

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Diseño mecánico de una máquina de tracción y  
compresión biaxial

Autor: José Rodríguez Vallés

Tutores: Esther Reina Romo

Juan Mora Macías

Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018





Trabajo Fin de Máster  
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

# **Diseño mecánico de una máquina de tracción y compresión biaxial**

Autor:

José Rodríguez Vallés

Tutores:

Esther Reina Romo

Profesora Titular de Universidad

Juan Mora Macías

Profesor Ayudante Doctor

Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Máster: Diseño mecánico de una máquina de tracción y compresión biaxial

Autor: José Rodríguez Vallés  
Tutores: Esther Reina Romo  
Juan Mora Macías

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*  
*A Lucía y a mis amigos*  
*A mis maestros*





# Resumen

---

En la actualidad, son numerosos los ensayos mecánicos que se realizan sobre probetas de diversos materiales para determinar sus propiedades y posteriormente emplearlos con un fin concreto. La mayoría de estos ensayos se realizan aplicando cargas uniaxiales en máquinas universales de tracción y compresión, sin embargo, está demostrado que, en materiales compuestos o materiales biológicos, en particular los huesos, debido a que presentan una fuerte anisotropía, es necesario realizar ensayos bajo un estado de cargas biaxial.

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño y fabricación de un prototipo de máquina biaxial compacta y económica para realizar ensayos en probetas de huesos. Se ha elaborado un estudio de las tipologías de máquinas biaxiales existentes, incorporando características de alguna de ellas. Además, se emplea la videocorrelación de imágenes digitales como método para medir las deformaciones en las probetas.

Finalmente se estudia el método de fabricación más adecuado, siendo la impresión 3D el elegido debido a su versatilidad y bajo coste respecto al mecanizado. Se fabrica el prototipo empleando como material el polímero PLA y se realiza el presupuesto de la máquina completa.



# Índice

---

<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>Índice</b>	<b>XI</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>XIII</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>XV</b>
<b>Notación</b>	<b>XIX</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>21</b>
1.1. <i>Objetivo</i>	21
1.2. <i>Motivación</i>	22
1.3. <i>Introducción</i>	23
1.4. <i>Estado del arte</i>	25
1.3.1 <i>Ensayos biaxiales en materiales biológicos</i>	26
1.3.2 <i>Tipos de máquinas biaxiales</i>	29
1.3.3 <i>Máquinas biaxiales autónomas comerciales</i>	30
1.3.4 <i>Máquinas biaxiales autónomas no comerciales</i>	33
1.3.5 <i>Mecanismos accesorios para ensayos biaxiales</i>	48
<b>2 Diseño</b>	<b>55</b>
2.1. <i>Introducción</i>	55
2.2. <i>Mordazas</i>	56
2.3. <i>Sistema móvil</i>	61
2.4. <i>Sensor de fuerza</i>	64
2.5. <i>Estructura base</i>	66
2.6. <i>Máquina completa</i>	68
<b>3 Material</b>	<b>71</b>
3.1. <i>Introducción</i>	71
3.2. <i>Metales: Acero inoxidable y Aluminio</i>	71
3.3. <i>Polímeros: PLA</i>	73

<b>4</b>	<b>Presupuesto</b>	<b>75</b>
4.1.	<i>Introducción</i>	75
4.2.	<i>Presupuesto: Acero</i>	75
4.3.	<i>Presupuesto: Aluminio</i>	77
4.4.	<i>Presupuesto: PLA</i>	78
<b>5</b>	<b>Simulaciones Mecánicas</b>	<b>81</b>
5.1.	<i>Introducción</i>	81
5.2.	<i>Condiciones de contorno y fuerzas aplicadas</i>	81
5.3.	<i>Análisis de sensibilidad de la malla</i>	83
5.4.	<i>Análisis estático y Resultados</i>	84
<b>6</b>	<b>Correlación de imágenes digitales</b>	<b>91</b>
6.1.	<i>Introducción</i>	91
6.2.	<i>Aplicaciones de la técnica DIC</i>	92
6.3.	<i>Sistema VIC 2D</i>	93
<b>7</b>	<b>Impresión 3D del Prototipo</b>	<b>95</b>
7.1.	<i>Introducción</i>	95
7.2.	<i>Impresora BQ Witbox 2</i>	95
7.3.	<i>Software Ultimaker CURA</i>	96
7.4.	<i>Fabricación del prototipo</i>	99
<b>8</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>103</b>
8.1.	<i>Introducción</i>	103
8.2.	<i>Conclusiones</i>	103
8.3.	<i>Mejoras futuras</i>	104
	<b>Bibliografía</b>	<b>105</b>
	<b>Anexo. Planos</b>	<b>111</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<i>Tabla 1. Propiedades mecánicas del hueso cortical humano.</i>	24
<i>Tabla 2. Comparación de máquinas biaxiales autónomas no comerciales</i>	34
<i>Tabla 3. Lista de piezas.</i>	56
<i>Tabla 4. Características del sensor de fuerza.</i>	66
<i>Tabla 5. Lista de tornillos.</i>	69
<i>Tabla 6. Propiedades mecánicas del acero.</i>	71
<i>Tabla 7. Propiedades mecánicas del aluminio.</i>	72
<i>Tabla 8. Propiedades mecánicas y térmicas de PLA y ABS.</i>	74
<i>Tabla 9. Presupuesto de mecanizado en acero inoxidable (Mecanizados Mafex S.L.).</i>	76
<i>Tabla 10. Coste total de la máquina en acero inoxidable.</i>	76
<i>Tabla 11. Presupuesto de mecanizado en aluminio (Mecanizados Mafex S.L.).</i>	77
<i>Tabla 12. Coste total de la máquina en aluminio.</i>	77
<i>Tabla 13. Coste energético de la impresión.</i>	78
<i>Tabla 14. Coste total de la máquina mediante impresión 3D.</i>	79
<i>Tabla 15. Límite elástico de los materiales candidatos.</i>	85
<i>Tabla 16. Parámetros de impresión del prototipo.</i>	99



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

<i>Figura 1.1. Partes del fémur</i> .....	24
<i>Figura 1.2. Máquina universal de ensayos de tracción uniaxial</i> .....	25
<i>Figura 1.3. Curva tensión-deformación</i> .....	26
<i>Figura 1.4. Ensayo biaxial de aorta</i> .....	26
<i>Figura 1.5. Ensayo biaxial a tendón supraespinoso.</i> .....	27
<i>Figura 1.6. Simulaciones mediante elementos finitos de hueso trabecular humano.</i> .....	28
<i>Figura 1.7. Ensayo de punzonado</i> .....	29
<i>Figura 1.8. Ensayo de tensión-torsión</i> .....	30
<i>Figura 1.9. Máquina biaxial ADMET</i> .....	31
<i>Figura 1.10. Máquina biaxial Zwick/Roell</i> .....	32
<i>Figura 1.11. Máquina biaxial MTS</i> .....	33
<i>Figura 1.12. Máquina biaxial autónoma</i> .....	35
<i>Figura 1.13. Máquina biaxial autónoma</i> .....	37
<i>Figura 1.14. Relación tensión - deformación en cargas biaxiales y uniaxiales</i> .....	38
<i>Figura 1.15. Comparación entre el ensayo biaxial y el ensayo uniaxial</i> .....	39
<i>Figura 1.16. Máquina biaxial autónoma. Vista superior.</i> .....	40
<i>Figura 1.17. Máquina biaxial autónoma. Vista frontal.</i> .....	41
<i>Figura 1.18. Sistema completo</i> .....	42
<i>Figura 1.19. Sistema de sujeción</i> .....	43
<i>Figura 1.20. Máquina biaxial autónoma</i> .....	44
<i>Figura 1.21. Máquina biaxial autónoma</i> .....	44
<i>Figura 1.22. Esquema de máquina biaxial autónoma. (1) Mordazas, (2) Horno, (3) Sensor de fuerza, (4) Paneles laterales, (5) Barra de tracción, (6) Bloque de enlace, (7) Cilindro hidráulico, (8) Refuerzo, (9) Mesa de trabajo, (10) Base, (11) Rail guía, (12) Placa de soporte, (13) Eje de conexión.</i> .....	45
<i>Figura 1.23. Mordaza</i> .....	46
<i>Figura 1.24. Componentes de mordaza. (a) Bisagra; (b) Abrazadera; (c) Tornillos de compresión; (d) Pieza de bloqueo; (e) Probeta; (f) Base deslizante.</i> .....	47
<i>Figura 1.25. Esquema de mordazas</i> .....	47

<i>Figura 1.26. Máquina biaxial autónoma. (a), (c), (e), (f) Mordazas; (b) Probeta; (d) Sensor de desplazamiento; (g) Sensor de fuerza; (h) Rail guía; (i) Motor; (j) Tornillo de flexión; (k) Tornillos de tracción-compresión; (l) Reductor.</i>	48
<i>Figura 1.27. Mecanismo accesorio para ensayos biaxiales</i>	49
<i>Figura 1.28. Mecanismo accesorio para ensayos biaxiales.</i>	50
<i>Figura 1.29. Mecanismo accesorio para ensayos biaxiales</i>	51
<i>Figura 1.30. Funcionamiento de mecanismo accesorio para ensayos biaxiales</i>	52
<i>Figura 1.31. Esquema de mecanismo accesorio para ensayos biaxiales</i>	52
<i>Figura 1.32. Mecanismo accesorio para ensayos biaxiales</i>	53
<i>Figura 2.1. Montaje completo.</i>	55
<i>Figura 2.2. Base de la mordaza fija (evolución).</i>	57
<i>Figura 2.3. Base de la mordaza móvil (evolución).</i>	58
<i>Figura 2.4. Probetas.</i>	58
<i>Figura 2.5. Mordaza para probetas cilíndricas.</i>	59
<i>Figura 2.6. Mordaza para probetas rectangulares y cruciformes (evolución).</i>	60
<i>Figura 2.7. Conjuntos de mordazas.</i>	60
<i>Figura 2.8. Rail.</i>	61
<i>Figura 2.9. Tornillo trapezoidal y tuerca.</i>	62
<i>Figura 2.10. Cojinete con rodamiento.</i>	63
<i>Figura 2.11. Accionador (evolución).</i>	64
<i>Figura 2.12. Acoplador y anilla de accionamiento.</i>	64
<i>Figura 2.13. Sensor de fuerza Forsentek FSSM-1kN</i>	65
<i>Figura 2.14. Conjunto Accionador-Sensor-Mordaza</i>	66
<i>Figura 2.15. Estructura base (evolución).</i>	67
<i>Figura 2.16. Apoyos de la estructura.</i>	67
<i>Figura 2.17. Estructura base (diseño final).</i>	68
<i>Figura 2.18. Montaje completo con probeta rectangular.</i>	69
<i>Figura 3.1. Corrosión galvánica</i>	73
<i>Figura 5.1. Condiciones de contorno y aplicación de fuerza de tracción en mordaza rectangular.</i>	82
<i>Figura 5.2. Condiciones de contorno y aplicación de fuerza en mordaza cilíndrica.</i>	82
<i>Figura 5.3. Análisis de sensibilidad de la malla en mordaza rectangular.</i>	83
<i>Figura 5.4. Análisis de sensibilidad de la malla en mordaza cilíndrica.</i>	83
<i>Figura 5.5. Análisis estático de mordaza rectangular a tracción (Tensión de Von Mises (Pa)).</i>	84
<i>Figura 5.6. Análisis estático de mordaza rectangular a compresión (Tensión de Von Mises (Pa)).</i>	85
<i>Figura 5.7. Fuerza aplicada en mordaza cilíndrica frente a tensión máxima de Von Mises.</i>	86
<i>Figura 5.8. Mordazas huecas (corte).</i>	87
<i>Figura 5.9. Análisis estático de mordaza rectangular hueca a tracción (Tensión de Von Mises (Pa)).</i>	87
<i>Figura 5.10. Análisis estático de mordaza rectangular hueca a compresión (Tensión de Von Mises (Pa)).</i>	88



<i>Figura 5.11. Fuerza aplicada en mordaza cilíndrica hueca frente a tensión máxima de Von Mises.</i> .....	89
<i>Figura 5.12. Análisis estático de mordaza cilíndrica hueca a flexión (Tensión de Von Mises (Pa)).</i> .....	89
<i>Figura 6.1. Cámara digital, VIC 2D Limes</i> .....	93
<i>Figura 6.2. Correlación de imágenes</i> .....	94
<i>Figura 7.1. Impresora BQ Witbox 2.</i> .....	96
<i>Figura 7.2. Software Ultimaker CURA.</i> .....	96
<i>Figura 7.3. Conjunto de piezas fabricadas mediante impresión 3D.</i> .....	100
<i>Figura 7.4. Montaje completo del prototipo.</i> .....	101



# Notación

---

E            Módulo de Young

GPa          Giga pascal

MPa          Mega pascal

$\rho$             Densidad

$\nu$             Módulo de Poisson

kN            Kilo Newton



# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1. Objetivo

El objetivo del proyecto es el diseño y fabricación (empleando la impresión 3D) de una máquina compacta y económica la cual permita aplicar cargas biaxiales sobre probetas de huesos de un tamaño pequeño o mediano (probetas de tamaño comprendido entre  $20 \times 20 \times 2$  mm hasta  $120 \times 120 \times 20$  mm) con el fin de determinar de una manera fiable y exacta sus propiedades mecánicas. Este diseño permite aplicar una fuerza de tracción o compresión máxima de 1000 N, con la que se consiguen deformaciones suficientes para ser medidas mediante videocorrelación de imágenes digitales (Ruiz García 2015, Sztefek et al. 2010). Aunque el diseño se basa principalmente en probetas de huesos, es posible ensayar diversos materiales biológicos, siempre que su tamaño esté comprendido entre los anteriormente citados.

En el capítulo 1, se realiza una amplia revisión de la literatura con el objetivo de conocer los diseños existentes, las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos, y la viabilidad de incluir determinadas características al diseño propuesto en este proyecto.

Posteriormente, en el capítulo 2, se detalla el diseño de cada uno de los componentes de la máquina, incluyendo su evolución desde la idea original hasta el diseño final mediante el software CATIA V5®.

En el tercer capítulo se presentan los materiales candidatos para la fabricación de la máquina, así como sus propiedades más relevantes.

El capítulo 4 se compone del presupuesto de fabricación del prototipo con cada uno de los materiales expuestos en el capítulo anterior.

El quinto capítulo se compone de diversas simulaciones mecánicas en el software de elementos finitos ANSYS®, con el fin de verificar que la máquina es capaz de soportar los esfuerzos a los que se ve sometida durante los ensayos.

Posteriormente, en el sexto capítulo, se presenta el sistema de medición óptica de deformaciones en 2D mediante la técnica de correlación de imágenes digitales con la que se medirán las deformaciones en las probetas.

Se exponen las características del proceso de impresión 3D y los parámetros más importantes para la fabricación de los componentes de la máquina en el capítulo 7.

Finalmente, en el capítulo 8, se comentan brevemente las conclusiones del proyecto y mejoras futuras.

## **1.2. Motivación**

Este proyecto surge de la necesidad de realizar ensayos con cargas biaxiales a probetas de materiales biológicos como, por ejemplo, hueso cortical. La anisotropía propia de este tipo de materiales hace que, para determinar sus propiedades de manera correcta, sea conveniente realizar ensayos con cargas biaxiales, ya sean de tracción o compresión.

El diseño propuesto se enmarca en las máquinas biaxiales autónomas, englobando características ventajosas de los mecanismos accesorios para ensayos biaxiales. La máquina permite la aplicación de manera manual de cargas de tracción o compresión en dos ejes perpendiculares. La combinación de cargas en los ejes puede ser cualquiera, ya que cada eje actúa de manera independiente. Como se comentará en apartados posteriores, la principal desventaja de las máquinas autónomas con respecto los mecanismos accesorios es su alto coste. Con este diseño se obtiene una máquina biaxial autónoma a un coste comparable con el de los mecanismos accesorios.

### 1.3. Introducción

Las propiedades mecánicas son muy importantes en el diseño de cualquier componente ya que el rendimiento y la función de este dependen de su capacidad para resistir las deformaciones que sufre bajo las cargas a las que se somete en servicio. Es necesario conocer los diversos ensayos y pruebas que se utilizan para conocer dichas propiedades, así como las restricciones que supone realizar estos ensayos en un laboratorio y de manera normalizada. Por lo tanto, se debe tener precaución debido a que las condiciones de prueba en el laboratorio pueden no ser representativas de las condiciones finales del componente en servicio.

