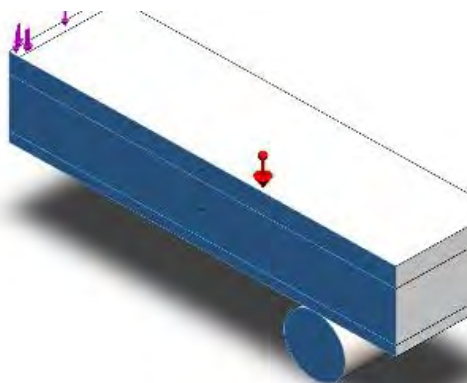
Ilustración 60: Materiales aplicados a los sólidos

5.2 Sujeciones



Simetría 1

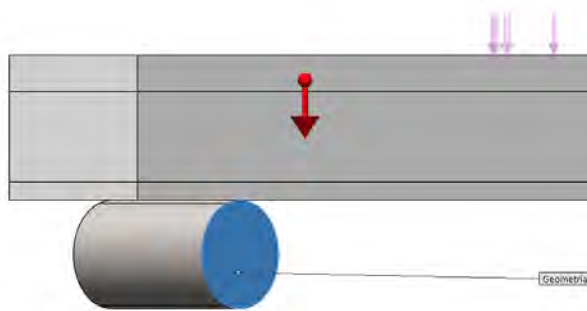
Se aplica sujeción de simetría en la superficie transversal de la pieza. Esta superficie contiene el eje transversal de simetría de la probeta.



Simetría 2

Se aplica otra sujeción de simetría, pero en esta ocasión en la superficie longitudinal. Esta superficie contiene el eje longitudinal de simetría de la probeta.



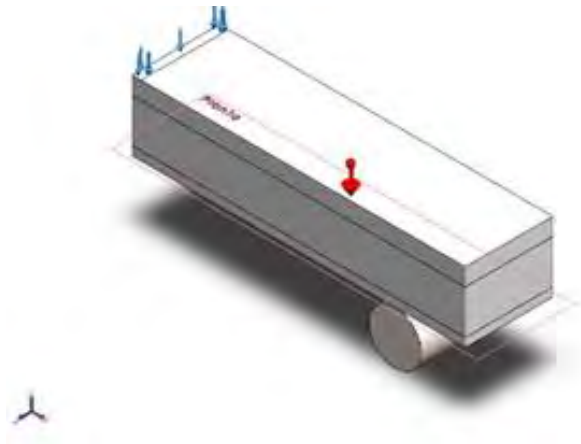


Fijo

Por último, se aplica la sujeción de elemento fijo al apoyo.

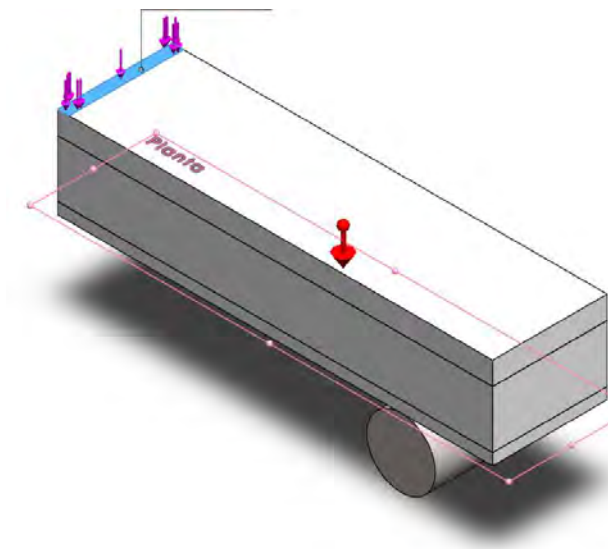
Ilustración 61: Sujeciones aplicadas a la pieza

5.3 Cargas



Gravedad

Se aplica la fuerza que ejerce la gravedad sobre la probeta.



Aplicación de la carga

Para simular de forma correcta la aplicación de la carga, se crea una partición en la piel superior de forma que se consigue una pequeña superficie (área azul) que es donde se aplica la carga.

Ilustración 62: Cargas aplicadas a la pieza

Además, se le añade una conexión de contacto entre sólidos formado por la piel inferior y el apoyo. Este contacto es del tipo sin penetración. De esta forma se logra la mejor simulación del ensayo. Se crean dos particiones, una a la piel inferior y otra al apoyo. Ambas superficies son las que se estarán en contacto en todo momento.

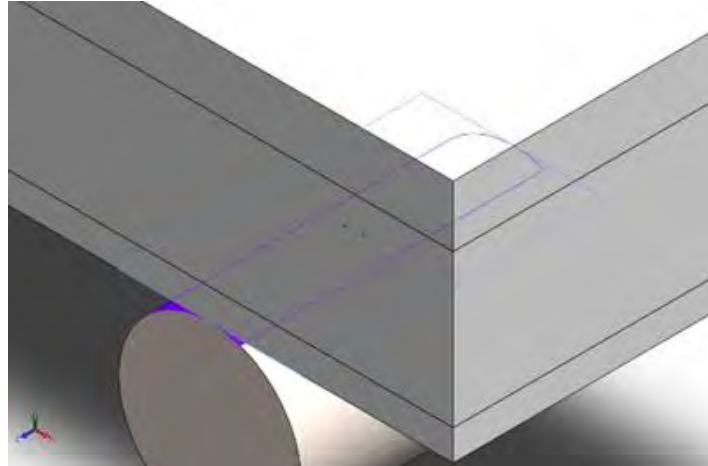
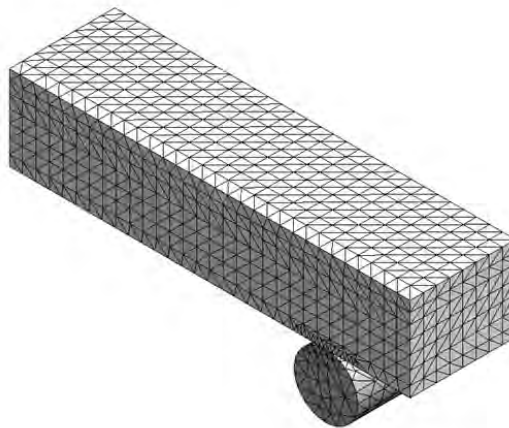


Ilustración 63: Conexión de conjunto de contactos

5.4 Mallado

Se crea una malla en la cual los elementos tienen un tamaño de 5 mm.

Nombre del modelo: Probeta_sandwich
Nombre de estudio: Análisis estático 3D-1 (Predeterminado)
Tipo de malla: Malla sólida



Edición de estudiante. Solo para uso en la enseñanza

Ilustración 64: Malla general de toda la pieza

Se utilizan las superficies creadas en las particiones de la conexión de conjunto de contactos para crear una malla más fina en ambas superficies de contacto pues es un punto crítico de la simulación.

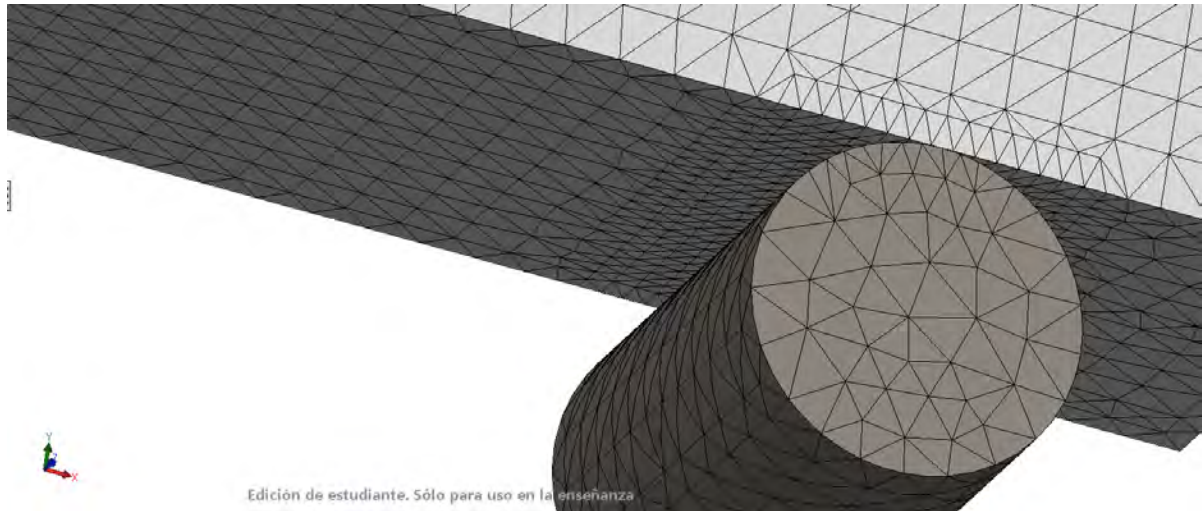


Ilustración 65: Mallado con elementos de menor tamaño en las superficies de contacto

5.5 Resultados de la simulación

En la ilustración 55 se muestra los resultados de los desplazamientos de la simulación para una carga de 81.464 N. Como se puede ver, el desplazamiento máximo obtenido en la simulación es de 1.358 mm mientras que en el ensayo de flexión, se obtuvo 1.36 mm, valores muy muy cercanos.