En la realidad, en escasas ocasiones los materiales se encuentran sometidos a una sola carga o a varias cargas en una sola dirección. Las propiedades mecánicas son muy diferentes cuando existen varias cargas o en varias direcciones (Hailian Li et al. 2017). Estudios han comprobado que la tensión de rotura calculada con un ensayo uniaxial es mucho menor que la correspondiente al caso biaxial, y por lo tanto el ensayo uniaxial no es suficiente en ciertos casos (Li et al. 2004). Este hecho se hace muy evidente en los materiales compuestos, ya que, según la orientación de las fibras, las propiedades mecánicas difieren considerablemente según la dirección (Martínez Vicente 2016). Por lo tanto, la realización de ensayos biaxiales proporciona resultados más fiables para el diseño de componentes mecánicos (Jones 2005).

Otro de los grandes grupos de materiales anisótropos son los biológicos, y más concretamente, los huesos. Dentro de los huesos, los llamados huesos largos son los que mayor anisotropía presentan (Rincón et al. 2004). Internamente constan de una capa exterior de hueso cortical, muy duro y resistente, una zona interior de hueso esponjoso, y finalmente la cavidad medular (Figura 1.1). La resistencia del hueso cortical varía considerablemente dependiendo de la dirección, mientras que la isotropía de la zona esponjosa depende de los esfuerzos que actúen en cada zona, ya que estos son los que determinan la simetría geométrica de las trabéculas (Ruiz García 2015).

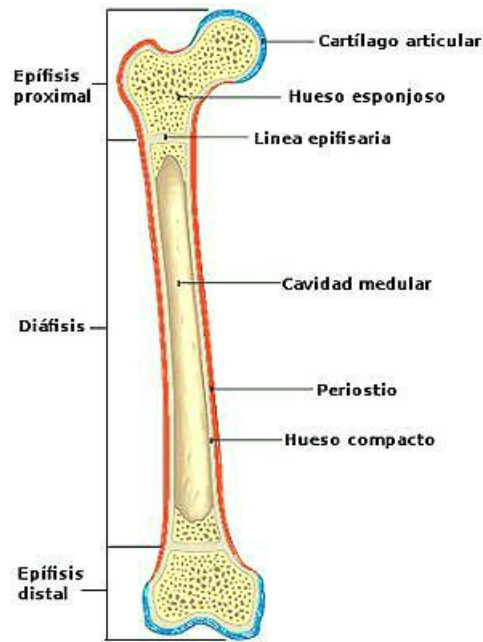


Figura 1.1. Partes del fémur ([www.partesdel.com/femur](http://www.partesdel.com/femur)).

En la Tabla 1 se muestran las propiedades mecánicas de un fémur humano (módulo de Young y coeficiente de Poisson) según la dirección del hueso. Aunque estos valores corresponden a un fémur humano, la anisotropía del hueso es extrapolable a cualquier hueso. Esto demuestra la anisotropía de este tipo de material y, por lo tanto, la necesidad de realizar ensayos biaxiales para su determinación.

	Fémur fresco (Ashman et al. 1984)	Fémur fresco (Meunier et al. 1989)	Fémur seco (Yoon et al. 1976)
$E_x = E_y$ (GPa)	13,48	12,41	18,8
$E_z$ (GPa)	20,6	20,35	27,4
$\nu_{xy}$	0,37	0,41	0,31
$\nu_{xz}$	0,22	0,20	0,193
$\nu_{yz}$	0,36	0,35	0,28

Tabla 1. Propiedades mecánicas del hueso cortical humano.



## 1.4. Estado del arte

En la actualidad, se están llevando a cabo numerosos estudios y ensayos relacionados con las propiedades mecánicas de los materiales, y en particular, con su determinación de manera más exacta y fiable. Una de las principales causas de accidentes graves, pérdidas de vidas humanas y daños materiales es el fallo del material debido a mecanismos de daño microscópico del mismo (Yuan et al. 2014). Dicho fallo se produce, en muchas ocasiones, por la escasa capacidad de prueba de materiales, limitándose estas a ensayos uniaxiales de carga (Figura 1.2).



*Figura 1.2. Máquina universal de ensayos de tracción uniaxial (www.ritmindustry.com).*

Al aplicar una fuerza a un material, este se deforma (DeGarmo et al. 1997). Existen tres estados tensionales a los que puede estar sometido un material: tracción, compresión y cizalladura. Las tensiones de tracción tienden a estirar el material, las de compresión a comprimirlo y las de cizalladura hacen que las capas de material se deslicen unas sobre las otras (Groover 2002). La relación entre estos estados tensionales y la deformación que provocan se representa mediante la curva tensión-deformación, obteniéndose comúnmente mediante un ensayo de tracción uniaxial (Figura 1.3).

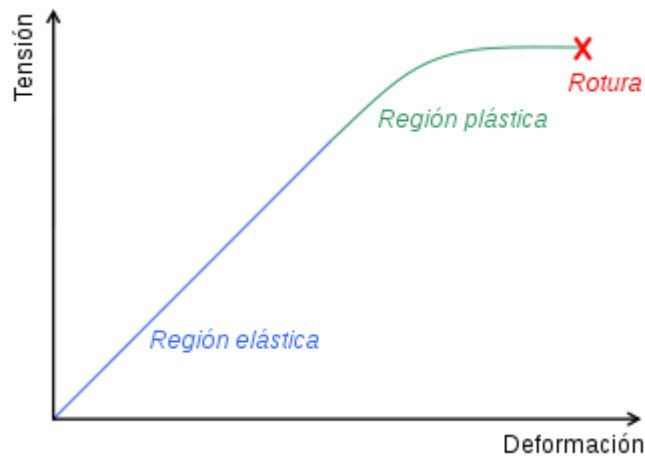


Figura 1.3. Curva tensión-deformación (es.wikipedia.org).

### 1.3.1 Ensayos biaxiales en materiales biológicos

En este apartado se exponen varios ensayos biaxiales llevados a cabo a materiales biológicos en la última década.

Entre ellos destacan los realizados por Peña et al. (2018) donde, mediante un ensayo en una máquina biaxial comercial (Instron BioPuls) se caracteriza el comportamiento mecánico de la aorta (Figura 1.4). El objetivo de dicho estudio es determinar cómo varían las propiedades mecánicas de la aorta según la posición de la muestra ensayada. El estudio demuestra, además de la anisotropía de la aorta, el aumento de rigidez de ésta conforme aumenta la distancia al corazón. El campo de deformaciones es medido mediante técnicas de videocorrelación de imágenes digitales (DIC).

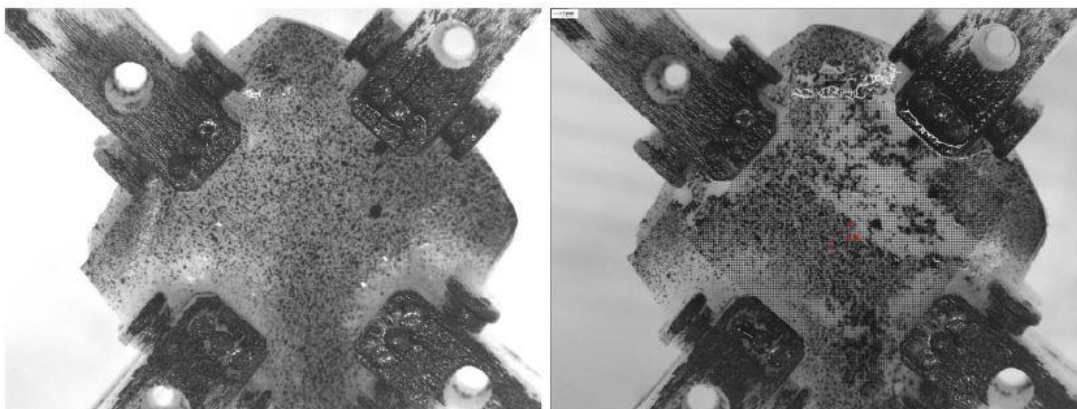


Figura 1.4. Ensayo biaxial de aorta (Peña et al. 2018).

Anteriormente se realizaron ensayos biaxiales sobre tejidos biológicos como el tendón supraespinoso (Szczesny et al. 2012) empleando también técnicas de videocorrelación de imágenes digitales para caracterizar las deformaciones (Figura 1.5). Ensayos uniaxiales previos demuestran una correlación entre la distribución del ángulo de las fibras de colágeno y la respuesta mecánica del tendón bajo una carga de tracción. Sin embargo, debido a la anisotropía y a la heterogeneidad de los tejidos conectivos fibrosos, es preciso realizar ensayos biaxiales. Se demuestra que las muestras con una distribución de ángulos más amplia resisten esfuerzos transversales mayores que las muestras con las fibras más alineadas. Por lo tanto, se concluye el estudio poniendo de manifiesto que los parámetros más importantes con relación a la resistencia de este tipo de tejidos son el módulo de Young y la orientación de las fibras de colágeno.

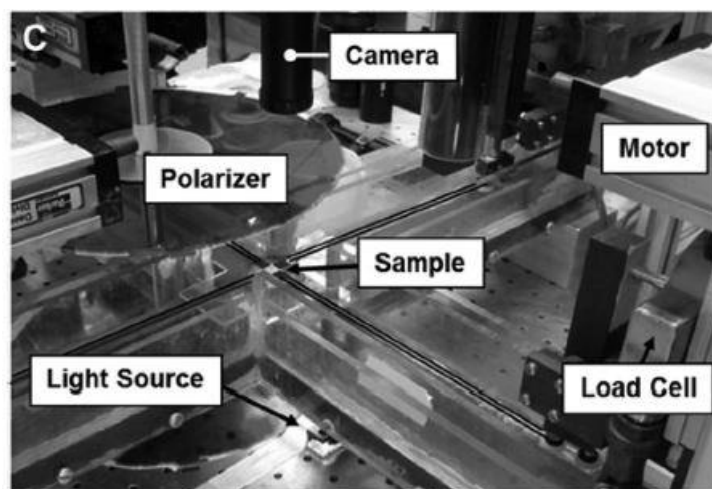


Figura 1.5. Ensayo biaxial a tendón supraespinoso (Szczesny et al. 2012).

Otros ensayos experimentales relevantes realizados a materiales biológicos son el ensayo bajo cargas biaxiales cíclicas al ligamento cardinal humano (Baah-Dwomoh et al. 2017), y, en el ámbito animal, los ensayos biaxiales tanto en el tejido gástrico (Aydin et al. 2017) como intestinal (Khoiy et al. 2018) porcino.

Además de ensayos experimentales, se han llevado a cabo simulaciones mediante elementos finitos aplicadas a hueso trabecular humano (Sanyal et al. 2013). El comportamiento del hueso trabecular humano es difícil de caracterizar, sobre todo en

zonas de baja densidad ósea, debido a que presenta una gran anisotropía. En este estudio se realizan simulaciones con elementos finitos a modelos de hueso trabecular con una fracción de volumen óseo entre 0,06 y 0,34. Se lleva a cabo un análisis de elementos finitos no lineales basado en tomografías computarizadas (CT) para simular el fallo biaxial en 15 especímenes.

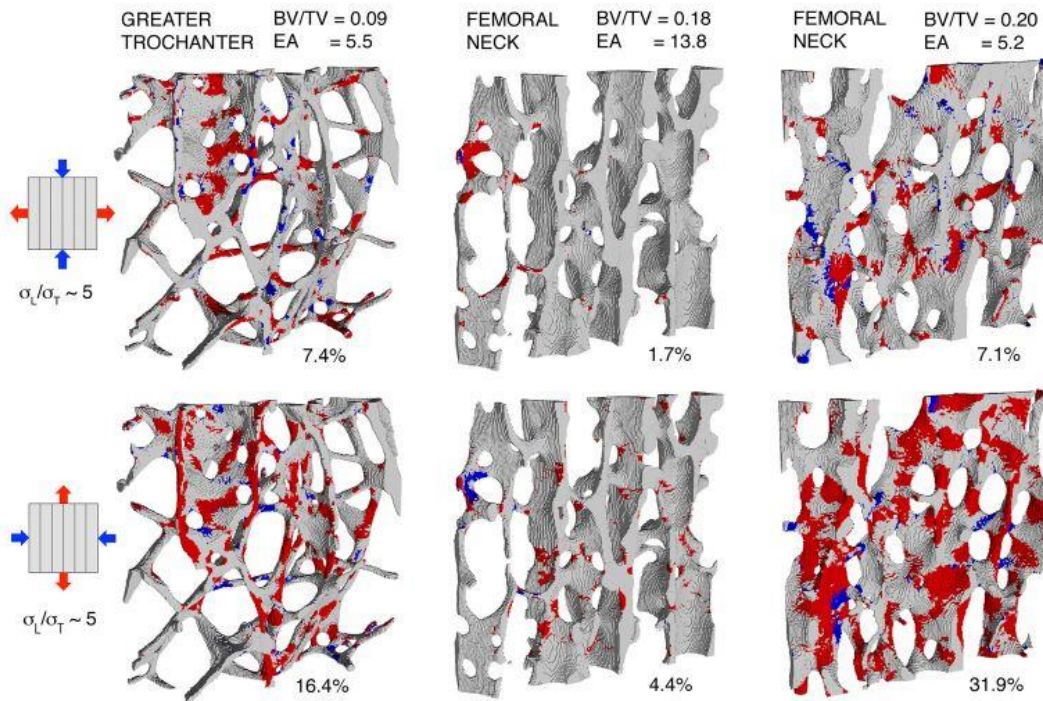


Figura 1.6. Simulaciones mediante elementos finitos de hueso trabecular humano (Sanyal et al. 2013).

En la Figura 1.6 se muestran los resultados de las distribuciones de esfuerzo de tres especímenes de hueso trabecular donde BV/TV indica la fracción de volumen óseo, EA indica la anisotropía elástica y el porcentaje inferior es la proporción de hueso que soporta esfuerzos con relación a la cantidad total de hueso de la muestra. El color rojo representa los esfuerzos de tracción, mientras que el azul los esfuerzos de compresión.

### 1.3.2 Tipos de máquinas biaxiales

En los últimos años, se han diseñado equipos para aplicar fuerzas que están estrechamente relacionadas con aquellas a las que el material está sometido durante las condiciones normales de servicio. Los ensayos de tracción biaxial se pueden usar para aplicar fuerzas que ocurren en más de una dirección simultáneamente. A partir de este ensayo, se pueden obtener curvas de tensión-deformación para diferentes direcciones de la muestra de prueba.

Entre los ensayos biaxiales más importantes destacan el ensayo de punzonado o protuberancia (bulge test) (Altan, 2003; Vlassak and Nix, 1992) (Figura 1.7), el ensayo combinado de tensión-torsión (Keefe et al. 1998) (Figura 1.8), el ensayo de flexión combinada con tensión en el plano (Soni et al. 2003) y el ensayo biaxial en el plano, siendo este último en el que se basa este proyecto y para el que se diseña la máquina.

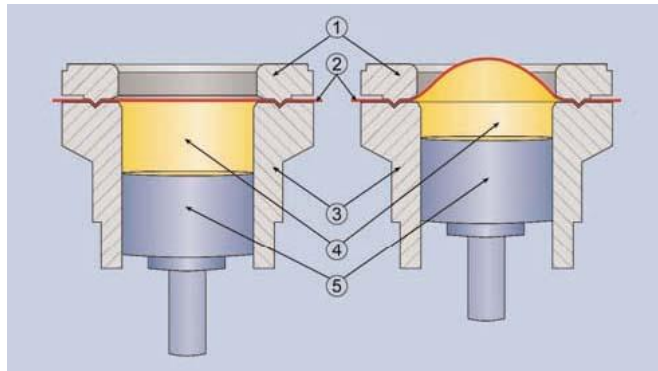


Figura 1.7. Ensayo de punzonado (Lian et al. 2013).

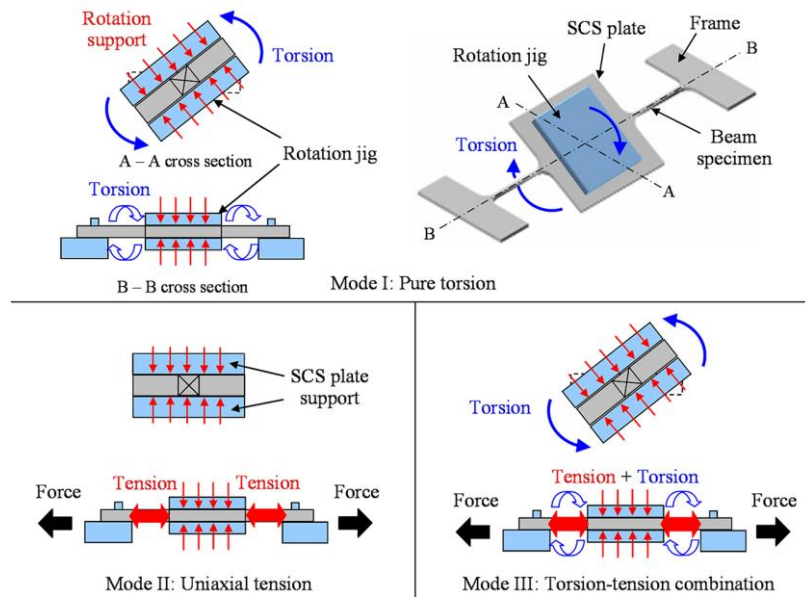


Figura 1.8. Ensayo de tensión-torsión (Namazu et al. 2013).

En el ámbito de las máquinas biaxiales, se distinguen dos tipos:

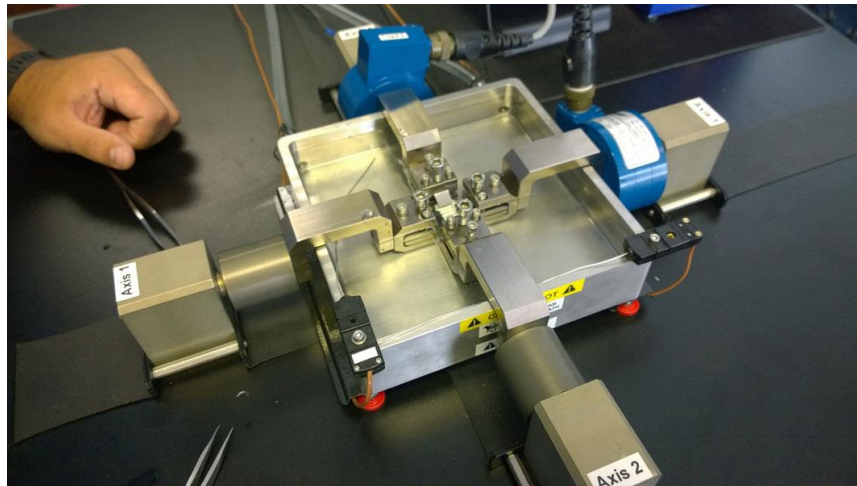
- Máquinas biaxiales autónomas: son aquellas que permiten actuar directamente sobre los ejes donde se aplica la carga, sin necesidad de utilizar otra máquina adicional. A este grupo pertenecen las máquinas biaxiales comerciales.
- Mecanismos accesorios para ensayos biaxiales: a diferencia de las anteriores, no son máquinas en sí mismas, sino mecanismos puramente mecánicos que, con su montaje sobre máquinas de ensayos uniaxiales, permiten aplicar cargas biaxiales.

### 1.3.3 Máquinas biaxiales autónomas comerciales

A continuación, se citan algunas de las máquinas biaxiales comerciales más destacadas.

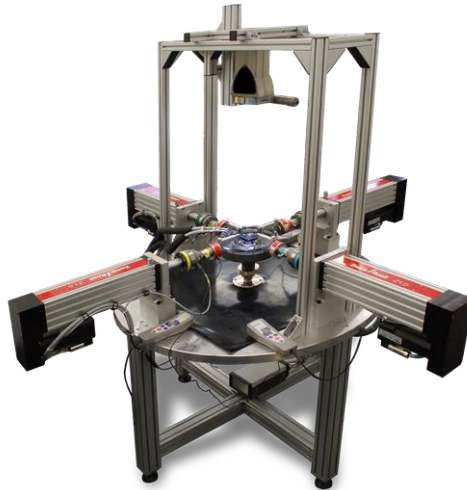
- ADMET Planar Biaxial Test Machine: máquina capaz de ejercer fuerzas de tensión y compresión en ambos ejes en el plano horizontal de manera independiente. Tiene una capacidad de carga de hasta 2 kN y permite realizar tanto ensayos estáticos como dinámicos. Además, debido a su diseño, es posible

sumergir la probeta en un fluido, aspecto beneficioso para el ensayo de ciertos materiales biológicos. Destaca por su compactidad y bajo nivel de ruido (Figura 1.9).



*Figura 1.9. Máquina biaxial ADMET (www.admet.com).*

- Zwick/Roell: está diseñada para realizar ensayos uniaxiales y biaxiales en láminas, elastómeros y materiales biológicos con una fuerza máxima de 2 kN (Figura 1.10). Consta de cuatro actuadores servomecánicos con una carrera máxima del pistón de 120 mm, alcanzando velocidades de hasta 7000 mm/min, lo que permite, además de realizar un ensayo estático, realizar ensayos cíclicos a una frecuencia máxima de 5 Hz. Esta frecuencia es alcanzable para desplazamientos pequeños del pistón, para desplazamientos mayores, la frecuencia alcanzada es de 1 Hz. Su coste aproximado es de 180.000 euros.



*Figura 1.10. Máquina biaxial Zwick/Roell ([www.zwick.com](http://www.zwick.com)).*

- MTS Planar Biaxial Test System: supera en robustez a las anteriores y permite aplicar cargas máximas de 500 kN por cada actuador. Además de cargas estáticas, es posible aplicar cargas cíclicas (Figura 1.11). Su precio estimado (depende de los rangos de carga y de la temperatura que soporta principalmente) es de aproximadamente 2,1 millones de euros.





*Figura 1.11. Máquina biaxial MTS (www.mts.com).*

#### **1.3.4 Máquinas biaxiales autónomas no comerciales**

En este apartado se presentan algunas de las máquinas biaxiales autónomas diseñadas hasta la actualidad, describiendo sus componentes, las diferencias entre ellas y sus principales ventajas. Dichas máquinas se exponen en mayor detalle ya que el diseño propuesto en este proyecto pertenece a este conjunto y además presentan diseños originales y específicos para cada aplicación.

El principal motivo por el que en numerosos estudios y ensayos biaxiales no se emplean máquinas comerciales es el elevado coste de éstas (0,18 - 2,1 millones de euros). Además, debido a la variedad de materiales y formas, en muchas ocasiones las máquinas comerciales no satisfacen las necesidades específicas de cada estudio, siendo los aspectos más relevantes el modo de agarre de las probetas y las dimensiones de éstas.

A modo de resumen, la Tabla 2 muestra las características fundamentales de cada diseño detallándose posteriormente cada uno.

	Características positivas	Características negativas	Aplicación
Makinde et al. 1992	- Fuerzas elevadas (250 kN).	- Escasa variedad de probetas ensayables.	Probetas cruciformes de espesor reducido.
Boehler et al. 1994	- Fuerzas elevadas (100 kN). - Facilidad de acceso y observación.	- Aparición de fuerzas que producen flexión en la probeta.	Probetas cruciformes.
Kuwabara et al. 1998	- Reducido coste gracias al mecanismo tipo pantógrafo.	- Empleo de galgas para medir la deformación.	Probetas de acero bajo en carbono.
Shimamoto et al. 2003	- Ensayos estáticos y dinámicos. - Mordazas intercambiables. - Ensayos a temperatura controlada.	- Empleo de galgas para medir la deformación.	Piezas de aluminio.
Gozzi et al. 2005	- Fuerzas elevadas.	- Movimiento no lineal de las mordazas.	Probetas de acero de alta resistencia.
Merklein et al. 2013	- Reducción del coste. - Fuerzas elevadas (50 kN).	- Combinaciones de cargas determinadas.	Probetas cruciformes.
Saha et al. 2015	- Compacidad.	- Actuadores manuales. - Sólo cargas de tracción.	Láminas de PDMS.
Xiao et al. 2016	- Ensayos a altas temperaturas (800°C). - Robustez y estabilidad. - Fuerzas elevadas (100 kN).	- Coste elevado. - Gran tamaño.	Probetas de aleaciones de Níquel.
Hailian Li et al. 2017	- Añade cargas de flexión. - Compacidad.	- Elevado coste debido a la gran cantidad de sensores empleados.	Probetas cruciformes.

Tabla 2. Comparación de máquinas biaxiales autónomas no comerciales

El primer diseño presentado (Makinde et al. 1992) consta de dos secciones principales: el sistema de carga y el sistema de control. Esta máquina está diseñada específicamente para ensayar probetas cruciformes de espesor reducido.

El sistema de carga está formado por cuatro actuadores hidráulicos lineales con una capacidad de aplicar cargas hasta 250 kN. Los actuadores se encuentran montados por pares en ambos ejes para garantizar que el centro de la muestra no se mueva durante el ensayo. Además, los actuadores opuestos se conectan a líneas comunes para garantizar que se ejerce la misma fuerza, y en sentido contrario, en cada uno de los ejes. Consta de cuatro mordazas que pueden ser bloqueadas previamente. Debido a los grandes esfuerzos a los que se somete la estructura, esta se encuentra sobre diseñada para reducir al máximo las desviaciones en el soporte (Figura 1.12).

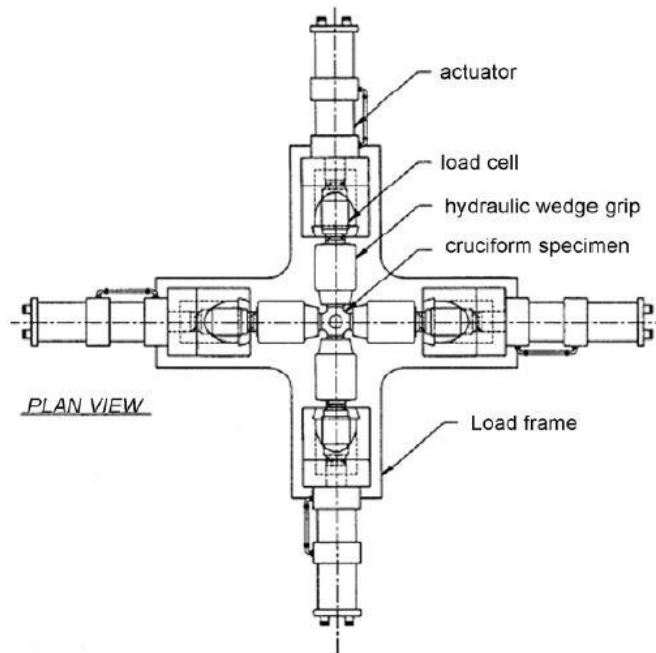


Figura 1.12. Máquina biaxial autónoma (Makinde et al. 1992).

El sistema de control posee principalmente dos células de carga (una en cada eje) para medir la fuerza durante el ensayo.

Posteriormente se diseña una máquina biaxial autónoma (Boehler et al. 1994) formada por cuatro pistones accionados por tornillos montados en un marco vertical octogonal. Cada tornillo acciona los dos pistones de un mismo eje, aplicando la misma fuerza, y de

sentido contrario, en cada eje y manteniendo fijo el centro de la probeta. El control de los tornillos se realiza mediante dos motores, uno de corriente continua, variable durante la aplicación de la carga, y otro de corriente alterna de alto desplazamiento para el posicionamiento previo. Además, cada motor incorpora un embrague para evitar que ambos funcionasen a la vez. Esta máquina permite variar la velocidad de aplicación de la carga entre 0,003 y 0,3 mm/min y aplicar una carga máxima de 100 kN en cada eje.

Las principales ventajas del montaje vertical son la facilidad de acceso a ambos lados de la máquina y de montaje de la probeta, y la buena observación mediante métodos de vídeo.

Como desventaja de este montaje destaca que se debe tener en cuenta el peso propio de las mordazas del eje horizontal para evitar que se produzca flexión en la probeta.

El principal objetivo de este diseño es ensayar probetas cruciformes en busca de un diseño óptimo de este tipo de probetas.

Años después se propone y construye un nuevo diseño (Kuwabara et al. 1998) con el objetivo de determinar experimentalmente el comportamiento elástico y plástico del acero bajo en carbono laminado en frío bajo tensión biaxial.

La máquina se constituye por cuatro cilindros hidráulicos, conectados dos a dos para producir la misma fuerza en cada uno de los ejes y mantener la probeta fija en el centro, aspecto que comparte con los diseños anteriormente presentados. Esto se logra mediante un mecanismo de enlace tipo pantógrafo que demuestra ser muy eficaz y reducir considerablemente el coste de la máquina (Figura 1.13).

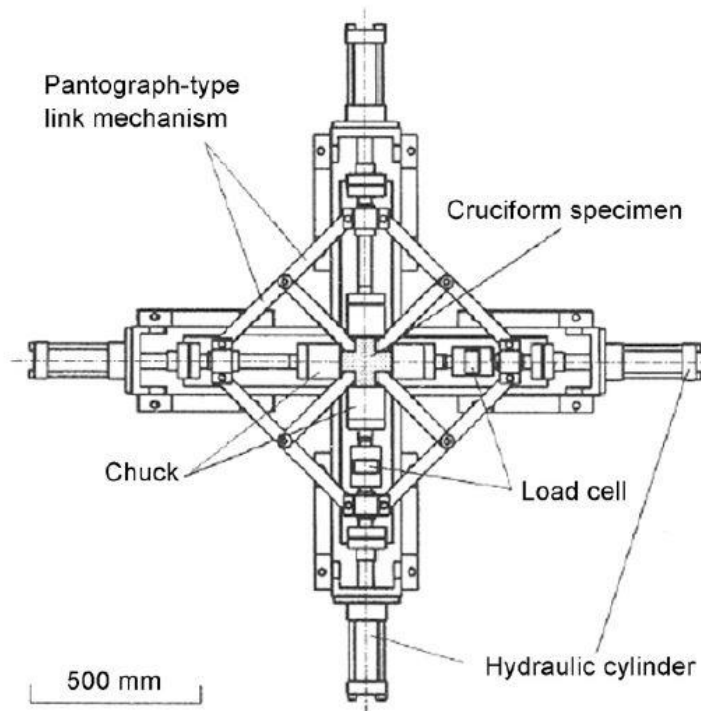


Figura 1.13. Máquina biaxial autónoma (Kuwabara et al. 1998).

Con el objetivo de medir la fuerza aplicada, se coloca una célula de carga en cada uno de los ejes. La deformación se mide mediante galgas adheridas a la muestra. La información proporcionada tanto por las células de carga como por las galgas es procesada posteriormente usando una placa de adquisición de datos en PC.

Ya en el siglo XXI, se diseña una máquina biaxial autónoma (Shimamoto et al. 2003) con capacidad para realizar ensayos dinámicos y estáticos a temperaturas controladas. Se emplean actuadores hidráulicos, que permiten generar presión para los ensayos estáticos y acumular presión y liberarla instantáneamente para los ensayos dinámicos. La carga aplicada se mide mediante células de carga y la deformación mediante galgas adheridas a la muestra.

Esta máquina supone un gran avance respecto a las anteriores ya que posee características que superan las limitaciones de estas.

- La máquina consta de cuatro actuadores orientados a 90 grados entre sí. Estos actuadores funcionan de manera independiente manteniendo el punto central de la muestra fijo.

- Es posible realizar ensayos con cargas biaxiales desiguales, ensayos biaxiales estáticos y dinámicos bajo esfuerzo combinado, ensayos de cizallamiento biaxial dinámico y otras combinaciones de carga.
- Incorpora mordazas intercambiables dependiendo del tipo de ensayo que se desee realizar, estático o dinámico, uniaxial o biaxial.

Además, está equipada con un sistema de refrigeración mediante argón líquido y un sistema de calefacción eléctrica que permite realizar ensayos a diferentes temperaturas.

Se han probado piezas de aluminio a velocidades de 0,02 mm/s y se ha comprobado que la relación tensión-deformación es proporcional para el ensayo biaxial hasta  $\epsilon = 1,7\%$  (Figura 1.14).

También se ha empleado esta máquina para ensayos dinámicos con el objetivo de estudiar el comportamiento de grietas en su crecimiento.