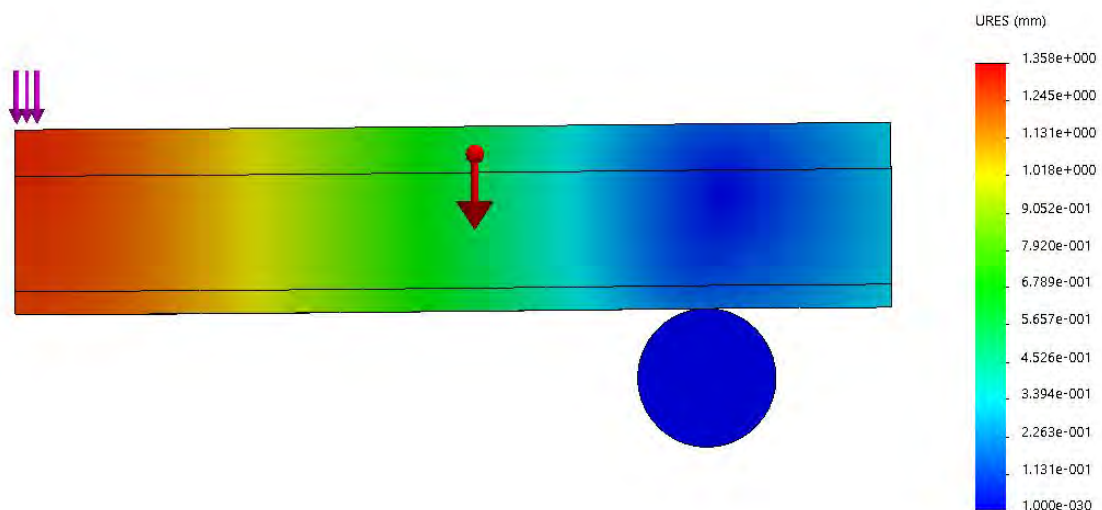


Ilustración 66: Resultados del desplazamiento de la simulación bajo una carga de 81.464 N

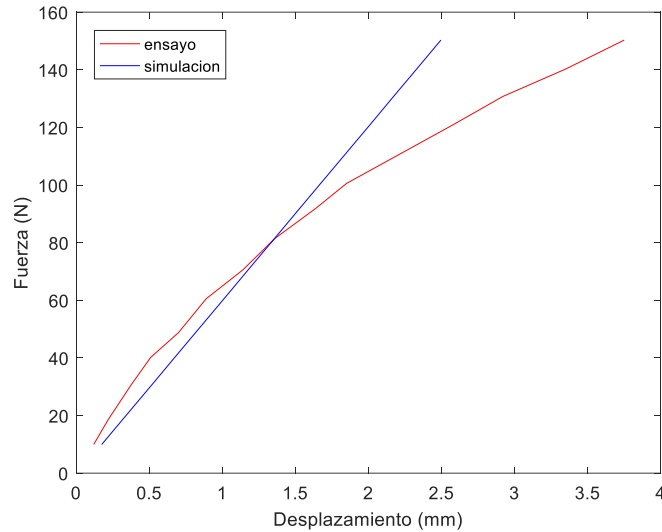


Ilustración 67: Probeta 2. Comparación del ensayo real con la simulación

En la ilustración 67 se compara el comportamiento estructural del panel sándwich grueso con los resultados reproducidos por el modelo de elementos finitos. Se observa como en el intervalo de 0 a 80 N el desplazamiento obtenido en la simulación es mayor hasta alcanzar una carga de 81.464 N, donde se cruzan y por tanto es el punto de mayor exactitud reproducido por la simulación. A partir de 81.464 N, es cuando se muestran las mayores diferencias entre el comportamiento medido en el ensayo y el reproducido por el modelo de elementos finitos debido a que se van alejando de la zona elástica del material.

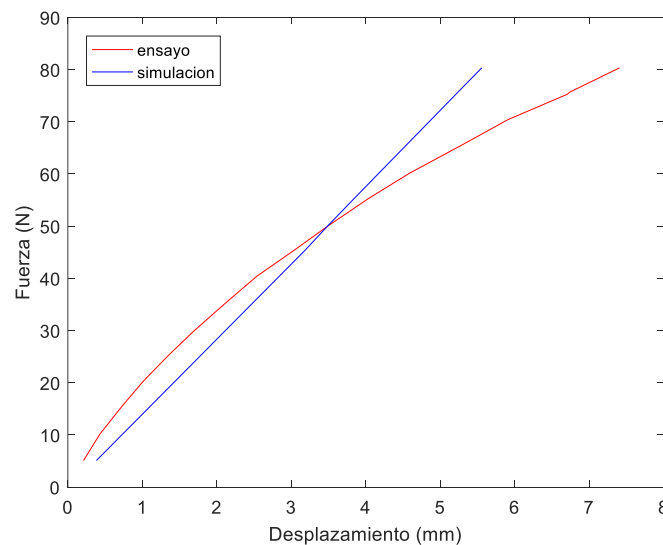


Ilustración 68: Probeta 3. Comparación del ensayo real con la simulación

De la misma manera que con la probeta 2, se simula el ensayo de la probeta 3 en el intervalo de 0 a 80 N. En la ilustración 68 se muestra una comparación de ambos comportamientos. Al igual que en el caso anterior, el modelo de elementos finitos reproduce un desplazamiento mayor en el inicio del intervalo elástico, pero dando resultados de gran exactitud. En el punto de 50 N, se cruzan las dos líneas y es el valor de mayor exactitud reproducido por la simulación. A partir de aquí, aumentan las diferencias entre los resultados del ensayo y los simulados por MEF, pues se alejan del comportamiento elástico del material.

6 CONCLUSIONES

Como el modelo de elementos finitos es capaz de reproducir con exactitud el comportamiento estructural del panel sándwich en los ensayos de flexión, se concluye que la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales que constituyen la estructura ha sido realizada de forma correcta, y se han obtenido resultados exitosos. Aun así, sería posible lograr una mejor caracterización si se ensayan un mayor número de probetas, pero en este trabajo únicamente se ha realizado un ensayo a la piel y dos al núcleo. Se conseguirían unas propiedades mecánicas más exactas, mejorando el comportamiento reproducido por el modelo simulado.

En cuanto al ensayo de fluencia, los resultados de las probetas 7 y 9 no son aprovechables pues indican un comportamiento totalmente errático e ilógico. Es posible que para este ensayo debería haber realizado un acondicionamiento de la señal del potenciómetro. Amplificándola y filtrándola los datos obtenidos no mostrarían un ruido tan elevado. Este error en la medida de los potenciómetros no fue detectado en su calibración, y se pensó que grabando directamente la medición sería suficiente. De todas formas, se aplicó una media móvil para reducir el ruido. Y analizar los resultados del resto de probetas.

A pesar del ruido de la señal los resultados mostrados por las probetas 6, 8 y 9 tienen una apariencia bastante similar: Las 3 muestran un descenso en el módulo elástico aparente de 160 a 60 MPa a lo largo de la duración del ensayo y con similar curvatura. Se puede asegurar que este tipo de productos, con estos materiales, presenta un elevado nivel de fluencia, que deberá tenerse en cuenta cuando se realicen trabajos de diseño estructural.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de la profesora Ana Isabel García Díez para la realización de los ensayos de flexión en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela Politécnica Superior de Ferrol.

Anexo 1. Bibliografía

TESIS

Malavia Otero, JM (2012). *Caracterización de paneles sándwich híbridos FRP con alma de nido de abeja de aluminio*. Tesis. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia

Normas

ASTM International (2016). *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*. ASTM C393 / C393M-16.

ASTM International (2003). *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. ASTM D790-03.

AENOR (2011). *Plásticos. Determinación de las propiedades de flexión. (ISO 178:2010)*. UNE-EN ISO 18:2011.

AENOR (2011). *Materiales celulares rígidos. Determinación de las propiedades de flexión. Parte 1: Ensayo de flexión simple*. UNE-ISO 1209-1:2011.

AENOR (2011). *Materiales celulares rígidos. Determinación de las propiedades de flexión. Parte 2: Determinación de la resistencia a la flexión y el módulo aparente de elasticidad en flexión*. UNE-ISO 1209-2:2011.

AENOR (2015). *Plásticos. Determinación del comportamiento en fluencia. Parte 1: Fluencia en tracción*. UNE-EN ISO 899-1:2003/A1:2015.

AENOR (2015). *Plásticos. Determinación del comportamiento en fluencia. Parte 2: Fluencia en flexión por el método de carga en tres puntos*. UNE-EN ISO 899-2:2003/A1:2015

Páginas Web

<http://www.rotogal.com/contenedor-bin-palet.html>

<http://www.matweb.com/index.aspx>

<https://www.arduino.cc/>

<https://www.phidgets.com/>

<https://www.adafruit.com/>

Anexo 2. Presupuesto

Tipo: Materiales varios

Proveedores: Aki, BricoDepot, Tornillería Ferrolana

UD	Descripción	L (m)	Precio (€ / UD)	Coste
1	Tablero md 1200 x 600 x 19 mm		6.82	6.82 €
2	Perfil cuadrado de madera	1	4.12	8.25 €
2	Tubo acero Diám. 33 mm	1	2.85	5.70 €
4	Grapa metálica Diám. 32 mm			2.80 €
4	Pata de aluminio de 150 mm			5.99 €
1	Tubo PVC Diám. 16 mm	2.4	0.98	0.98 €
2	Perfil aluminio U 20 x 20 x 20 x 1.5 mm	2	4.59	9.17 €
1	Perfil aluminio U 10 x 13 x 10 x 1.5 mm	2	4.34	4.34 €
1	Tubo aluminio Diám. 20 mm	1	3.26	3.26 €
1	Perfil aluminio L 20 x 20 x 1.5 mm	1	2.44	2.44 €
12	Gancho en S 4 x 6.5 mm		0.45	5.45 €
1	Cuerda trenzada poliéster blanca	10	1.65	1.65 €
2	Varilla roscada M12	1	1.73	3.45 €
	Tornillería varia			16.53 €
			TOTAL	76.85 €

Tipo: Electrónica y electricidad

Proveedores: Phidget, Adafruit, RS Components

UD	Descripción	Precio (€ / UD)	Coste	
6	Potenciómetro deslizante	3.72	22.31 €	
1	Adafruit Assembled Data Logging shield for Arduino	9.75	9.75 €	
1	Arduino Leonardo	14.88	14.88 €	
1	Phidget Bridge 4-Input	61.98	61.98 €	
2	Micro Load Cell (0-20kg) - CZL635	4.96	9.92 €	
1	Screw shield	8.26	8.26 €	
3	Bobina cable flexible 0.5mm (25m)	3.84	11.53 €	
			TOTAL	138.64 €

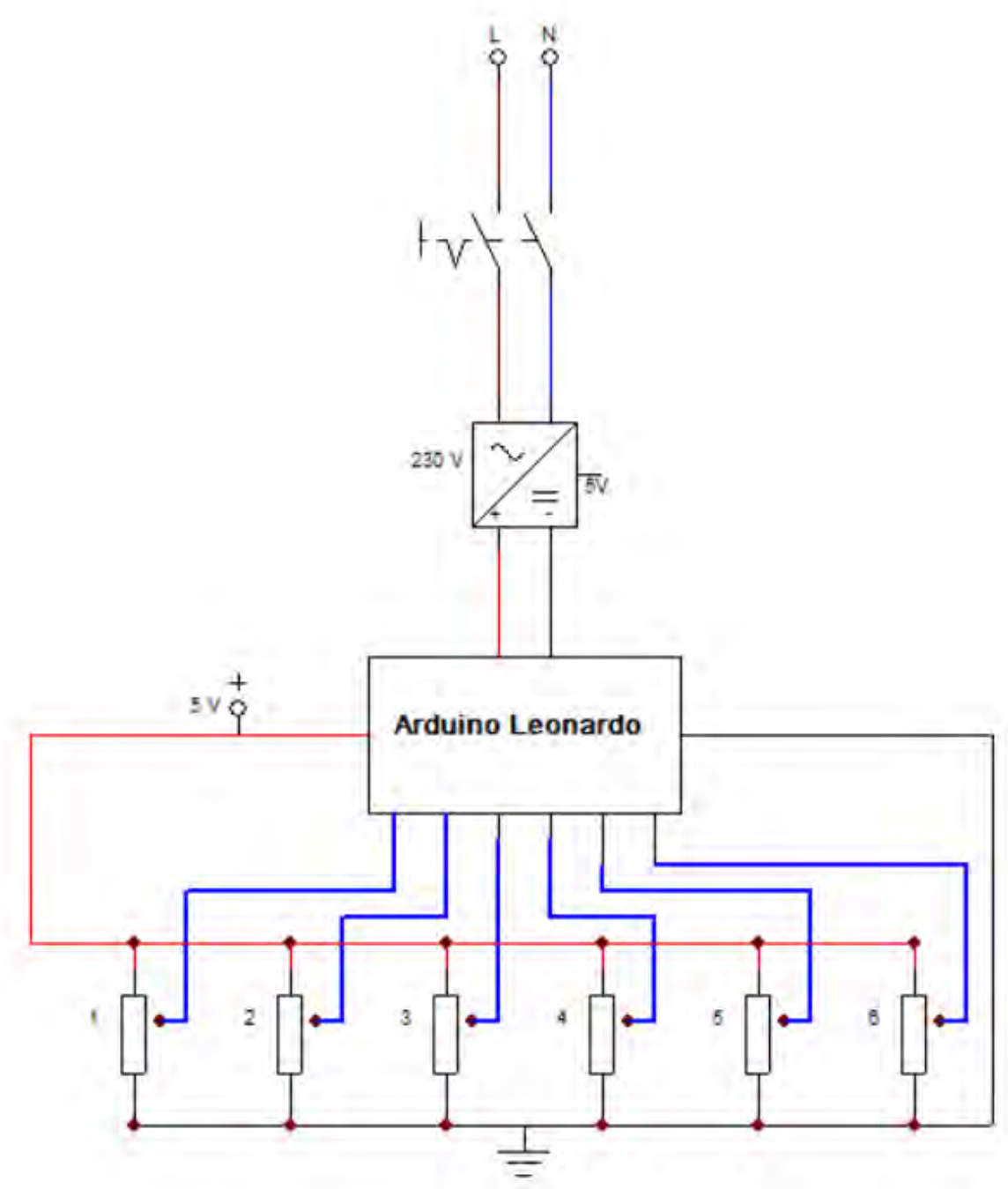
Tipo: Material para aplicar la carga. Disco de fundición

Proveedor: Decathlon

UD	Descripción	Precio (€ / UD)	Coste
4	Disco de 1 kg	1.28	5.12 €
10	Disco de 2 kg	2.44	24.38 €
4	Disco de 5 kg	5.33	21.32 €
		TOTAL	50.83 €

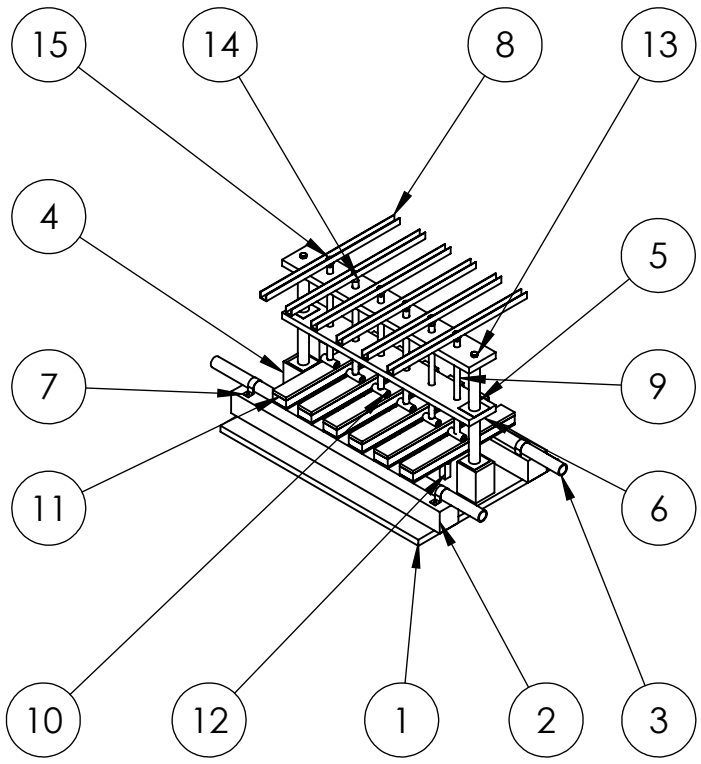
Item	Subtotal
Materiales varios	76.85 €
Electrónica y electricidad	138.64 €
Elementos de carga	50.83 €
PRESUPUESTO MATERIAL	266.31 €
Gastos Generales (10%)	26.63 €
Mano de Obra (20 €/h)	1,300.00 €
PRESUPUESTO BRUTO	1,592.95 €
IVA (21%)	334.52 €
PRESUPUESTO	1,927.46 €

Anexo 3. Esquema eléctrico

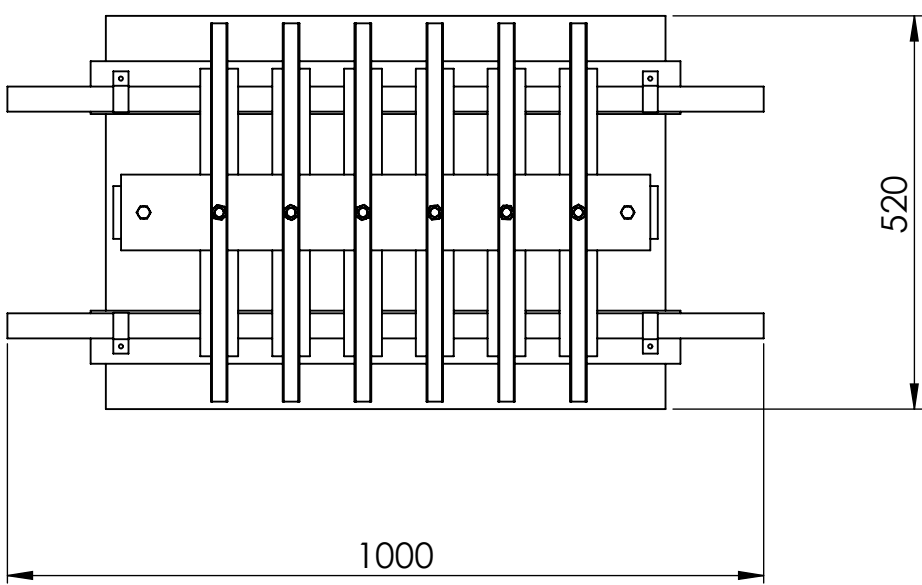
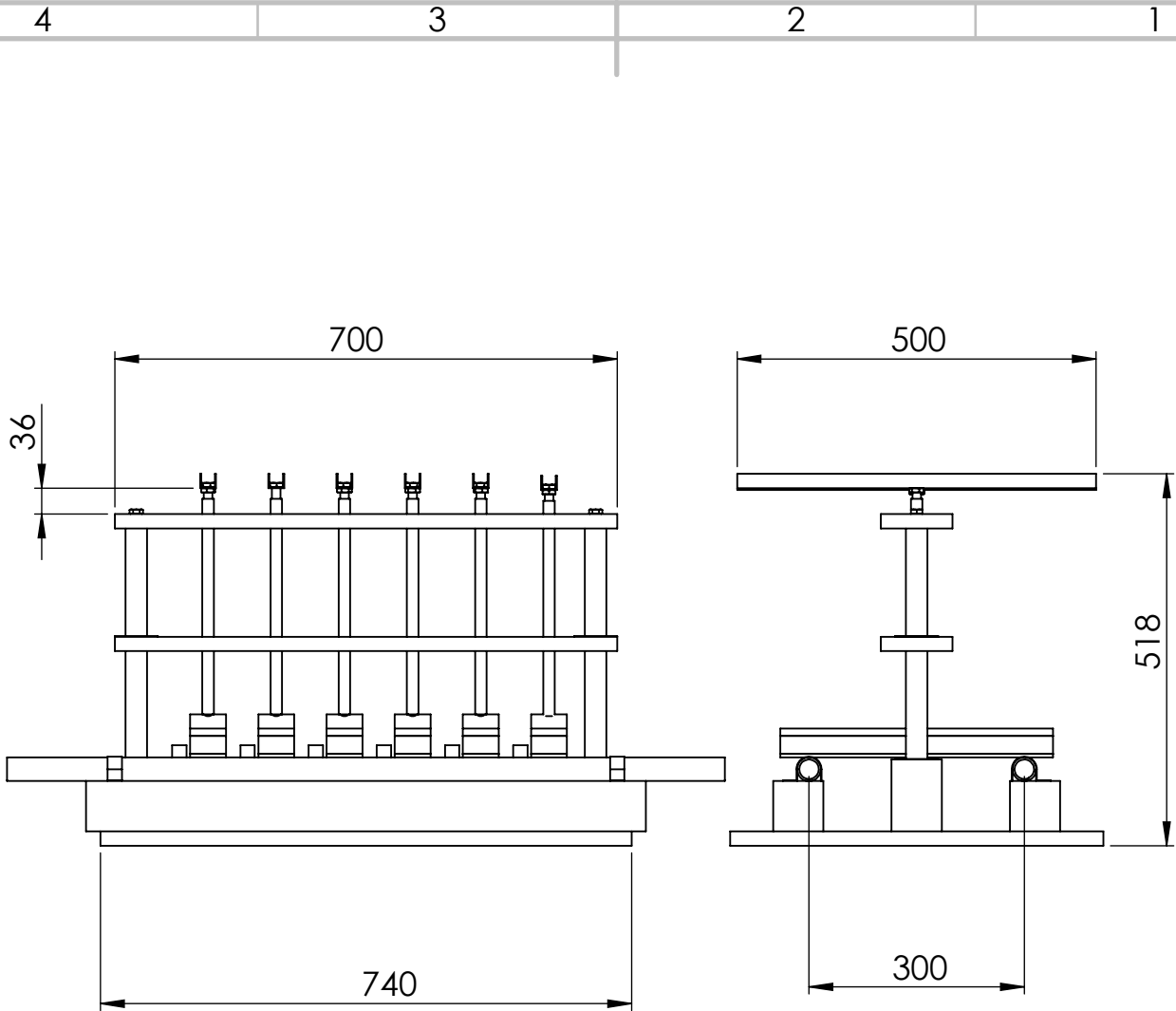