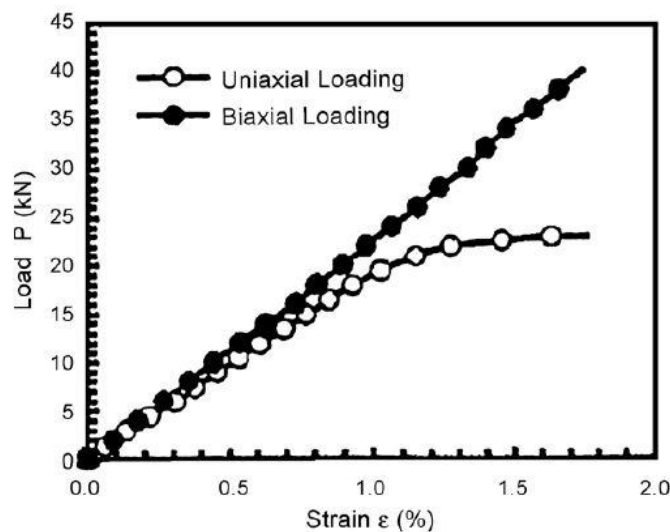


Figura 1.14. Relación tensión - deformación en cargas biaxiales y uniaxiales (Shimamoto et al. 2003).

Posteriormente se desarrolla una máquina (Gozzi et al. 2005) para estudiar el comportamiento del acero de alta resistencia bajo cargas biaxiales. Consta de dos actuadores independientes montados perpendicularmente y cuatro brazos articulados. El inconveniente principal de los brazos articulados es que los agarres se mueven

describiendo un arco circular y no de manera lineal. Los ensayos se realizan a una carga constante de 2,7 MPa/s. Los resultados obtenidos muestran que, en los primeros instantes, para tensiones inferiores a 1400 MPa, las tensiones del ensayo biaxial coinciden con las del uniaxial (Figura 1.15).

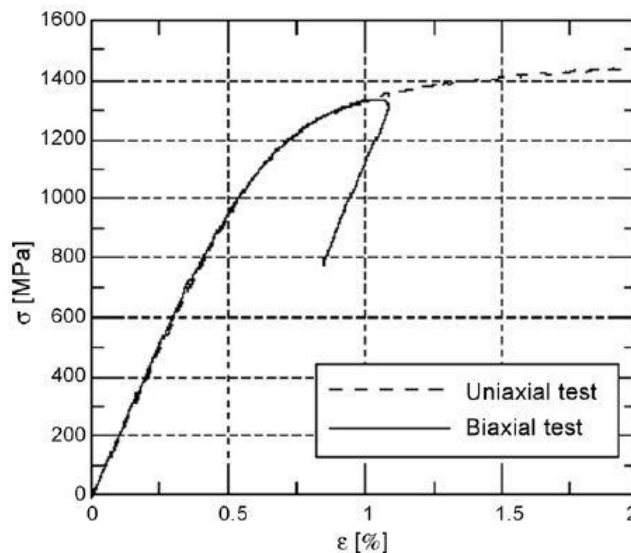


Figura 1.15. Comparación entre el ensayo biaxial y el ensayo uniaxial (Gozzi et al. 2005).

Con el objetivo de reducir el coste de este tipo de máquinas, surge un diseño (Merklein et al. 2013) que combina la idea de los mecanismos accesorios, superando las limitaciones que estos tienen, para dar lugar a un nuevo concepto de máquina biaxial autónoma.

La máquina se ha desarrollado dentro del marco de las máquinas biaxiales autónomas con sistema de carga fuera del plano. El concepto se basa en la idea de evitar el control de los ejes de carga, lo que supone un ahorro económico importante con respecto a las máquinas servocontroladas (Geiger et al. 2005).

En las Figura 1.16 y Figura 1.17 se muestran las partes principales de este novedoso diseño. La máquina es soportada por una placa cuadrada de acero (1). Una placa base de acero (2), suspendida por cuatro barras redondas de acero macizo de 60 mm de diámetro (3), sostiene un motor de CC (4) que está conectado a un tornillo sin fin (5). El tornillo

de elevación (6) puede moverse verticalmente con relación a la placa base, subiendo y bajando el subconjunto móvil (gris). Este subconjunto está formado por una placa de acero superior (7) e inferior (8) conectadas entre sí en las esquinas y en el centro por cuatro barras redondas de acero de 30 mm de diámetro (9) y una hueca (10), respectivamente. Dicha barra central hueca, junto con un orificio mecanizado en la placa superior, permite que la probeta (11) pueda estar expuesta a una fuente de calor por haz de laser por la parte inferior. La muestra se agarra de manera simétrica en cada extremo por medio de un dispositivo de sujeción (12) guiado por un sistema de cojinete lineal (13) montado en la placa superior. Para cada eje (x, y), se conecta una mordaza a través de una barra de tracción (14), y la opuesta a través de una célula de carga de 50 kN (15), a unos rodillos (16). Los rodillos se conectan mediante una barra de tracción (17) al dispositivo de ajuste de ángulo (18).

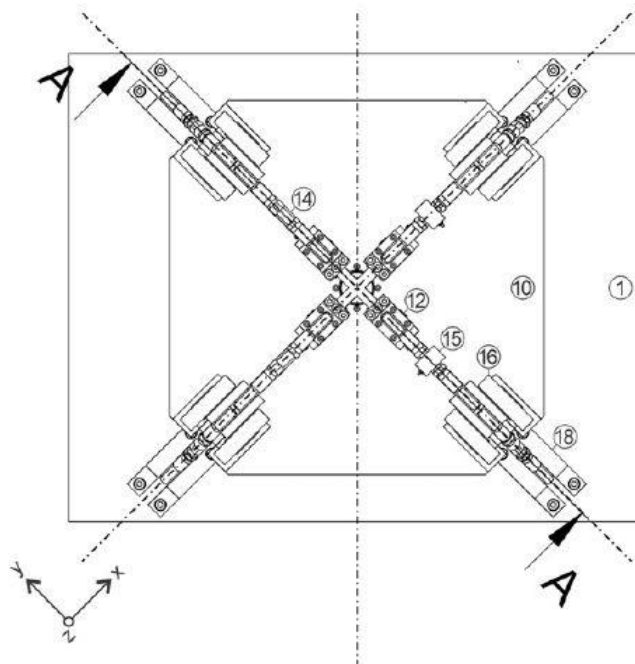


Figura 1.16. Máquina biaxial autónoma (Merklein et al. 2013). Vista superior.



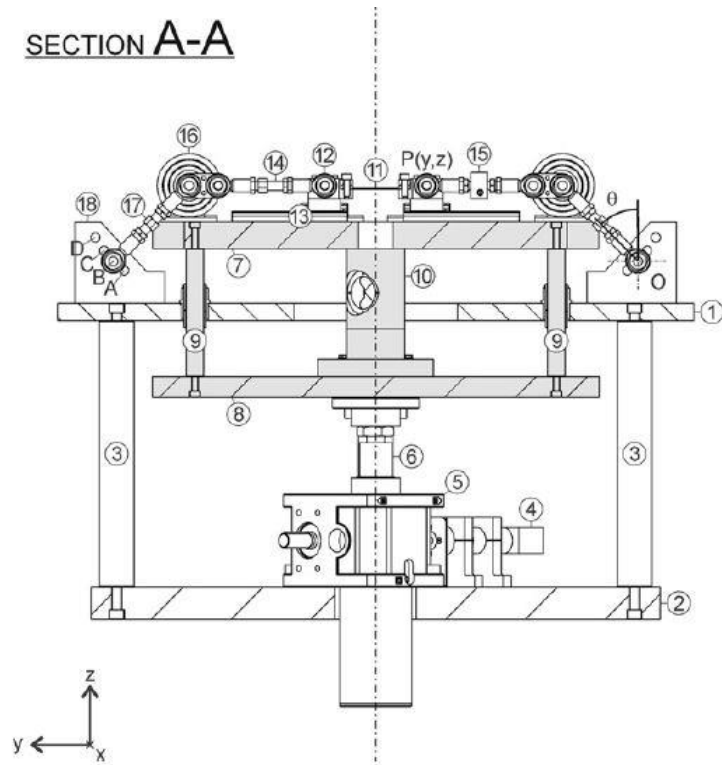


Figura 1.17. Máquina biaxial autónoma (Merklein et al. 2013). Vista frontal.

Como resultado de esta configuración, el tornillo convierte el giro del motor de CC en un desplazamiento lineal y vertical de la placa de acero superior, describiéndose la cinemática de cada una de las mordazas por la relación:

$$\frac{P_y}{P_z} = \tan \vartheta \quad (1)$$

donde la longitud de las barras de tracción (14) y (17) es la misma,  $P_y$  es la posición horizontal de la mordaza,  $P_z$  es la posición vertical de la mordaza y  $\vartheta$  es el ángulo actual. Por lo tanto, el desplazamiento horizontal de cada mordaza se puede determinar resolviendo la ecuación (1) dada la posición vertical actual  $P_z$  de la placa superior. El ángulo puede ser ajustado entre  $29^\circ$  y  $52^\circ$ , en intervalos de  $8^\circ$ , fijando la barra (17) en la posición A, B, C y D. Fijando ángulos diferentes en cada uno de los ejes horizontales (x, y), se consiguen diferentes desplazamientos  $P_x$  y  $P_y$  y, por lo tanto, esfuerzos diferentes en cada dirección.

El siguiente diseño (Saha et al. 2015) es uno de los más compactos hasta la fecha. La máquina permite realizar y visualizar la formación de pliegues en láminas de PDMS mediante el estiramiento biaxial. El sistema completo, que cuenta además con una cámara para registrar todo el proceso a tiempo real, se muestra en la Figura 1.18.

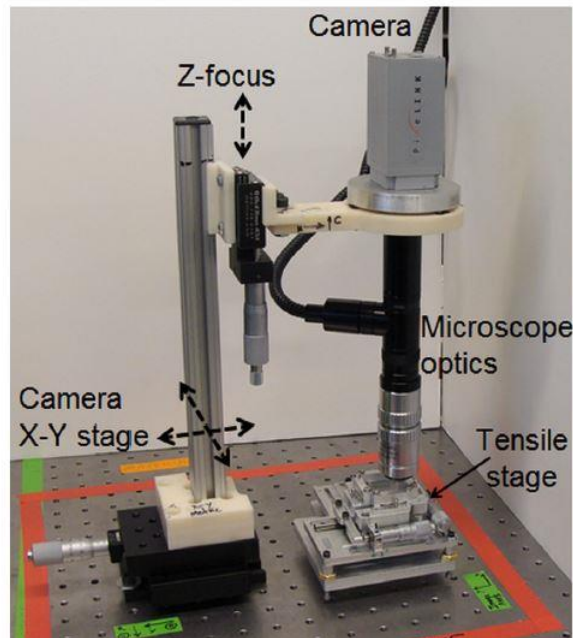


Figura 1.18. Sistema completo (Saha et al. 2015).

El reducido tamaño de la máquina biaxial se logra mediante la eliminación de los elementos de guía no esenciales. Como actuador se usan cabezas micrométricas accionadas manualmente que presionan directamente sobre las plataformas móviles durante el ensayo, reduciéndose así su tamaño.

La máquina consta de los siguientes módulos:

- Mecanismos de sujeción para fijar los extremos de las láminas de PDMS. Las mordazas están compuestas por dos partes que se unen mediante tornillos, la inferior se monta sobre la guía móvil, mientras que la superior comprime la probeta. El hueco entre las dos partes de la mordaza debe ser suficiente para permitir un correcto agarre de la muestra (Figura 1.19).

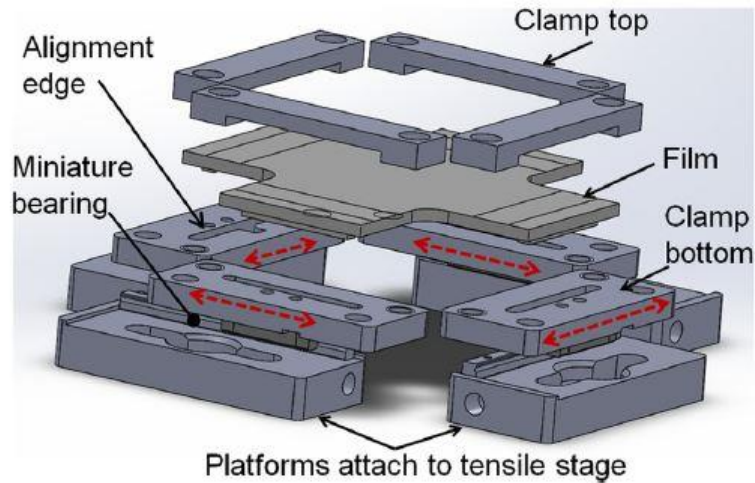


Figura 1.19. Sistema de sujeción (Saha et al. 2015).

- Cojinetes lineales para guiar el movimiento. Permiten el movimiento de las plataformas que sostienen las mordazas. Una plataforma de cada eje es móvil, mientras que la otra, donde se colocan las cabezas micrométricas, se mantiene fija. Sobre estas plataformas actúan directamente las cabezas micrométricas, pudiendo actuar de manera independiente, lo que permite realizar estiramientos uniaxiales y biaxiales con combinaciones de cargas variables. La principal restricción de este diseño recae en este módulo y es la incapacidad de realizar compresiones, ya que la cabeza micrométrica actúa únicamente separando la plataforma móvil (Figura 1.20).
- El marco estructural que soporta todos los elementos y confiere rigidez y estabilidad a la máquina.

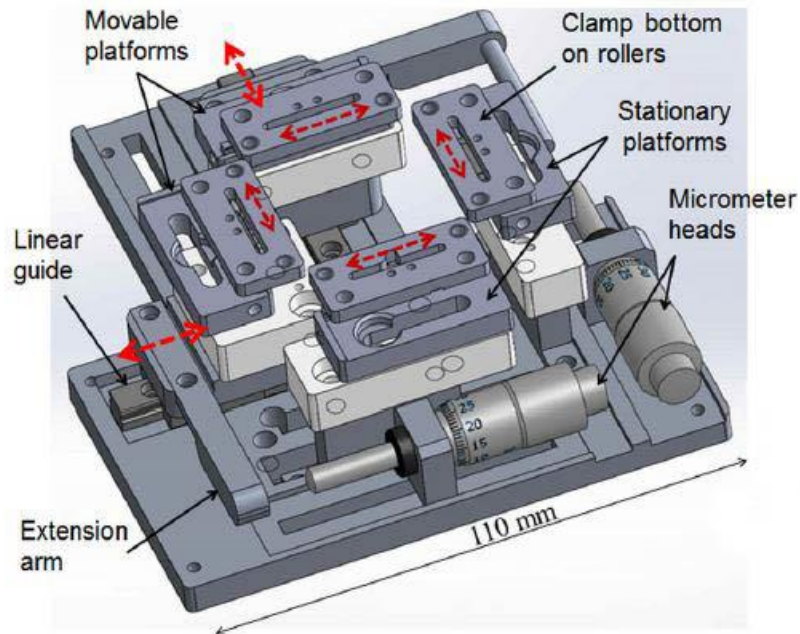


Figura 1.20. Máquina biaxial autónoma (Saha et al. 2015).

Un año después se diseña y fabrica una máquina biaxial de unas dimensiones considerablemente superiores (Xiao et al. 2016) con el objetivo de ensayar probetas de aleaciones de níquel a altas temperaturas para su empleo en la industria aeronáutica (Figura 1.21). Para medir las deformaciones se emplea la técnica de videocorrelación.



Figura 1.21. Máquina biaxial autónoma (Xiao et al. 2016).

La máquina está formada por cuatro servocilindros hidráulicos capaces, cada uno, de aplicar cargas de hasta 100 kN. El máximo desplazamiento de cada cilindro es de 100 mm, pudiéndose desplazar a una velocidad máxima de 100 mm/min. Al poder actuar cada cilindro de manera independiente, los ensayos posibles a realizar son tracción y compresión uniaxial y tracción y compresión biaxial con cualquier combinación de cargas (Figura 1.22).