Anexo 4. Planos

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Tablero	1
2	Soporte Apoyo	2
3	Apoyo	2
4	Soporte Pata	2
5	Pata	4
6	Guías	2
7	Grapa metálica	4
8	Perfil U	6
9	Tubo PVC	6
10	Cilindro Punzón	6
11	Probeta	6
12	Potenciometro	6
13	ISO 4017 - M10 x 25-N	2
14	Varilla Roscada	6
15	Hexagon Thin Nut ISO - 4035 - M12 - N	11

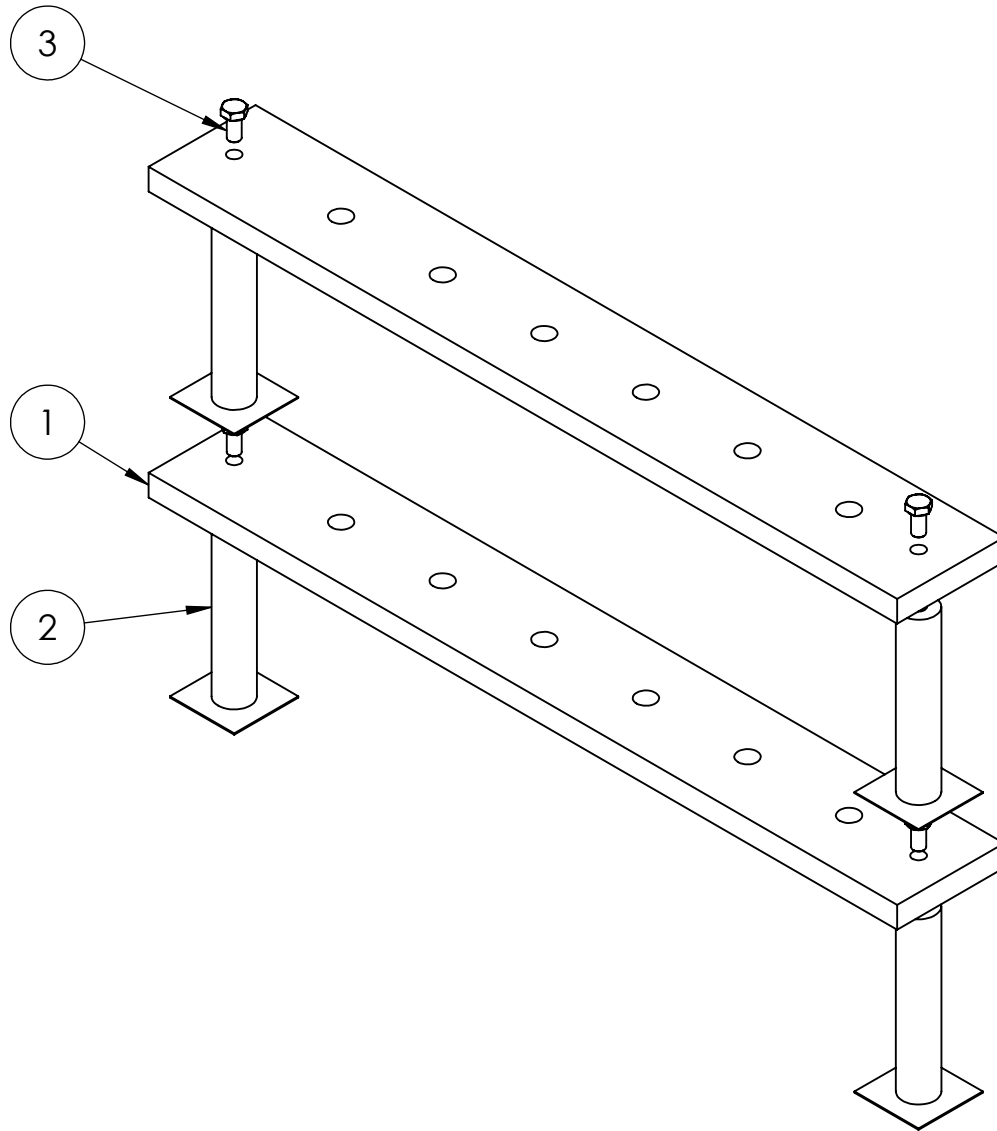


NOMBRE		FECHA	REVISION	TÍTULO:
DIBUJ.	DIEGO GARCIA	12/12/2017		MÁQUINA DE ENSAYO DE FLUENCIA
VERIF.				
APROB.			A4	ESCALA:1:20
				PLANO 1 DE 15



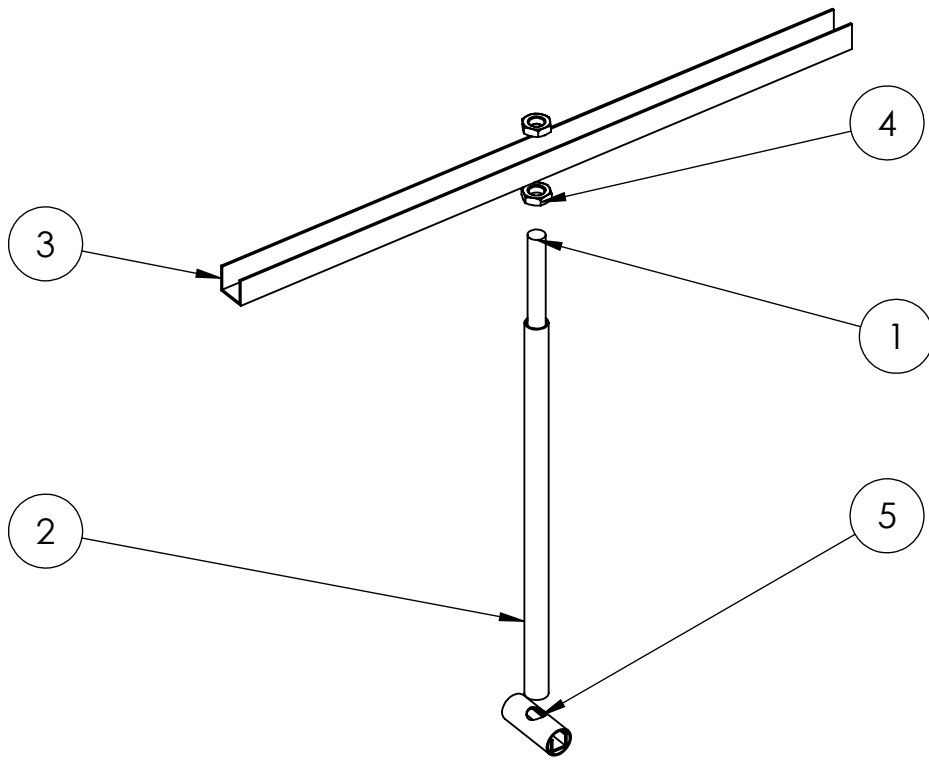
NOMBRE		FECHA	REVISION	TÍTULO:
DIBUJ.	DIEGO GARCIA	12/12/2017		MAQUINA FLUENCIA
VERIF.				
APROB.			A4	
			ESCALA:1:10	PLANO 2 DE 15

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Guías	2
2	Pata	4
3	ISO 4017 - M10 x 20-N	4



NOMBRE		FECHA	REVISION	TÍTULO:
DIBUJ.	DIEGO GARCIA	12/12/2017		ENSAMBLAJE GUIAS
VERIF.				
APROB.			A4	
ESCALA:1:5			PLANO 3 DE 15	

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Varilla Roscada	1
2	Tubo PVC	1
3	Perfil U	1
4	Hexagon Thin Nut ISO - 4035 - M12 - N	2
5	Cilindro Punzón	1



NOMBRE		FECHA		REVISION	TÍTULO: ENSAMBLAJE UTIL DE CARGA
DIBUJ.	DIEGO GARCIA	12/12/2017			
VERIF.					
APROB.				A4	ESCALA:1:5