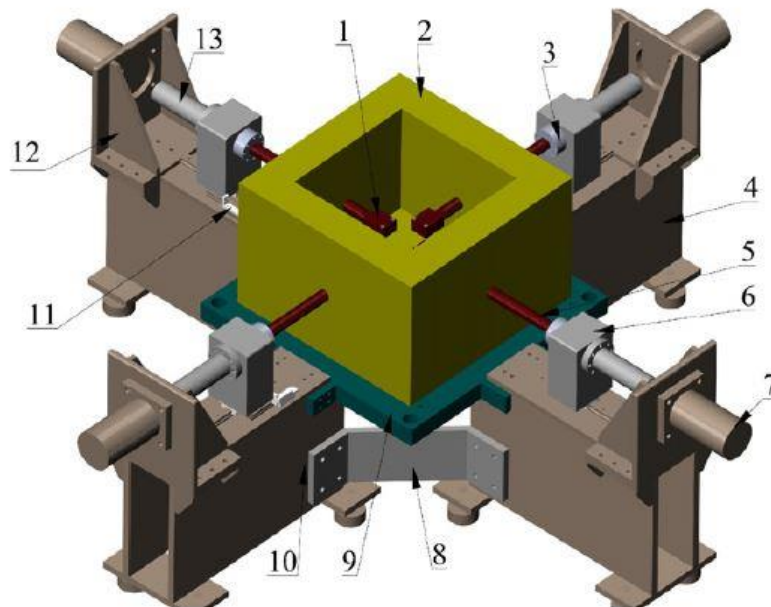


Figura 1.22. Esquema de máquina biaxial autónoma (Xiao et al. 2016). (1) Mordazas, (2) Horno, (3) Sensor de fuerza, (4) Paneles laterales, (5) Barra de tracción, (6) Bloque de enlace, (7) Cilindro hidráulico, (8) Refuerzo, (9) Mesa de trabajo, (10) Base, (11) Rail guía, (12) Placa de soporte, (13) Eje de conexión.

Además, en la parte central se sitúa el horno, en el cual se ensaya la muestra, y que puede llegar a proporcionar temperaturas superiores a los 800°C.

El sistema de sujeción de la muestra se compone de una mordaza en forma de U con una abertura central donde se colocan dos piezas que son las encargadas de comprimir la probeta mediante unos tornillos de apriete (Figura 1.23).

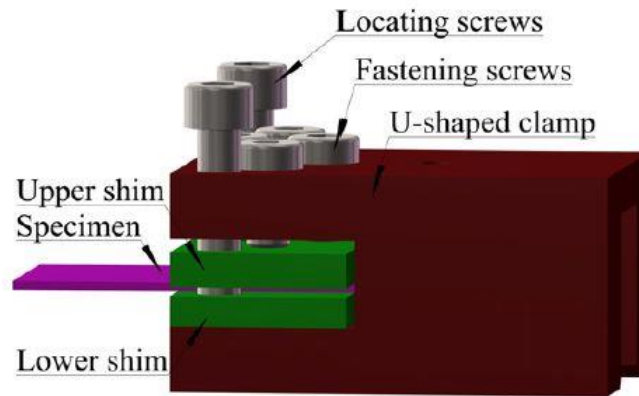


Figura 1.23. Mordaza (Xiao et al. 2016).

Un diseño más reciente (Hailian Li et al. 2017) permite realizar ensayos cuasiestáticos de carga uniaxial pura, flexión en voladizo, carga biaxial, carga uniaxial con flexión combinada y carga biaxial con flexión combinada.

El aparato consta de tres componentes principales:

- La **unidad de servoaccionamiento** formada por la unidad de tracción y la unidad de flexión. La base extensible es impulsada por un tornillo para producir el efecto de tracción y compresión en los ejes X e Y. El sistema es idéntico en la dirección vertical Z, produciendo la flexión. Además, consta de un motor de corriente continua de baja velocidad, gran par y alta precisión y de un reductor compuesto por un engranaje sin fin de dos etapas 30:1 de manera que la tasa de desaceleración es de 900, aplicando la carga de manera cuasiestática.
- La **unidad de sujeción** se compone de una base deslizante, una bisagra, una abrazadera, una pieza de bloqueo y un tornillo de compresión (Figura 1.24). La abrazadera se articula a la base deslizante mediante la bisagra, girando en el proceso de flexión (Figura 1.25). Se usa un tornillo de compresión para sujetar la pieza de bloqueo y la abrazadera.

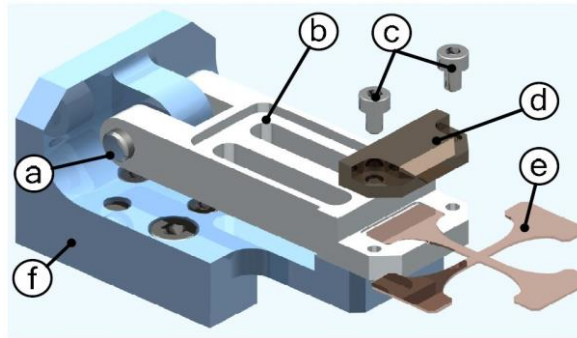


Figura 1.24. Componentes de mordaza (Hailian Li et al. 2017). (a) Bisagra; (b) Abrazadera; (c) Tornillos de compresión; (d) Pieza de bloque; (e) Probeta; (f) Base deslizante.

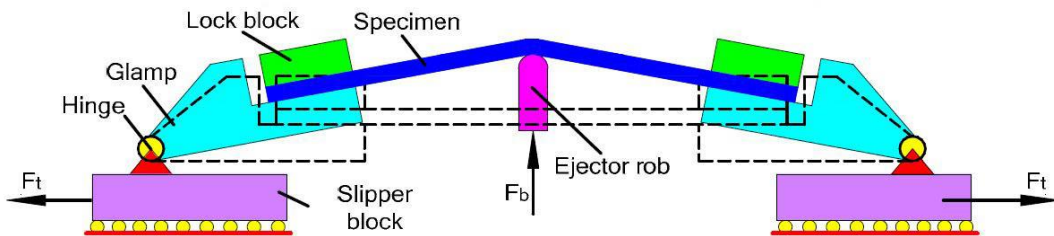


Figura 1.25. Esquema de mordazas (Hailian Li et al. 2017).

- El **sistema de prueba** se basa en el sistema de observación SEM (microscopía electrónica de barrido) y en sistema de control STM32. Se compone además de un sensor de desplazamiento lineal (PM11-R1-10L) con una precisión de 0,001 mm y una repetibilidad del 0,01%, un sensor de fuerza en forma de S (JLBS-V) capaz de medir tanto tracción como compresión en los ejes X e Y y un sensor de fuerza (SM609-A) en el eje Z.

Además, el aparato se compone de una base que da soporte a todo el conjunto (Figura 1.26). Permite ensayar probetas cruciformes de  $40 \times 40 \times 0,5$  mm. Esta máquina destaca por su estructura compacta, su reducido tamaño ( $240 \times 240 \times 140$  mm), su capacidad para aplicar carga en 3 direcciones y su compatibilidad con la observación SEM. Al aplicar la carga de manera cuasiestática ( $2,4 \mu\text{m/s}$ ), se resuelve el problema de enfoque del dispositivo de observación que se produce cuando, durante la flexión, la distancia

entre la probeta y el objetivo varía. Por lo tanto, es posible observar la deformación interna de la probeta dinámicamente en tiempo real (Zhang et al. 2010).

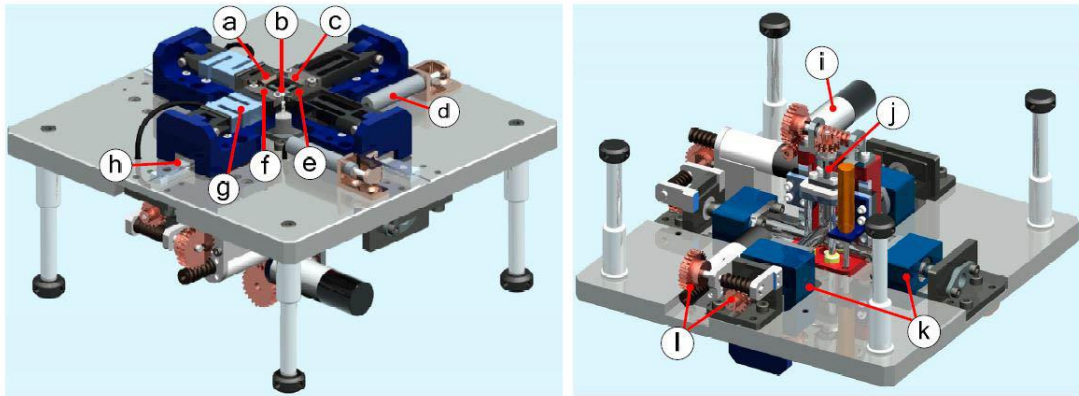


Figura 1.26. Máquina biaxial autónoma (Hailian Li et al. 2017). (a), (c), (e), (f) Mordazas; (b) Probeta; (d) Sensor de desplazamiento; (g) Sensor de fuerza; (h) Rail guía; (i) Motor; (j) Tornillo de flexión; (k) Tornillos de tracción-compresión; (l) Reductor.

### 1.3.5 Mecanismos accesorios para ensayos biaxiales

En un intento por reducir el coste asociado a la construcción de máquinas biaxiales autónomas, se han diseñado mecanismos accesorios para máquinas existentes, como la máquina de tracción y compresión, con el fin de realizar ensayos biaxiales. La configuración de ensayo biaxial más común es la conversión de una máquina de tracción estándar.

Esto se logra típicamente agregando un actuador adicional al sistema, como la adición de un pistón hidráulico horizontal a una máquina de ensayo de tracción vertical. La máquina de tracción se utiliza para aplicar la carga vertical y este accesorio extraíble se puede usar para aplicar la carga horizontal.

Unos de los primeros métodos de conversión de máquinas uniaxiales en biaxiales (Ferron and Makinde 1988) consiste en utilizar una estructura formada por ocho enlaces (Figura 1.27) mediante los cuales se convierte el movimiento de tracción o compresión uniaxial producido por una máquina estándar de tracción en un movimiento biaxial de desplazamiento igual en ambas direcciones.



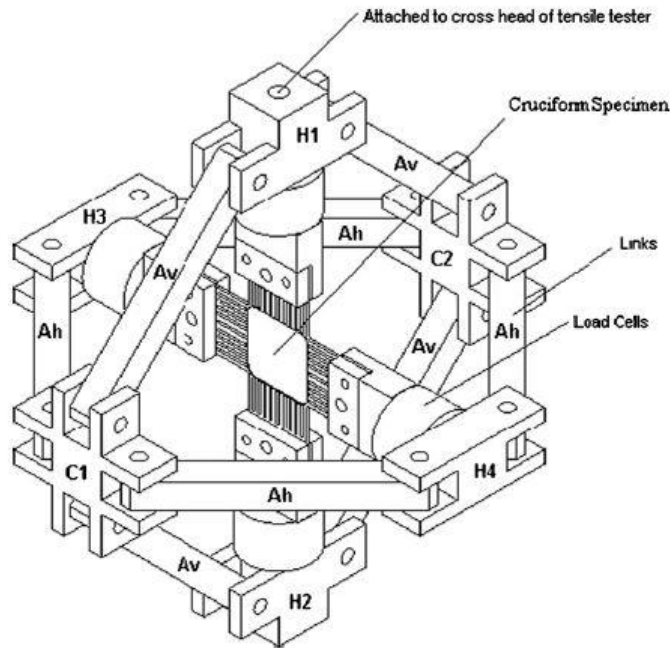


Figura 1.27. Mecanismo accesorio para ensayos biaxiales (Ferron and Makinde 1988).

Las posibilidades que ofrece este diseño son variadas:

- Tracción en el eje vertical y compresión en el eje horizontal. Se consigue conectando las cabezas H1 y H2 a la máquina y aplicando tracción vertical. De este modo las cabezas H1 y H2 se separan mientras que H3 y H4 se aproximan.
- Compresión en el eje vertical y tracción en el eje horizontal. Conectando las cabezas H1 y H2 a la máquina de manera similar al montaje anterior y aplicando compresión vertical. Las cabezas H1 y H2 se aproximan mientras que H3 y H4 se separan.
- Tracción biaxial. Es necesario girar el mecanismo 90 grados, de manera que la compresión vertical se aplique sobre las cabezas C1 y C2. Así se consigue que las cabezas H1 y H2 se separen una distancia igual a las H3 y H4, produciéndose tracción biaxial.

Las células de carga se encuentran colocadas en las cabezas H1 y H4.

Otro ejemplo de este tipo de mecanismos (Hoferlin et al. 2000) consiste en emplear una máquina estándar de tracción con un actuador hidráulico extraíble. Cuenta con células de carga tanto en la dirección vertical como en la horizontal y un accesorio de alineación montado sobre cojinetes para garantizar que la estructura horizontal siempre se mantiene en el centro de la muestra.

Posteriormente, se diseña y construye un mecanismo accesorio (Fraunhofer 2005) utilizando una máquina de compresión y una serie de enlaces (Figura 1.28).



*Figura 1.28. Mecanismo accesorio para ensayos biaxiales (Fraunhofer 2005).*

El sistema funciona aplicando compresión sobre la cruz central superior y convirtiendo dicha compresión vertical y tracción horizontal en dos direcciones. En cada dirección se monta una célula de carga para medir la fuerza, midiéndose la deformación mediante una cámara. La principal restricción de este diseño es que solo permite realizar ensayos de tracción biaxial con la misma carga aplicada en cada eje.

Más recientemente, se ha realizado un estudio de los diseños existentes en la literatura, analizando sus puntos fuertes y sus debilidades, y se ha propuesto un nuevo diseño de mecanismo accesorio (Puente Medellín et al. 2016).

Los objetivos que se desean conseguir con este diseño son los siguientes:

- Uso del menor número de piezas posible.
- Fácil montaje de la muestra en el accesorio.
- Fácil acceso a la muestra para medir deformaciones durante el ensayo.

El mecanismo se compone de cuatro brazos, el superior se mantiene fijo mientras que los tres restantes son móviles. El brazo inferior puede realizar un movimiento vertical guiado por una barra y los brazos horizontales describen un movimiento lineal siguiendo una guía oblicua. Además, consta de una estructura y un trapecio que se encarga de convertir el movimiento vertical de la máquina de tracción en un movimiento horizontal de los brazos laterales (Figura 1.29).

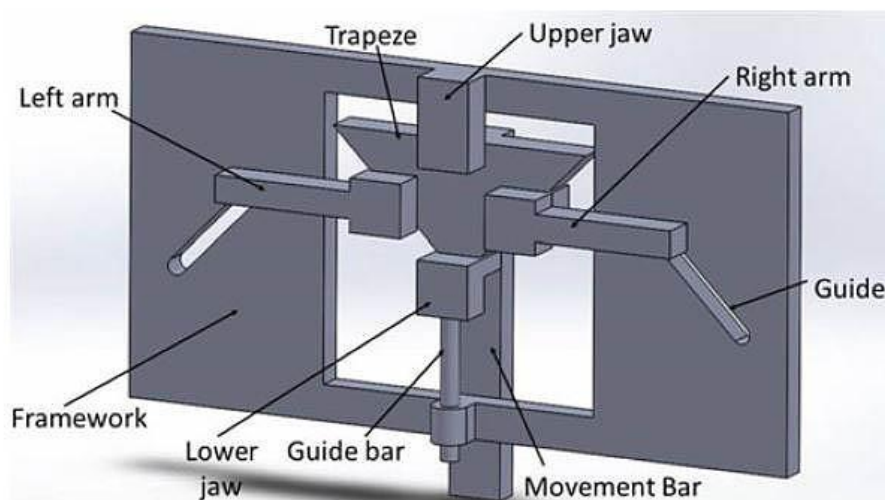
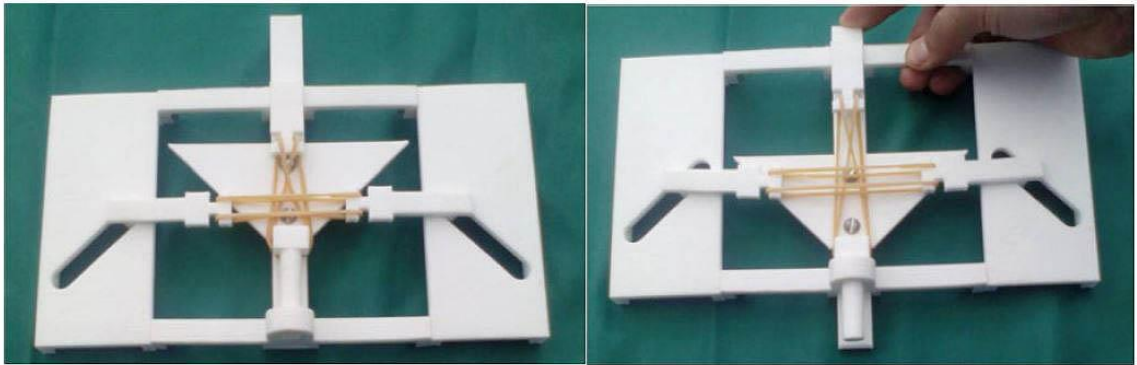


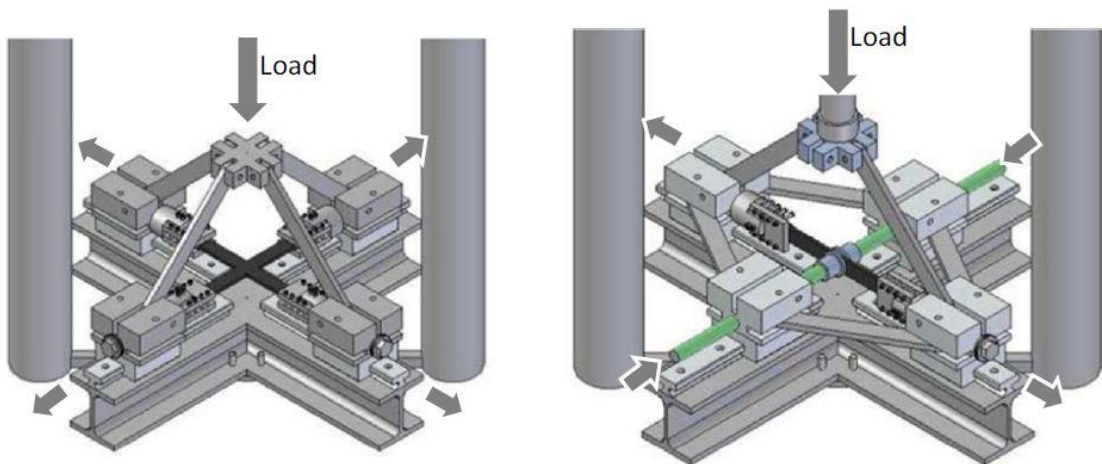
Figura 1.29. Mecanismo accesorio para ensayos biaxiales (Puente Medellín et al. 2016).

Como aspecto negativo de este diseño, destaca la incapacidad de realizar ensayos de compresión, limitándose el mecanismo a aplicar cargas de tracción biaxial (Figura 1.30).



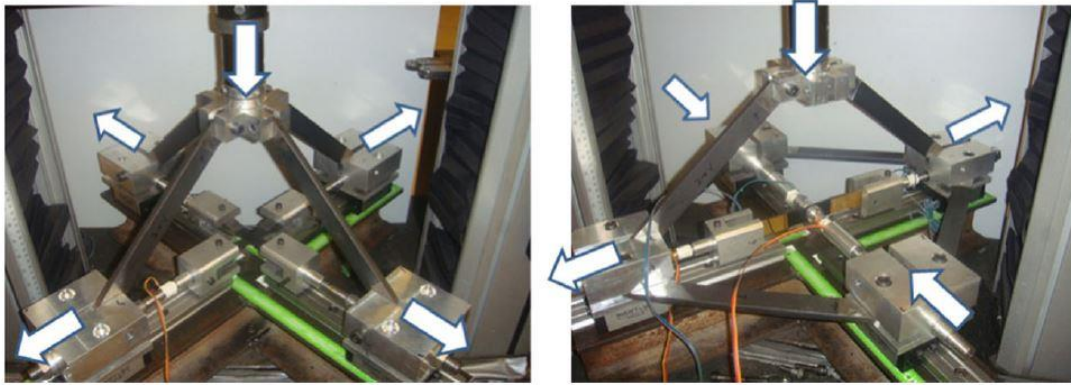
*Figura 1.30. Funcionamiento de mecanismo accesorio para ensayos biaxiales (Puente Medellín et al. 2016)*

El mecanismo más actual (Barroso et al. 2018), destaca por su versatilidad ya que permite realizar ensayos de tracción-tracción, compresión-compresión y tracción-compresión con diferentes combinaciones de cargas, con unas simples modificaciones de la longitud y ángulo de los brazos (Figura 1.31).



*Figura 1.31. Esquema de mecanismo accesorio para ensayos biaxiales (Barroso et al. 2018)*

El dispositivo cuenta con cuatro guías lineales que tienen capacidad para soportar una carga vertical de hasta 14 kN cada una, pudiéndose aplicar una carga máxima de 56 kN con la máquina de ensayo uniaxial. La unión entre los brazos y los carros móviles se han diseñado de manera que se minimice el momento de flexión perpendicular al eje del carro (Figura 1.32).



*Figura 1.32. Mecanismo accesorio para ensayos biaxiales (Barroso et al. 2018).*



## 2 DISEÑO

### 2.1. Introducción

En este capítulo tiene lugar el diseño de todos los componentes que forman la máquina biaxial, desde los sistemas de agarre hasta la estructura, pasando por el sistema de accionamiento. No sólo se muestra el diseño final, sino que se plantea su evolución y los motivos de dichas variaciones. El diseño se ha realizado con la ayuda del software CATIA V5®. Finalmente se presenta el sensor de fuerza comercial seleccionado, así como sus principales características, dimensiones y rango medible de fuerza.

La Figura 2.1 muestra el montaje completo de la máquina donde se diferencian los componentes que se detallan en los apartados posteriores. La Tabla 3 presenta las diferentes piezas, su material de fabricación y el número de piezas necesarias para el montaje.

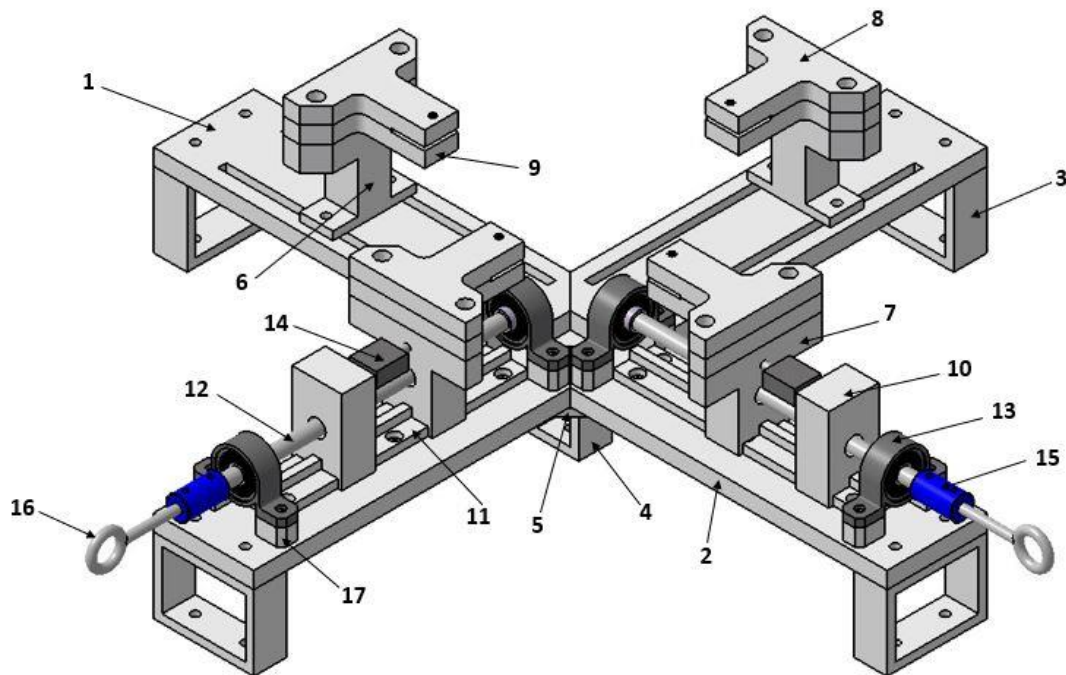


Figura 2.1. Montaje completo.

	Pieza	Material	Nº de Piezas
1	Estructura base fija	PLA	2
2	Estructura base móvil	PLA	2
3	Apoyo	PLA	4
4	Apoyo central	PLA	1
5	Placa de unión	PLA	1
6	Base mordaza fija	PLA	2
7	Base mordaza móvil	PLA	2
8	Mordaza superior	PLA	4
9	Mordaza inferior	PLA	4
10	Accionador	PLA	2
11	Rail	PLA	2
12	Husillo trapezoidal	Acero inoxidable	2
13	Cojinete con rodamiento	Aleación de zinc	4
14	Sensor de fuerza	Acero inoxidable	2
15	Acoplador	Aluminio	2
16	Anilla de accionamiento	Acero inoxidable	2
17	Soporte cojinete	PLA	8

*Tabla 3. Lista de piezas.*

## 2.2. Mordazas

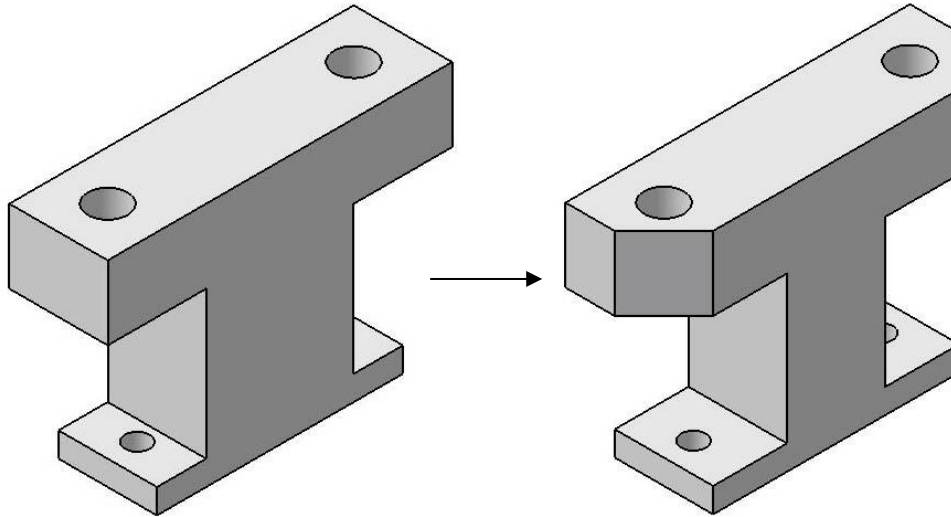
La máquina cuenta con cuatro mordazas, dos en cada eje, cuya función es agarrar correctamente la probeta de manera que la fuerza aplicada se transmita directamente a esta.

En el actual diseño, cada probeta se compone de tres elementos o partes. En primer lugar, una base común cuyo diseño varía según la mordaza sea fija o móvil, y dos piezas, una inferior y otra superior, que sujetan la probeta y son las que se encuentran en contacto directo con ella. Estas partes inferior y superior son intercambiables, de forma que, cambiando de manera rápida y sencilla estas piezas, es posible ensayar diferentes morfologías de probetas.

La Figura 2.2 muestra la evolución de la base de la mordaza fija en la cual se observan principalmente dos cambios desde la concepción inicial hasta el diseño final, la reducción de espesor de la parte central y el recorte de las esquinas superiores. Un espesor menor en la parte central, además de suponer un ahorro en material, facilita la fijación mediante tornillos a la estructura. El recorte de las esquinas superiores permite

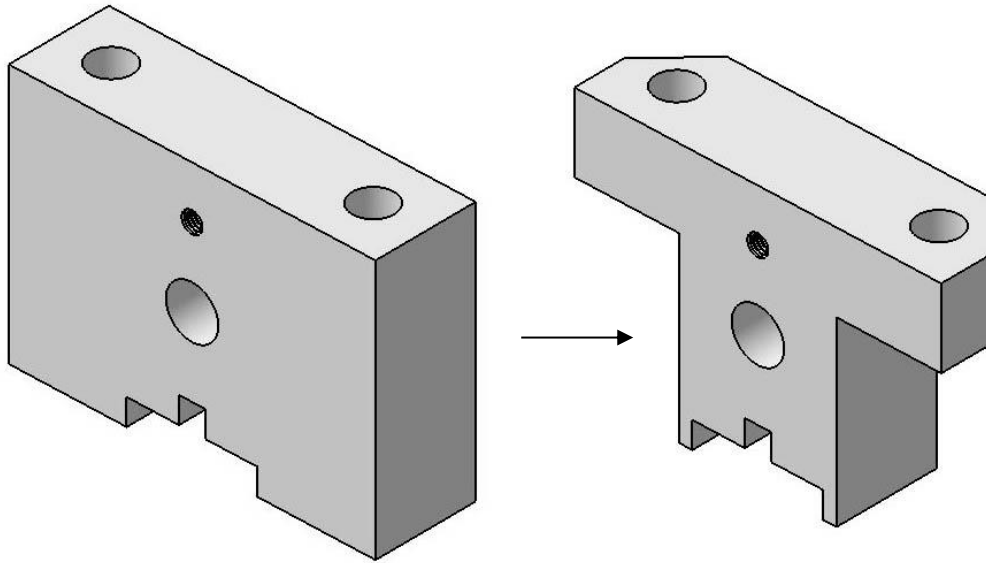


ensayar probetas de tamaños reducidos ya que es posible un mayor acercamiento de las mordazas entre sí. La cara superior sirve de apoyo para las partes intercambiables, que se unen a la base mediante dos tornillos.



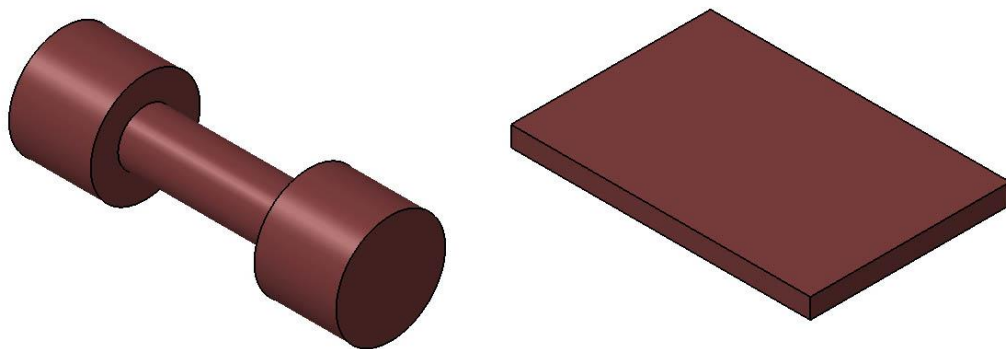
*Figura 2.2. Base de la mordaza fija (evolución).*

Por su parte, la evolución en el diseño de la base de la mordaza móvil se presenta en la Figura 2.3 donde se aprecia principalmente una gran reducción en la cantidad de material innecesario debido a la elevada fricción de la pieza con la estructura al estar una mayor cantidad de ella en contacto, además de los recortes en las esquinas superiores por el mismo motivo que en la base de la mordaza fija. La forma de la parte inferior permite que la pieza deslice sobre el rail, desplazándose linealmente. El orificio central tiene como objetivo el paso del tornillo sin fin que sirve como accionamiento del sistema móvil. Además, se observa una rosca interna superior cuya función es atornillar una de las varillas roscadas que conecta la mordaza con el sensor de fuerza. En los apartados 2.3 y 2.4 se amplía la información acerca del sistema móvil y del sensor de fuerza.



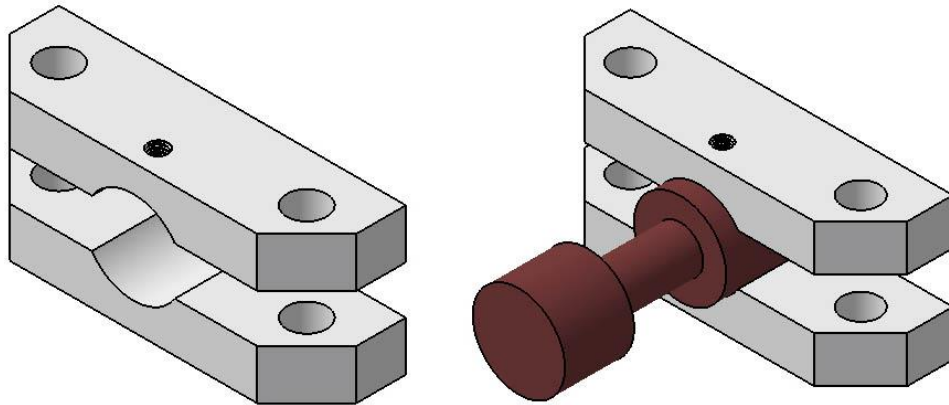
*Figura 2.3. Base de la mordaza móvil (evolución).*

En el diseño de las partes de la mordaza que están en contacto directo con la probeta se ha tenido en consideración, en primer lugar, las probetas a ensayar. Los tipos de probetas que pueden ser ensayados en la máquina son principalmente dos, probetas cilíndricas (muy empleadas en el ensayo de huesos y creadas a partir del hueso y de un recubrimiento de resina) y probetas rectangulares o cruciformes con espesores comprendidos entre los 2 mm y los 20 mm (Figura 2.4).