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

C

B

B

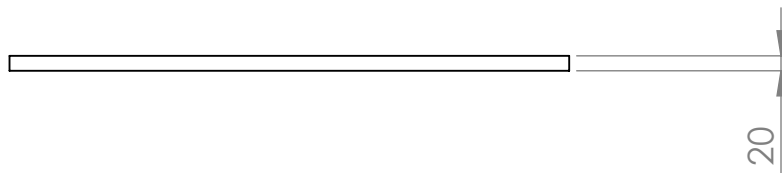
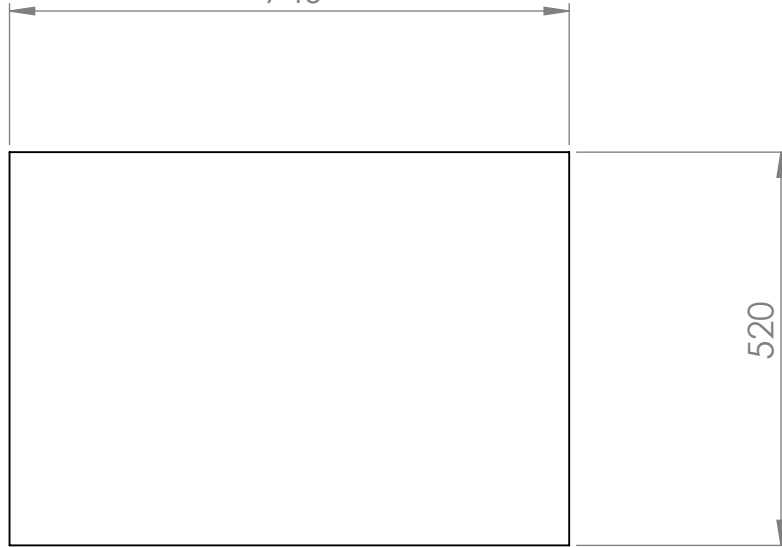
A

A

740

520

20



			FECHA	REVISION	TÍTULO:	TABLERO
DIBUJ.	DIEGO GARCIA		12/12/2017			
VERIF.						
APROB.				A4	ESCALA:1:10	PLANO 5 DE 15

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

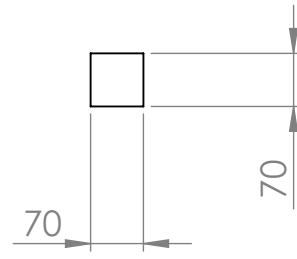
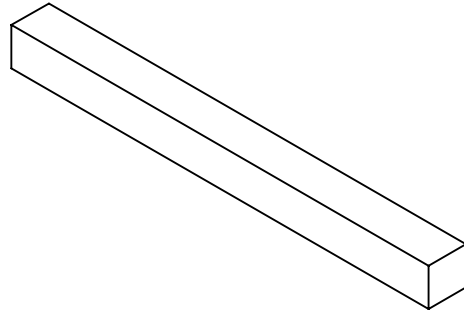
C

B

B

A

A



	NOMBRE	FECHA	REVISION	TÍTULO:
DIBUJ.	DIEGO GARCIA	12/12/2017		SOPORTE APOYO
VERIF.				
APROB.			A4	
			ESCALA:1:10	PLANO 6 DE 15

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

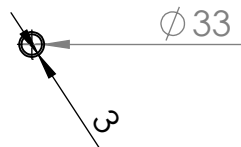
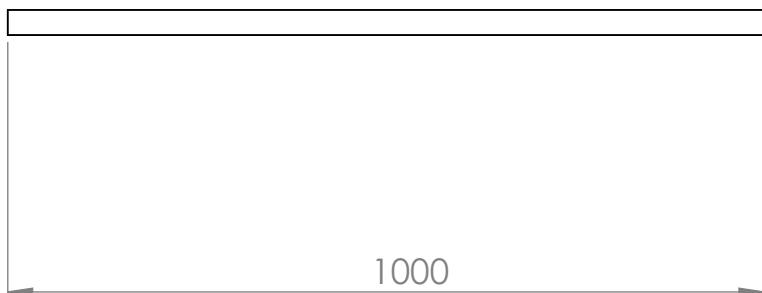
C

B

B

A

A



		FECHA	REVISION	TÍTULO:		
DIBUJ.	DIEGO GARCIA	12/12/2017		APOYO		
VERIF.						
APROB.			A4		ESCALA:1:10	PLANO 7 DE 15

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

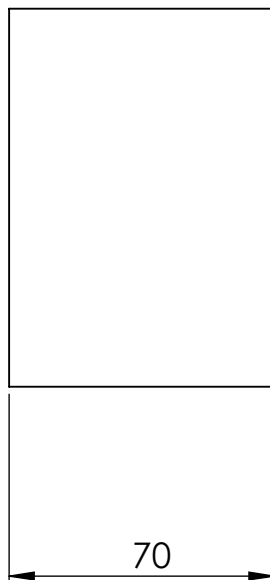
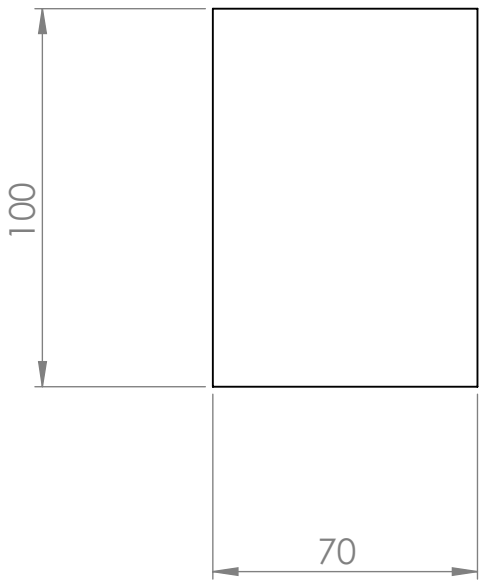
C

B

B

A

A



	NOMBRE		FECHA	REVISION	TÍTULO:
DIBUJ.	DIEGO GARCIA		12/12/2017		SOPORTE PATA
VERIF.					
APROB.				A4	
			ESCALA:1:2		PLANO 8 DE 15

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

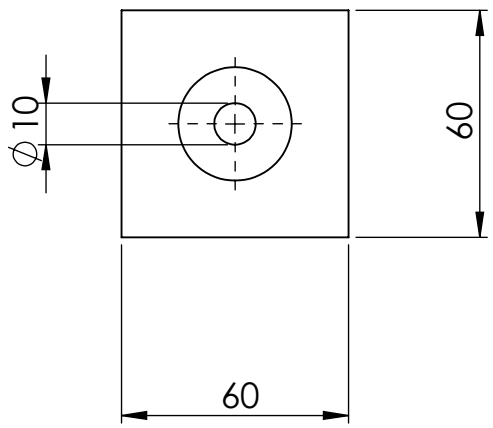
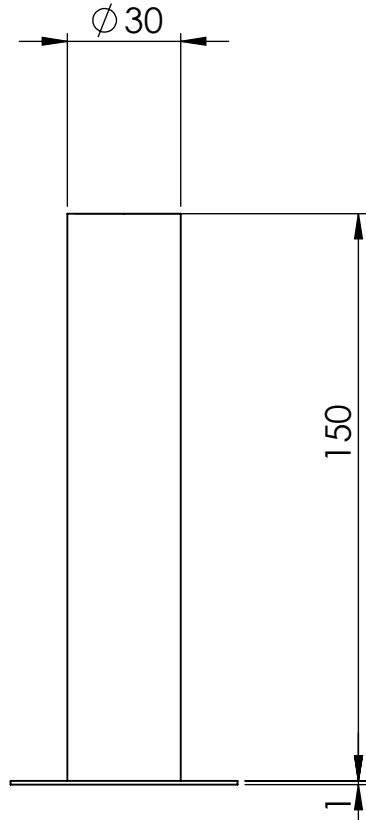
C

B

B

A

A



	NOMBRE	FECHA	REVISION	TÍTULO:
DIBUJ.	DIEGO GARCIA	12/12/2017		PATA DE ACERO
VERIF.				
APROB.			A4	
			ESCALA:1:2	PLANO 9 DE 15

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

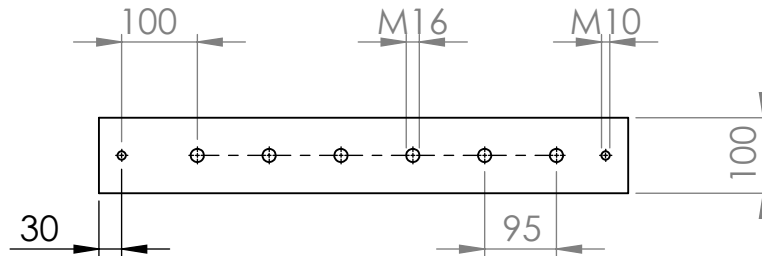
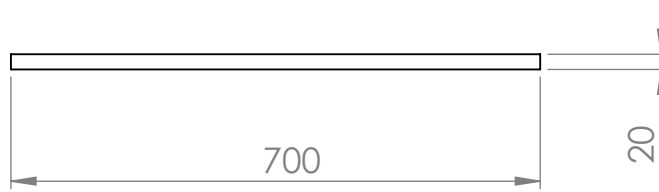
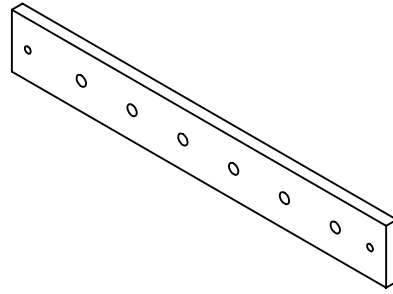
C

B

B

A

A



	NOMBRE	FECHA	REVISION	TÍTULO:
DIBUJ.	DIEGO GARCIA	12/12/2017		TABLERO GUIA
VERIF.				
APROB.			A4	
			ESCALA:1:10	PLANO 10 DE 15

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

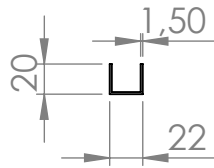
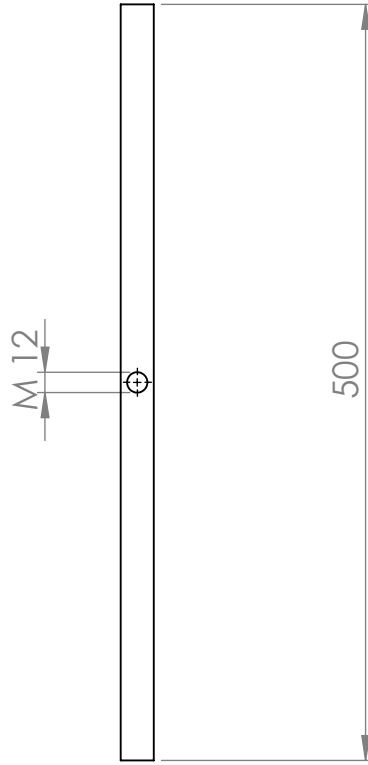
C

B

B

A

A



	NOMBRE	FECHA	REVISION	TÍTULO:
DIBUJ.	DIEGO GARCIA	12/12/2017		PERFIL CARGA
VERIF.				
APROB.			A4	
			ESCALA:1:5	PLANO 11 DE 15

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

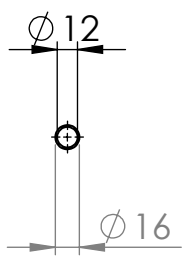
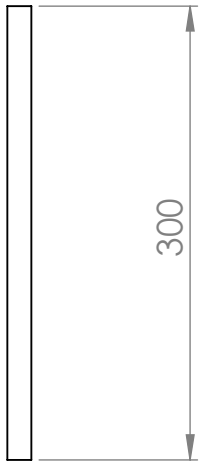
C

B

B

A

A



	NOMBRE	FECHA	REVISION	TÍTULO:	TUBO PVC
DIBUJ.	DIEGO GARCIA	12/12/2017			
VERIF.					
APROB.			A4	ESCALA:1:5	
					PLANO 12 DE 15

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

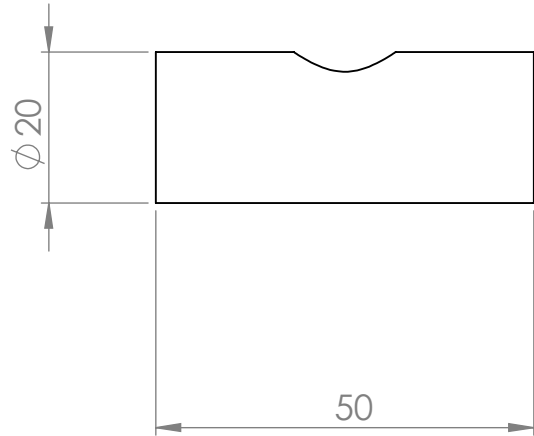
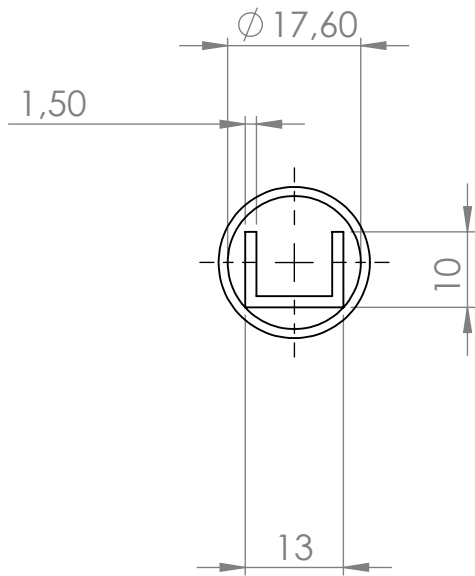
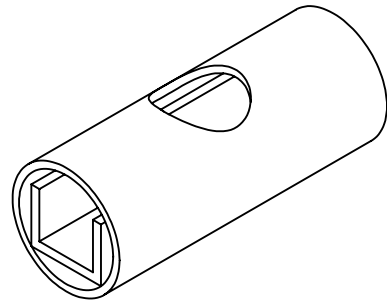
C

B

B

A

A



	NOMBRE	FECHA	REVISION
DIBUJ.	DIEGO GARCIA	12/12/2017	
VERIF.			
APROB.			A4

TÍTULO: **CILINDRO PUNZÓN**

ESCALA: 1:1

PLANO 13 DE 15

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

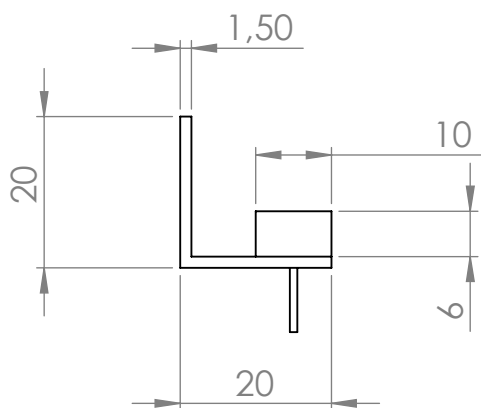
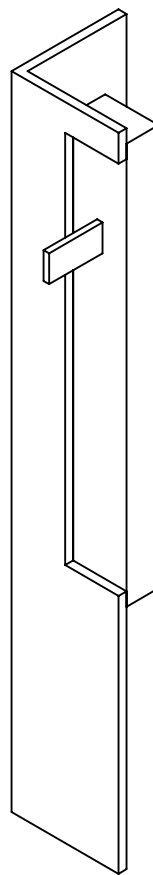
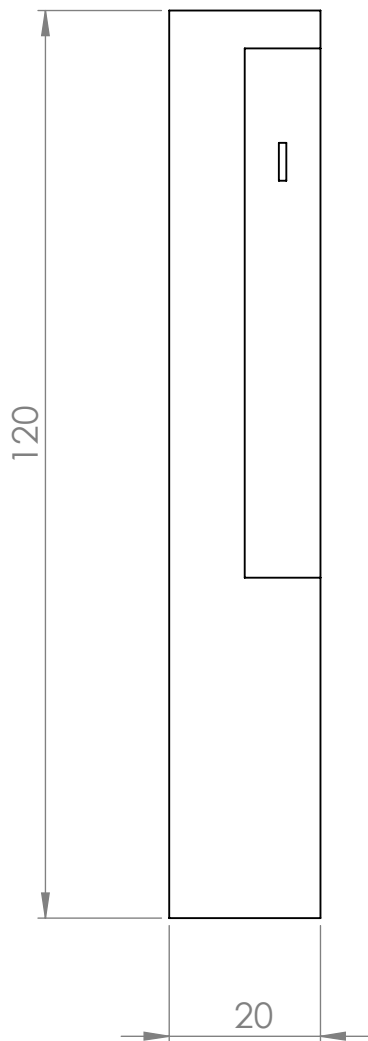
C

B

B

A

A



	NOMBRE	FECHA	REVISION
DIBUJ.	DIEGO GARCIA	12/12/2017	
VERIF.			
APROB.			A4

TÍTULO: ENSAMBLAJE POTENCIÓMETRO

ESCALA:1:1

PLANO 14 DE 15

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

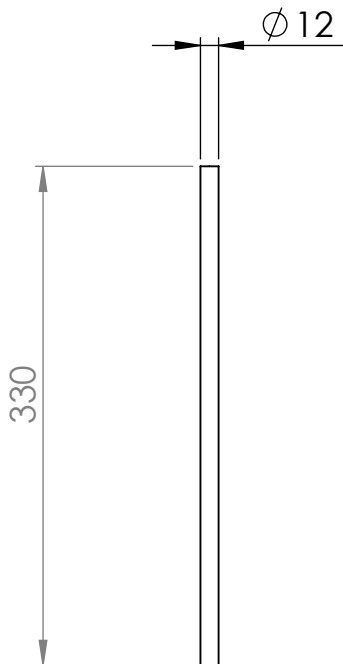
C

B

B

A

A



	NOMBRE	FECHA	REVISION	TÍTULO:
DIBUJ.	DIEGO GARCIA	12/12/2017		VARILLA ROSCADA
VERIF.				
APROB.			A4	
			ESCALA:1:5	PLANO 15 DE 15

4

3

2

1

Anexo 5. Hojas de características

3134_0 - Micro Load Cell (0-20kg) - CZL635

Product Description

A load cell is a force sensing module - a carefully designed metal structure, with small elements called strain gauges mounted in precise locations on the structure. Load cells are designed to measure a specific force, and ignore other forces being applied. The electrical signal output by the load cell is very small and requires specialized amplification. Fortunately, the 1046 PhidgetBridge will perform all the amplification and measurement of the electrical output.

Load cells are designed to measure force in one direction. They will often measure force in other directions, but the sensor sensitivity will be different, since parts of the load cell operating under compression are now in tension, and vice versa.

This Single Point Load Cell is used in small jewelry scales and kitchen scales. It's mounted by bolting down the end of the load cell where the wires are attached, and applying force on the other end in the direction of the arrow. Where the force is applied is not critical, as this load cell measures a shearing effect on the beam, not the bending of the beam. If you mount a small platform on the load cell, as would be done in a small scale, this load cell provides accurate readings regardless of the position of the load on the platform.

Product Specifications
Sensor Properties

Sensor Type	Shear Load Cell
Weight Capacity Max	20 kg
Maximum Overload	24 kg
Creep	20 g/hr
Zero Balance	± 300 g
Cell Repeatability Error Max	± 10 g
Cell Non-Linearity Max	10 g
Cell Hysteresis Max	10 g
Temperature Effect on Span	1 g/°C
Temperature Effect on Zero	2 g/°C

Electrical Properties

Rated Output	1 mV/V
Rated Output Error Max	± 150 µV/V
Output Impedance	1 kΩ
Supply Voltage Max	5 V DC

Physical Properties

Compensated Temperature Min	-10 °C
Compensated Temperature Max	40 °C
Operating Temperature Min	-20 °C
Operating Temperature Max	55 °C
Cable Length	550 mm
Cable Gauge	30 AWG
Material	Aluminium Alloy (LY12CZ)
Screw Thread Size	M5x0.8

Resources

The Data Sheet below has a comprehensive glossary that describes in practical terms the meaning and usefulness of the specifications.

Warning


Make sure to calibrate your load cell before using it. You can find information on how to calibrate the cell in the [Load Cell Primer](#). You should also look at the [1046 - PhidgetBridge User Guide](#).

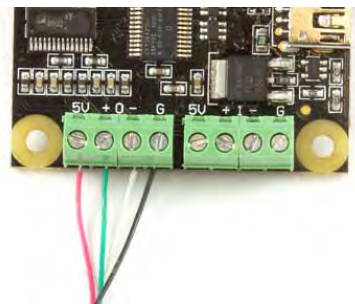
Connection

The 3134 connects to a bridge on the 1046 – PhidgetBridge 4-Input



The following table shows how to connect the Load Cell Wires to the bridge connectors.