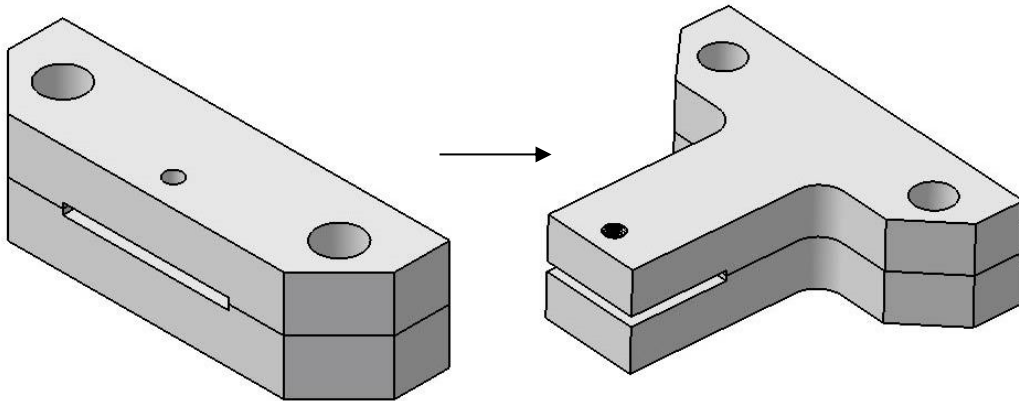
*Figura 2.4. Probetas.*

Por lo tanto, se han diseñado dos juegos de mordazas diferentes, una para cada tipo de probeta. En la Figura 2.5 se presenta la mordaza cilíndrica, formada por una parte inferior en contacto con la base anteriormente comentada, y una parte superior en la que se incluye un orificio roscado con el objetivo de agarrar la probeta con mayor garantía. Ambas partes se unen mediante dos tornillos a la base de la mordaza. El diámetro máximo permitido de las probetas en estas mordazas es de 20 mm, siendo posible ensayar probetas de diámetro menor reduciendo la distancia entre ellas mediante los tornillos.



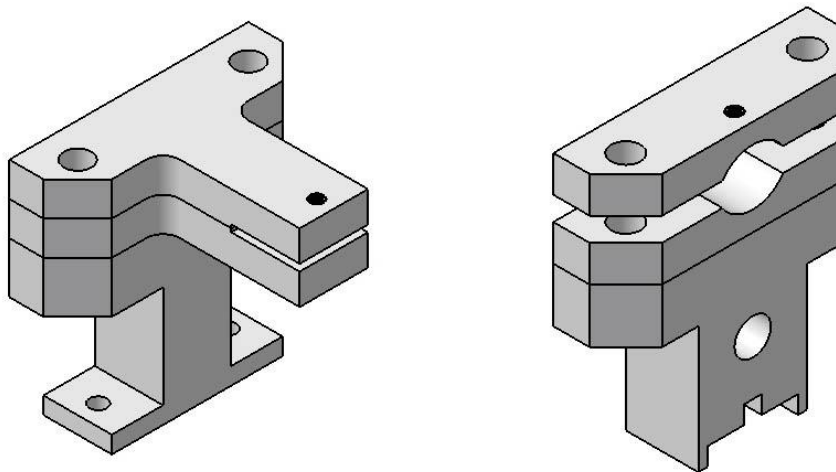
*Figura 2.5. Mordaza para probetas cilíndricas.*

Para el agarre de las probetas denominadas planas, ya sean rectangulares o cruciformes, en primer lugar, se diseñaron unas mordazas que contaban con dos inconvenientes importantes, la incapacidad de ensayar probetas rectangulares debido a su diseño, y la limitación de tamaño mínimo de las probetas. Posteriormente el diseño se ha mejorado, permitiendo ensayar tanto probetas cruciformes como rectangulares de una amplia gama de tamaños (cualquier tamaño mínimo y tamaño máximo determinado por la carrera del sistema móvil). Análogamente a las probetas anteriores, cuentan con una rosca para garantizar el agarre de la probeta, y con dos taladros para realizar la unión con la base (Figura 2.6).



*Figura 2.6. Mordaza para probetas rectangulares y cruciformes (evolución).*

Finalmente, y a modo de resumen, en la Figura 2.7 se muestra el montaje completo de las mordazas, una mordaza fija con agarres para probetas planas y una mordaza móvil con agarres para probetas cilíndricas.



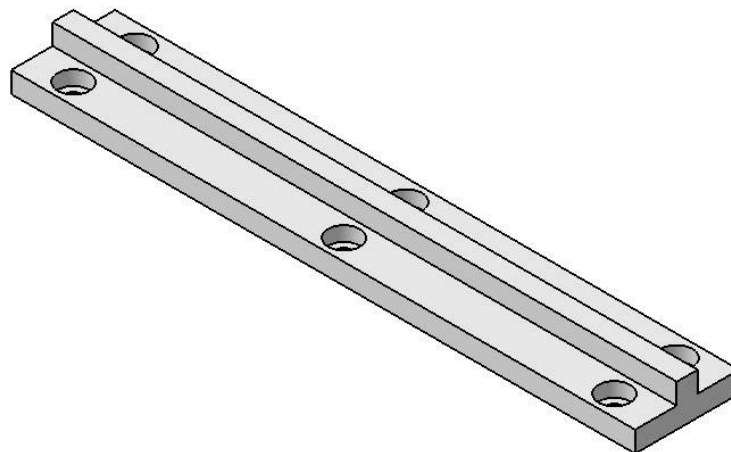
*Figura 2.7. Conjuntos de mordazas.*

### 2.3. Sistema móvil

La máquina cuenta con dos conjuntos móviles, gracias a los cuales, es posible aplicar fuerza sobre la probeta. A diferencia de algunos de los diseños existentes en la literatura (Capítulo 1), este consta de una mordaza fija y una móvil en cada uno de los dos ejes.

El sistema móvil se compone de un rail que sirve de guía lineal para el movimiento del conjunto, un tornillo sin fin trapezoidal con su tuerca, que convierte el movimiento giratorio en movimiento lineal, dos cojinetes con rodamientos que sujetan el tornillo a la estructura y permiten que gire libremente, y finalmente una pieza en la que se integra la tuerca y desempeña la función de “accionador”.

Se ha diseñado un rail recto en forma de “T” de 150 mm de largo, el cual se fija a la estructura mediante seis tornillos (Figura 2.8). Su objetivo es servir de guía al conjunto móvil y garantizar que el movimiento es lineal y por tanto no se producen esfuerzos de flexión indeseables en la probeta. Se ha estudiado la posibilidad de realizar el rail con forma de cola de Milano, pero ha sido desechada debido a su mayor coste y dificultad en la fabricación.



*Figura 2.8. Rail.*

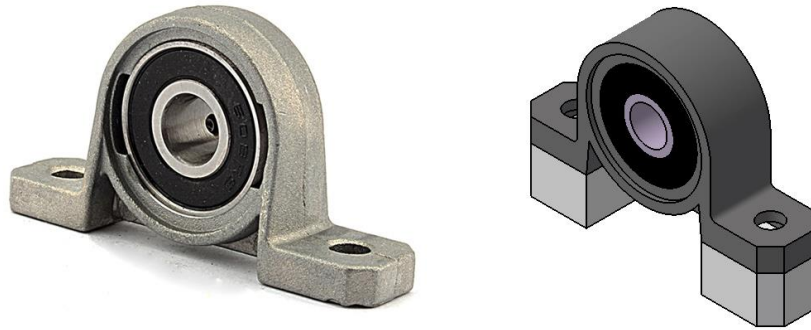
Para convertir el movimiento rotatorio en el movimiento lineal que deben seguir las mordazas, se emplea un tornillo sin fin trapezoidal o tipo husillo de 8 mm de diámetro con su tuerca de latón correspondiente, cuya adquisición resulta muy sencilla y

económica ya que es un tipo de tornillo muy empleado tanto en las máquinas de control numérico caseras como en las impresoras 3D (Figura 2.9).



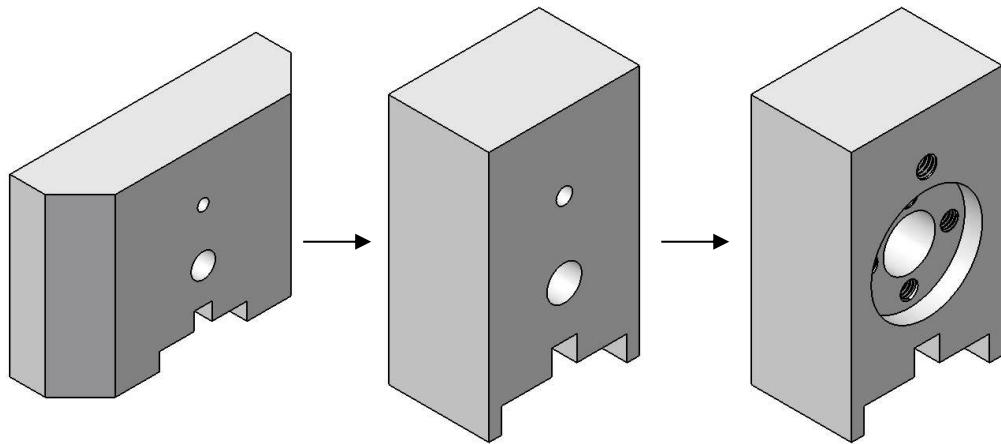
*Figura 2.9. Tornillo trapezoidal y tuerca.*

El tornillo se apoya en cada extremo en un cojinete con rodamiento, el cual agarra el tornillo para evitar desplazamientos a lo largo de su eje longitudinal y sirve de fijación entre el tornillo y la estructura base. El cojinete consta de dos agujeros que permiten atornillarlo a la estructura y un rodamiento en la parte central que gira libremente. Al igual que el tornillo, su adquisición resulta muy económica al ser un componente muy utilizado en variedad de máquinas de bajo coste que contengan tornillos sin fin. Para garantizar un correcto alineamiento entre el tornillo, el orificio del rodamiento y el orificio de las piezas móviles, es necesario añadir un pequeño suplemento que eleva el cojinete (Figura 2.10).



*Figura 2.10. Cojinete con rodamiento.*

La pieza con el diseño más complejo del sistema móvil es el llamado “accionador”. Esta pieza se encarga de transmitir el movimiento lineal al sensor de fuerza y posteriormente el sensor lo transmite a la mordaza. En primer lugar, el diseño no incluía la tuerca de latón, por lo que el “accionador” debía poseer una rosca interna compatible con el tornillo. Esto resultaba muy costoso y, debido a que la fabricación se ha realizado mediante impresión 3D, finalmente se ha decidido insertar la tuerca en el interior de la pieza garantizando un movimiento más suave y con menor fricción. Además, la evolución en el diseño ha significado una reducción en el tamaño y en la cantidad de material empleado. El diseño final consta de cuatro orificios roscados donde se atornilla la tuerca de latón, un agujero roscado donde se conecta el sensor de fuerza y en la parte inferior, la forma del rail sobre el que se apoya (Figura 2.11).



*Figura 2.11. Accionador (evolución).*

Además de los componentes más significativos detallados anteriormente, el sistema móvil también cuenta con piezas accesorias como son el acoplador y la anilla de accionamiento (Figura 2.12). La función del acoplador es la unión del tornillo sin fin con la anilla de accionamiento de manera que girando dicha anilla manualmente, el sistema se desplaza linealmente.



*Figura 2.12. Acoplador y anilla de accionamiento.*

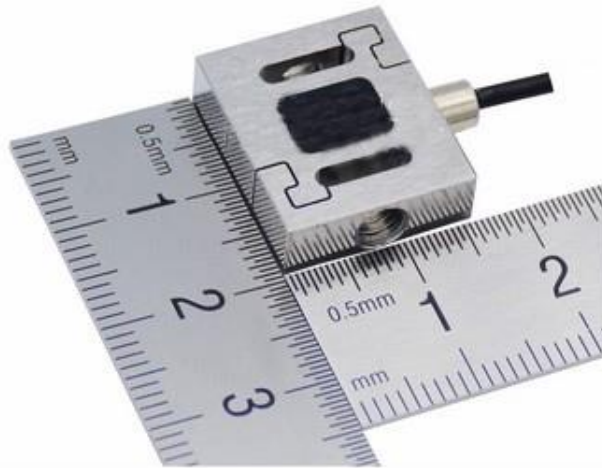
## 2.4. Sensor de fuerza

Según estudios realizados con probetas de huesos de rata (Ruiz García 2015) aplicando una fuerza en torno a 150-200 N, e incluso fuerzas inferiores del orden de 12 N (Sztefek et al. 2010), se consiguen deformaciones suficientes para ser medidas mediante videocorrelación de imágenes digitales. Para huesos más resistentes, como por ejemplo



un fémur de caballo, son necesarias fuerzas superiores a las anteriores, siendo 1000 N un valor adecuado para su caracterización.

En base al rango de fuerza en el que trabaja la máquina y teniendo en consideración las dimensiones de sus componentes, se ha seleccionado el sensor comercial Forsentek FSSM-1kN (Figura 2.13).



*Figura 2.13. Sensor de fuerza Forsentek FSSM-1kN (www.forsentek.com).*

Se trata de un sensor de pequeñas dimensiones ( $19 \times 16 \times 9$  mm) capaz de medir fuerzas de tracción y de compresión hasta 1000 N. Posee dos agujeros roscados mediante los cuales se conecta, a través de una varilla roscada, tanto al accionador como a la mordaza de tal forma que cuando el accionador se desplaza durante el ensayo, el sensor se estira o contrae, siendo capaz de medir la fuerza correspondiente (Figura 2.14). Se emplean dos sensores, uno en cada dirección, siendo el precio de cada unidad 136 euros, precio razonable y acorde con el objetivo del proyecto.

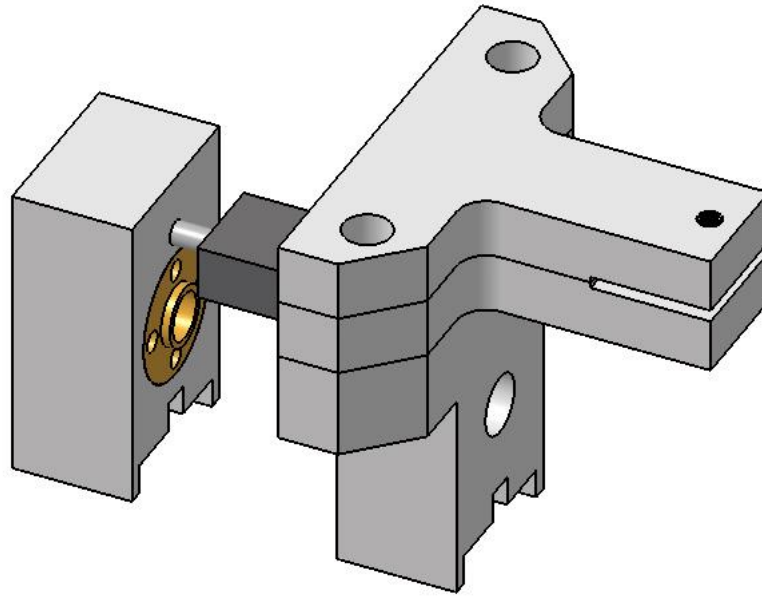


Figura 2.14. Conjunto Accionador-Sensor-Mordaza.

En la Tabla 4 se muestran las principales características del sensor seleccionado.

Modelo	FSSM
Material	Acero inoxidable
Capacidad máxima	1000 N
Temperatura de servicio	-20/60 °C
Tensión de salida	2.0 mV/V
Exitación	3-10 V
Repetibilidad	±0,05 %

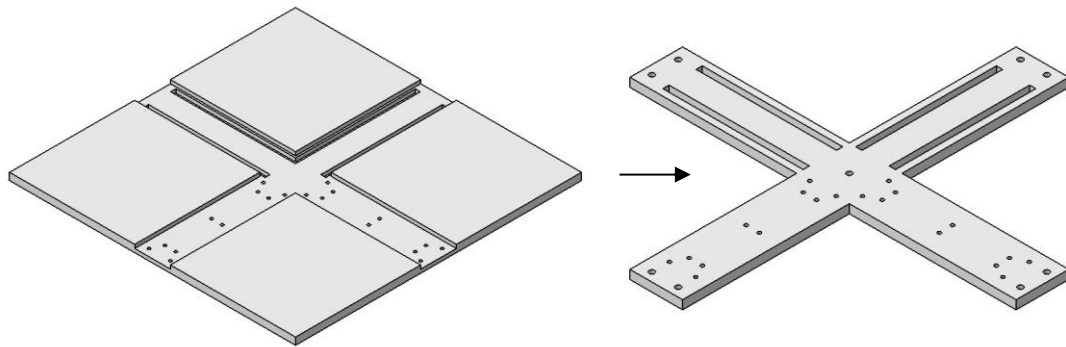
Tabla 4. Características del sensor de fuerza.