Wire Color	Red	Green	White	Black
Bridge Connector	5V	+	-	GND



1046_0 - PhidgetBridge 4-Input

Product Description

The PhidgetBridge lets you connect up to 4 un-amplified Wheatstone bridges, such as:

- strain gauges
- compression load cells
- pressure sensors/Barometers
- piezoresistive accelerometers
- Magnetoresistive sensors (Compasses)

The data rate and gain values can be configured in software.

Product Specifications
Board

API Object Name	Bridge
Number of Bridge Inputs	4
Bridge Data Rate Min	8 ms
Bridge Data Rate Max	1000 ms
Bridge Input Current Max	± 3 nA
Differential Voltage Resolution	24 bit

Electrical Properties

USB Voltage Min	4.5 V DC
USB Voltage Max	5.3 V DC
USB Speed	Full Speed
Current Consumption Min	35 mA
Current Consumption Max	500 mA
Available External Current	465 mA
Input Voltage Limit Min	Ground + 0.25V DC
Input Voltage Limit Max	5V Supply - 0.25V DC

Physical Properties

Recommended Wire Size	16 - 26 AWG
Operating Temperature Min	0 °C
Operating Temperature Max	70 °C

Comes Packaged with

- A [3018 - Mini-USB Cable 180cm](#)
- A Hardware mounting kit (4 nuts and bolts (M3), 4 plastic spacers)

Product Features

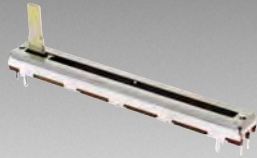
The PhidgetBridge is the interface board needed to measure the output from a load cell. You can connect up to four load cells, strain gauges, or wheatstone bridge sensors.

Enclosure

You can protect your board by purchasing the [3808 - Acrylic Enclosure for the 1046](#).



*ROHS COMPLIANT



BOURNS®

Features

- Carbon element
- Metal housing
- 15-60 mm travel
- Single and dual gang
- Center detent option
- Dust cover option
- RoHS compliant*



PTA Series - Low Profile Slide Potentiometer

Electrical Characteristics

Taper..... Linear, audio
 Standard Resistance Range 1 K ohms to 1 M ohms
 Standard Resistance Tolerance.....±20 %
 Residual Resistance 500 ohms or 1 % max.
 Insulation Resistance Min. 100 megohms at 250 V DC

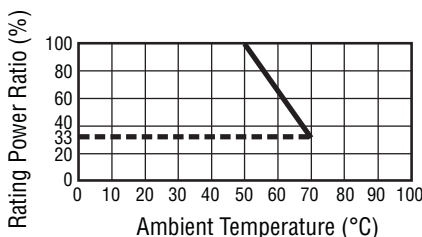
Environmental Characteristics

Operating Temperature -10 °C to +50 °C
 Power Rating, Linear
 15 mm 0.05 W (0.025 W Dual Gang)
 20 mm 0.1 W (0.05 W)
 30 mm 0.2 W (0.1 W)
 45 mm 0.25 W (0.125 W)
 60 mm 0.25 W (0.125 W)
 Power Rating, Audio
 15 mm .. 0.025 W (0.015 W Dual Gang)
 20 mm 0.05 W (0.025 W)
 30 mm 0.1 W (0.05 W)
 45 mm 0.125 W (0.06 W)
 60 mm 0.125 W (0.06 W)
 Maximum Operating Voltage, Linear
 15 mm 100 V DC
 20-60 mm 200 V DC
 Maximum Operating Voltage, Audio
 15 mm 50 V DC
 20-60 mm 150 V DC
 Withstand Voltage, Audio 1 Min. at 300 V AC
 Sliding Noise 100 mV maximum
 Tracking Error 3 dB at -40 to 0 dB

Mechanical Characteristics

Operating Force 30 to 250 g-cm
 Stop Strength 5 kg-cm min.
 Sliding Life 15,000 cycles
 Soldering Condition 300 °C max. within 3 seconds
 Travel 15, 20, 30, 45, 60 mm

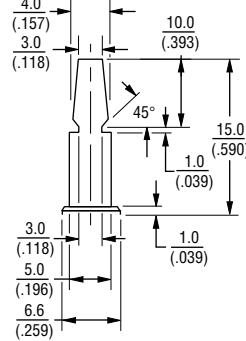
Derating Curve



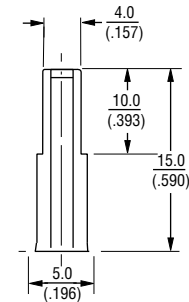
Lever Style & Product Dimensions

Actuator Styles

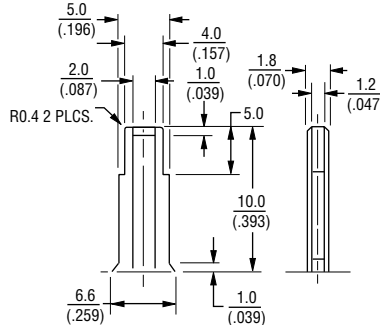
DP METAL LEVER



CP METAL LEVER



CI INSULATED LEVER



DIMENSIONS: MM (INCHES)

How To Order

PTA 15 4 3 - 2 0 10 DP B 203

Model
 Stroke Length
 • 15 = 15 mm
 • 20 = 20 mm
 • 30 = 30 mm
 • 45 = 45 mm
 • 60 = 60 mm
 Dust Cover Option
 • 4 = No Dust Cover
 • 5 = Rubber Dust Cover**
 No. of Gangs
 • 3 = Single Gang
 • 4 = Dual Gang
 Pin Style
 • 2 = PC Pins Down Facing
 Center Detent Option
 • 0 = No Detent
 • 2 = Center Detent
 Standard Lever Length (See Table)
 • 10 = 10 mm (CI Lever)
 • 15 = 15 mm (DP, CP and CI)
 Lever Style
 • DP = Metal Lever (Refer to Drawing)
 • CP = Metal Lever (Refer to Drawing)
 • CI = Insulated Lever (Refer to Drawing)
 Resistance Taper
 • A = Audio Taper
 • B = Linear Taper
 Resistance Code (See Table)

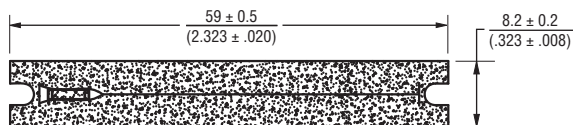
Other styles available.

** Part numbers with dust covers must be mounted with screws to a panel to prevent issues with the dust cover during usage.

Standard Resistance Table

Resistance (Ohms)	Resistance Code
1,000	102
2,000	202
5,000	502
10,000	103
20,000	203
50,000	503
100,000	104
200,000	204
500,000	504
1,000,000	105

Optional Dust Cover



NOTE: DUST COVER HAS ADHESIVE BACK.

$$T = \frac{0.3 \pm 0.1}{(0.118 \pm .004)}$$

*RoHS Directive 2002/95/EC Jan. 27, 2003 including annex and RoHS Recast 2011/65/EU June 8, 2011.

Specifications are subject to change without notice.

The device characteristics and parameters in this data sheet can and do vary in different applications and actual device performance may vary over time.

Users should verify actual device performance in their specific applications.

Applications

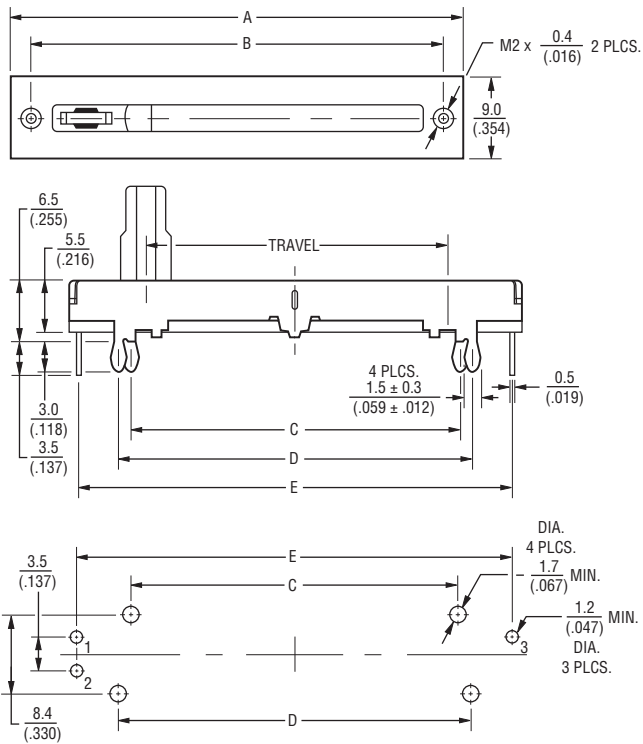
- Audio/TV sets
- Car radio
- Amplifiers/mixers/drum machines/synthesizers
- PCs/monitors
- Appliances

PTA Series - Low Profile Slide Potentiometer

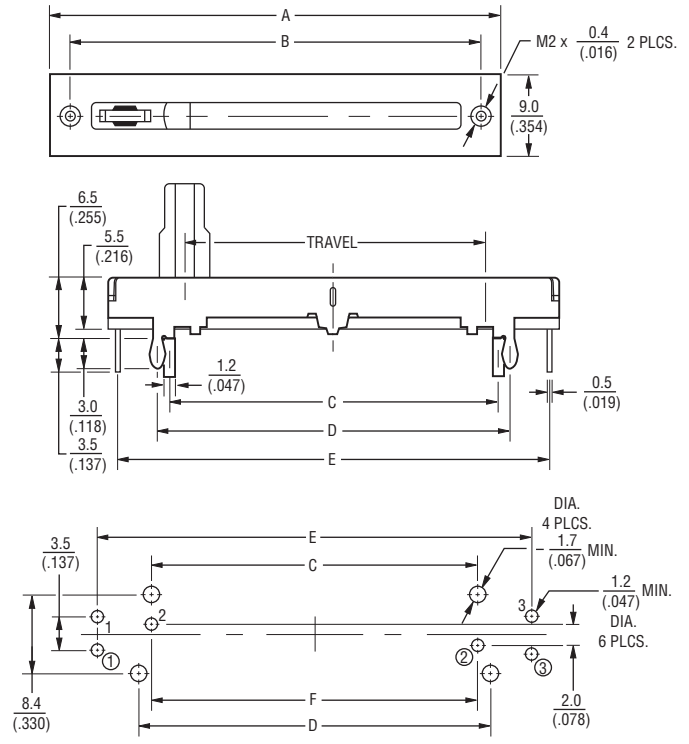


Product Dimensions

PTAxx43



PTAxx44



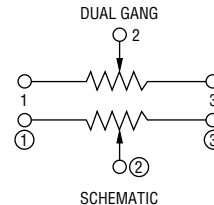
DIMENSIONS: $\frac{\text{MM}}{\text{(INCHES)}}$

Single Gang Dimensions

Model	A	B	C	D	E	Travel
PTA1543	$\frac{30}{(1.18)}$	$\frac{26}{(1.02)}$	$\frac{17.8}{(.700)}$	$\frac{20.2}{(.795)}$	$\frac{28.5}{(1.12)}$	$\frac{15}{(.59)}$
PTA2043	$\frac{35}{(1.37)}$	$\frac{31}{(1.22)}$	$\frac{22.8}{(.897)}$	$\frac{25.2}{(.992)}$	$\frac{33}{(1.29)}$	$\frac{20}{(.787)}$
PTA3043	$\frac{45}{(1.77)}$	$\frac{41}{(1.61)}$	$\frac{32.8}{(1.29)}$	$\frac{35.2}{(1.38)}$	$\frac{43.5}{(1.71)}$	$\frac{30}{(1.18)}$
PTA4543	$\frac{60}{(2.36)}$	$\frac{56}{(2.20)}$	$\frac{47.8}{(1.88)}$	$\frac{50.2}{(1.97)}$	$\frac{58.5}{(2.30)}$	$\frac{45}{(1.77)}$
PTA6043	$\frac{75}{(2.95)}$	$\frac{71}{(2.79)}$	$\frac{62.8}{(2.47)}$	$\frac{65.2}{(2.56)}$	$\frac{73.5}{(2.89)}$	$\frac{60}{(2.36)}$

Dual Gang Dimensions

Model	A	B	C	D	E	F	Travel
PTA1544	$\frac{30}{(1.18)}$	$\frac{26}{(1.02)}$	$\frac{17.8}{(.700)}$	$\frac{20.2}{(.795)}$	$\frac{28.5}{(1.12)}$	$\frac{18}{(.708)}$	$\frac{15}{(.59)}$
PTA2044	$\frac{35}{(1.37)}$	$\frac{31}{(1.22)}$	$\frac{22.8}{(.897)}$	$\frac{25.2}{(.992)}$	$\frac{33}{(1.29)}$	$\frac{23}{(.905)}$	$\frac{20}{(.787)}$
PTA3044	$\frac{45}{(1.77)}$	$\frac{41}{(1.61)}$	$\frac{32.8}{(1.29)}$	$\frac{35.2}{(1.38)}$	$\frac{43.5}{(1.71)}$	$\frac{33}{(1.29)}$	$\frac{30}{(1.18)}$
PTA4544	$\frac{60}{(2.36)}$	$\frac{56}{(2.20)}$	$\frac{47.8}{(1.88)}$	$\frac{50.2}{(1.97)}$	$\frac{58.5}{(2.30)}$	$\frac{48}{(1.88)}$	$\frac{45}{(1.77)}$
PTA6044	$\frac{75}{(2.95)}$	$\frac{71}{(2.79)}$	$\frac{62.8}{(2.47)}$	$\frac{65.2}{(2.56)}$	$\frac{73.5}{(2.89)}$	$\frac{63}{(2.48)}$	$\frac{60}{(2.36)}$



REV. 12/14

Specifications are subject to change without notice. The device characteristics and parameters in this data sheet can and do vary in different applications and actual device performance may vary over time. Users should verify actual device performance in their specific applications.

Arduino Leonardo



Overview

The Arduino Leonardo is a microcontroller board based on the ATmega32u4. It has 20 digital input/output pins (of which 7 can be used as PWM outputs and 12 as analog inputs), a 16 MHz crystal oscillator, a micro USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started.

The Leonardo differs from all preceding boards in that the ATmega32u4 has built-in USB communication, eliminating the need for a secondary processor. This allows the Leonardo to appear to a connected computer as a mouse and keyboard, in addition to a virtual (CDC) serial/COM port. It also has other implications for the behavior of the board.

Summary

Microcontroller	ATmega32u4
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	20
PWM Channels	7
Analog Input Channels	12
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega32u4) of which 4 KB used by bootloader
SRAM	2.5 KB (ATmega32u4)
EEPROM	1 KB (ATmega32u4)
Clock Speed	16 MHz
Length	68.6 mm
Width	53.3 mm
Weight	20g

Power

The Arduino Leonardo can be powered via the micro USB connection or with an external power supply. The power source is selected automatically.

External (non-USB) power can come either from an AC-to-DC adapter (wall-wart) or battery. The adapter can be connected by plugging a 2.1mm center-positive plug into the board's power jack. Leads from a battery can be inserted in the G_{nd} and V_{in} pin headers of the POWER connector.

The board can operate on an external supply of 6 to 20 volts. If supplied with less than 7V, however, the 5V pin may supply less than five volts and the board may be unstable. If using more than 12V, the voltage regulator may overheat and damage the board. The recommended range is 7 to 12 volts.

The power pins are as follows:

VIN. The input voltage to the Arduino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.

5V. The regulated power supply used to power the microcontroller and other components on the board. This can come either from VIN via an on-board regulator, or be supplied by USB or another regulated 5V supply.

3V3. A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.
GND. Ground pins.

I/OREF. The voltage at which the I/O pins of the board are operating (i.e. VCC for the board). This is 5V on the Leonardo.

Memory

The ATmega32u4 has 32 KB (with 4 KB used for the bootloader). It also has 2.5 KB of SRAM and 1 KB of EEPROM (which can be read and written with the EEPROM library).

Input and Output

Each of the 20 digital I/O pins on the Leonardo can be used as an input or output. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

- **Serial:** 0 (RX) and 1 (TX). Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data using the ATmega32u4 hardware serial capability. Note that on the Leonardo, the Serial class refers to USB (CDC) communication; for TTL serial on pins 0 and 1, use the Serial1 class.
- **TWI:** 2 (SDA) and 3 (SCL). Support TWI communication.
- **External Interrupts:** 2 (interrupt 0), 3 (interrupt 1), 4 (interrupt 2), 5 (interrupt 3) and 6 (interrupt 4). These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or

falling edge, or a change in value.

- **PWM:** 3, 5, 6, 9, 10, 11, and 13. Provide 8-bit PWM output.
- **SPI:** on the ICSP header. These pins support SPI communication. Note that the SPI pins are not connected to any of the digital I/O pins as they are on the Uno, They are only available on the ICSP connector. This means that if you have a shield that uses SPI, but does NOT have a 6-pin ICSP connector that connects to the Leonardo's 6-pin ICSP header, the shield will not work.
- **LED:** 13. There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.
- **Analog Inputs:** AO-AS, A6 - All (on digital pins 4, 6, 8, 9, 10, and 12). The Leonardo has 12 analog inputs, labeled AO through All, all of which can also be used as digital I/O. Pins AO-AS appear in the same locations as on the Uno; inputs A6-All are on digital I/O pins 4, 6, 8, 9, 10, and 12 respectively. Each analog input provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default the analog inputs measure from ground to 5 volts, though is it possible to change the upper end of their range using the AREF pin.

There are a couple of other pins on the board:

- **AREF.** Reference voltage for the analog inputs.
- **Reset.** Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.



[ARDUINO](#) / [SHIELDS](#) / [DATA LOGGING](#) / ADAFRUIT ASSEMBLED DATA LOGGING SHIELD FOR ARDUINO



QTY	DISCOUNT
1-9	\$13.95
10-99	\$12.56
100+	\$11.16

IN STOCK

ADD TO CART

Also include 1 x [CR1220 12mm Diameter - 3V Lithium Coin Cell Battery](#) (\$0.95)

DESCRIPTION

Here's a handy Arduino shield: we've had a lot of people looking for a dedicated and well-designed data logging shield. We worked hard to engineer an inexpensive but well-rounded design. Not only is it easy to assemble and customize, it also [comes with great documentation and libraries](#).

Our latest version of this popular shield has all the features of the popular original, and is "R3" compatible so you can use it with just about any Arduino or compatible. You can be up and running with it in less than 15 minutes - saving data to files on any FAT16 or FAT32 formatted SD card, to be read by any plotting, spreadsheet or analysis program. [We even have a tutorial on how to use two free software programs to plot your data](#). The included RTC (Real Time Clock) can be used to timestamp all your data with the current time, so that you know precisely what happened when!

Please note that this item does not come with an Arduino (you'll need one to use with the shield), SD card or coin cell battery! The shield comes with all the components soldered on and tested but does not have headers installed. You'll need some basic soldering skills to put it together, but even if you don't have much experience you can get it done in under 15 minutes.

- SD card interface works with FAT16 or FAT32 formatted cards. 3.3v level shifter circuitry prevents damage to your SD card
- Real time clock (RTC) keeps the time going even when the Arduino is unplugged. The battery backup lasts for years
- Included libraries and example code for both SD and RTC mean you can get going quickly
- Prototyping area for soldering connectors, circuitry or sensors.
- Onboard 3.3v regulator is both a reliable reference voltage and also reliably runs SD cards that require a lot of power to run

With this new version you can use it with:

- Arduino UNO or ATmega328 compatible - 4 analog channels at 10 bit resolution, 6 if RTC is not used
- Arduino Leonardo or ATmega32u4 compatible - 12 analog channels at 10 bit resolution
- Arduino Mega R3 or ATmega2560 compatible - 16 analog inputs (10-bit)
- Arduino Zero or ATSAMD21 compatible - 6 analog inputs (12-bit)
- Arduino Due - 12 analog inputs (12-bit)

Of course you can log anything you like, including digital sensors that have Arduino libraries, serial data, bit timings, and more! [For more information, including libraries, schematics and examples see the data logger shield webpage](#)

New Products 9/7/2016