## 2.5. Estructura base

El objetivo de la estructura es servir de apoyo al resto de componentes de la máquina, aportar rigidez y fijar la máquina de manera que el ensayo se realice de forma correcta y sin introducir errores debido a vibraciones o desplazamientos no deseables.

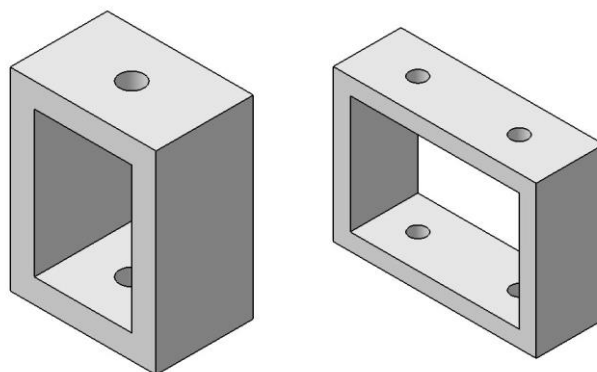
En la Figura 2.15 se muestra la evolución del diseño de dicha estructura en la que se observa una gran reducción de material fuera de las dos direcciones principales, donde se

agrupan los componentes de la máquina. La eliminación de dichas zonas se acompaña de un aumento del espesor de la cruz central.



*Figura 2.15. Estructura base (evolución).*

Cada eje cuenta con dos zonas diferenciadas, la zona donde se ubican dos ranuras que sirven como rail para las mordazas fijas y permiten, una vez colocada la mordaza, fijarla mediante dos tornillos en dicha posición, y la zona de la mordaza móvil formada por diversos taladros cuya función es la unión del rail y los cojinetes a la base. Con el objetivo de acceder de manera sencilla a la zona inferior de la estructura para manipular los tornillos de fijación, se añaden unos soportes en los extremos, y uno en la parte central, que además de servir de apoyo, su diseño permite la fijación de toda la estructura a una mesa de ensayo mediante tornillos (Figura 2.16).



*Figura 2.16. Apoyos de la estructura.*

Las dimensiones de la estructura ( $450 \times 450$  mm) no permiten su fabricación de una sola pieza mediante impresión 3D en la impresora BQ Witbox 2 debido a que el tamaño de la cama de impresión ( $297 \times 210$  mm) es menor al tamaño de la estructura. Por este motivo se decide dividir la base en cuatro partes (una por cada extremo de la cruz) y e imprimir cada una de las partes por separado. Además, es necesario diseñar el método de unión de las partes, el cual consiste en una pieza con ocho taladros que se atornilla en la parte central de la cruz solucionando el problema surgido (Figura 2.17).

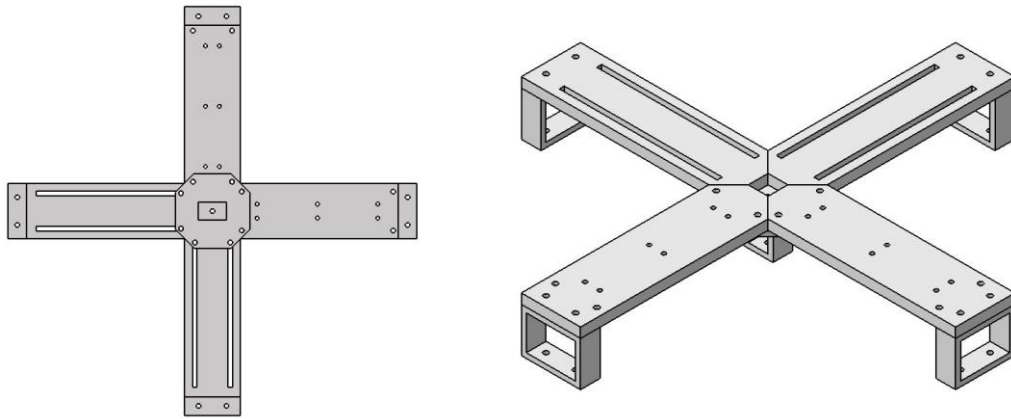


Figura 2.17. Estructura base (diseño final).

## 2.6. Máquina completa

Una vez detallados todos los componentes de la máquina, la Figuras 2.18 muestra el diseño completo con las mordazas correspondientes para ensayar probetas rectangulares o cruciformes. Además, la Tabla 5 presenta el listado de tornillos necesarios para el montaje completo de la máquina.

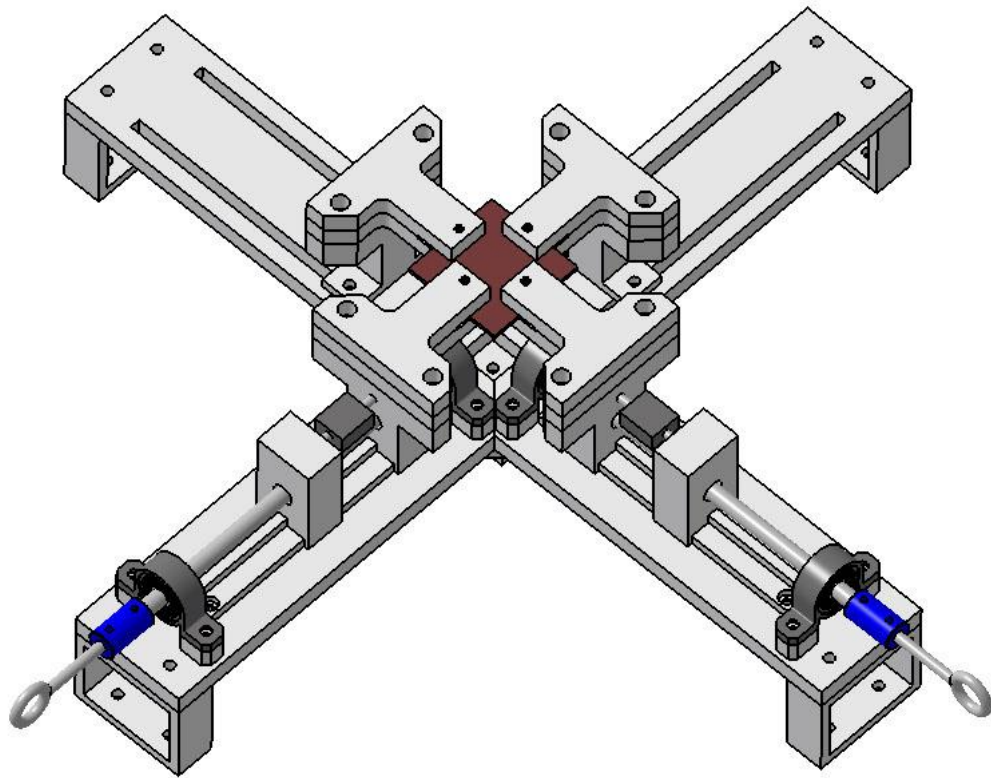


Figura 2.18. Montaje completo con probeta rectangular.

	Nº Tornillos	Nº Tuercas
M3,5	8	0
M4	16	12
M5	25	25
M8	8	8

Tabla 5. Lista de tornillos.



## 3 MATERIAL

### 3.1. Introducción

En este capítulo se presentan tres materiales candidatos para la construcción de la máquina. Se describen sus propiedades más relevantes, sus ventajas e inconvenientes respecto a los demás.

### 3.2. Metales: Acero inoxidable y Aluminio

Se define como acero aquel material formado principalmente por hierro y que posee un contenido de carbono entre el 0,03% y 2,14% en masa. Además, el acero puede contener otros elementos aleantes, siendo el acero inoxidable aquel cuyo contenido en cromo supera el 12%, con pequeñas cantidades de molibdeno y níquel.

El acero inoxidable se caracteriza por una elevada resistencia a la corrosión ya que el cromo, al poseer una gran afinidad por el oxígeno, reacciona creando una capa pasivadora que protege el acero.

La Tabla 6 muestra las propiedades mecánicas del acero, pudiendo variar levemente entre un acero y otro dependiendo del método de fabricación o del tratamiento térmico posterior, entre otros factores.

	Acero
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	7850
Módulo de Young (GPa)	210
Limite elástico (MPa)	275
Módulo de Poisson	0,33

*Tabla 6. Propiedades mecánicas del acero.*

El aluminio es un metal muy empleado en la ingeniería debido a la combinación de propiedades que posee, baja densidad, buena resistencia a la corrosión, y es fácilmente mecanizable. Además, es un elemento muy abundante en la naturaleza, por lo que resulta barato. La Tabla 7 presenta sus propiedades mecánicas más importantes.

	Aluminio
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2700
Módulo de Young (GPa)	70
Limite elástico (MPa)	250
Módulo de Poisson	0,33

*Tabla 7. Propiedades mecánicas del aluminio.*

La elevada resistencia de acero permite que piezas que contienen roscas tengan una alta durabilidad, por el contrario, resulta más costoso de mecanizar que el aluminio, como se refleja en el capítulo 4.

Otro inconveniente que poseen los materiales metálicos es el fenómeno de la corrosión galvánica, proceso electroquímico que se produce por el contacto de dos metales con diferente potencial de reducción en un medio húmedo (ambiente). Los electrones fluyen desde el más cargado negativamente (ánodo) al más cargado positivamente (cátodo) formando una pila y provocando la corrosión del metal menos noble, en este caso el aluminio (Figura 3.1). Por lo tanto, en caso de emplear un metal para su fabricación es necesario asegurarse que las todas las piezas que están en contacto son del mismo metal (incluyendo los tornillos), o bien aislar los metales mediante una lámina de teflón o un proceso de galvanizado.





*Figura 3.1. Corrosión galvánica (da.wikipedia.org).*

### **3.3. Polímeros: PLA**

El PLA o ácido poliáctico es un polímero biodegradable derivado del ácido láctico. Se fabrica a partir de recursos renovables al 100%, como son la remolacha, el maíz, el trigo y otros productos ricos en almidón. Este termoplástico posee características mejores que muchos de los plásticos derivados del petróleo, lo que le confiere una elevada versatilidad de usos (Fuentes Bordallo, 2017).

El PLA es en su forma normal un polímero permanente e incoloro, resistente a la humedad y a la grasa. En cuanto a aspectos físicos, químicos y mecánicos, la resistencia a tracción y el módulo de Young es comparable al del polietileno, sin embargo, su densidad es inferior. Posee una baja deformación por rotura, buena plasticidad térmica, es resistente al rayado y al desgaste (Del Médico Bravo, 2017). Es, además, estable a la luz ultravioleta y su inflamabilidad es baja.

En el ámbito de la impresión 3D, tiene múltiples ventajas. Además de un precio competitivo, permite imprimir con buena calidad. No es indispensable imprimirlo sobre cama caliente, siendo uno de los principales motivos por los que ha sido el elegido en este proyecto ya que la impresora Witbox 2 no posee cama caliente. Sin embargo, también presenta varios inconvenientes tales como su incapacidad para el posterior procesado, ya sea mecanizado, lijado o pintado, o su bajo rendimiento a altas temperaturas ( $> 57^{\circ}\text{C}$ ). En estos aspectos, su principal competidor, el ABS, lo supera.

Entre sus usos más comunes se encuentran la industria textil, al ser un material ignífugo, la industria del empaquetado, al tener propiedades comparables con el PET, muy empleado en la fabricación de botellas, y por último la industria médica al ser un material biodegradable y bioabsorbible.

La Tabla 8 muestra los valores de las principales propiedades mecánicas y térmicas tanto del PLA como del ABS.

	PLA	ABS
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1250	1050
Módulo de Young (GPa)	3,5	2,5
Límite elástico (MPa)	60	44
Módulo de Poisson	0,4	0,4
Deformación hasta rotura (%)	6	20
Temperatura de transición vítrea (°C)	57	88
Precio (€/kg)	19	16

*Tabla 8. Propiedades mecánicas y térmicas de PLA y ABS.*

## 4 PRESUPUESTO

---

### 4.1. Introducción

En este breve capítulo se detalla el coste de fabricación del prototipo completo para cada uno de los tres materiales propuestos en el capítulo anterior a partir de un presupuesto facilitado por un taller de mecanizado real.

### 4.2. Presupuesto: Acero

A continuación, se adjunta el presupuesto de fabricación de las piezas mediante mecanizado en acero facilitado por la empresa MECANIZADOS MAFEX S.L. situada en Sevilla.

En una primera tabla (Tabla 9) se detalla el coste de mecanizado de cada una de las piezas diseñadas, así como el coste total de mecanizado. Posteriormente en la Tabla 10 se muestra el coste total del prototipo en acero incluyendo, además del coste de mecanizado, el de los demás componentes comerciales que componen la máquina (husillos, rodamientos, sensores etc).

Una vez estudiado el coste de fabricación en acero, se descarta debido a su precio elevado, ya que es posible conseguir las funciones deseadas del prototipo empleando materiales más económicos.

	Unidades	Acero Inox. (€/ud)	Total Acero Inox. (€)
Base mordaza fija	2	97	194
Base mordaza móvil	2	104	208
Accionador	2	102	204
Mordaza cilíndrica inferior	2	53	106
Mordaza cilíndrica superior	2	58	116
Mordaza rectangular inferior	4	70	280
Mordaza rectangular superior	4	76	304
Rail	2	68	136
Estructura base	1	364	364
Apoyo	4	58	232
Apoyo central	1	48	48
<b>TOTAL PIEZAS</b>			<b>2192</b>

Tabla 9. Presupuesto de mecanizado en acero inoxidable (Mecanizados Mafex S.L.).

	Coste (€)	Coste (%)
Material Acero Inox.	2192	87,6
Sensores	272	10,7
Husillos	23,8	0,9
Cojinetes	8,6	0,4
Acopladores	3	0,2
Tornillería	4	0,2
<b>TOTAL</b>	<b>2503,4</b>	<b>100</b>

Tabla 10. Coste total de la máquina en acero inoxidable.

### 4.3. Presupuesto: Aluminio

Análogamente al apartado anterior, la Tabla 11 muestra el presupuesto de mecanizado en aluminio proporcionado por MECANIZADOS MAFEX S.L. y la Tabla 12 presenta el coste total del prototipo en dicho material. Se observa que el mecanizado en aluminio resulta más económico que en acero, sin embargo, el precio sigue siendo elevado, por lo que se descarta este material.

	Unidades	Aluminio (€/ud)	Total Aluminio (€)
Base mordaza fija	2	52	104
Base mordaza móvil	2	56	112
Accionador	2	54	108
Mordaza cilíndrica inferior	2	35	70
Mordaza cilíndrica superior	2	37	74
Mordaza rectangular inferior	4	49	196
Mordaza rectangular superior	4	52	208
Rail	2	49	98
Estructura base	1	202	202
Apoyo	4	37	148
Apoyo central	1	26	26
<b>TOTAL PIEZAS</b>			<b>1346</b>

Tabla 11. Presupuesto de mecanizado en aluminio (Mecanizados Mafex S.L.).

	Coste (€)	Coste (%)
Material Acero Inox.	1346	81,2
Sensores	272	16,4
Husillos	23,8	1,4
Cojinetes	8,6	0,5
Acopladores	3	0,2
Tornillería	4	0,3
<b>TOTAL</b>	<b>1657,4</b>	<b>100</b>

Tabla 12. Coste total de la máquina en aluminio.

#### 4.4. Presupuesto: PLA

Para el cálculo del coste de la impresión se tienen en cuenta dos aspectos, el coste del propio material y el coste de la electricidad consumida durante la impresión. La corriente que consume la impresora BQ Witbox 2 es de 15 A, multiplicada por la tensión que llega a los edificios (220 V), se obtiene una potencia consumida de 3,3 kW. La Tabla 13 muestra las horas necesarias para imprimir cada una de las piezas, así como el coste total energético suponiendo un coste del kWh de 0,12 euros ([www.endesa.com](http://www.endesa.com)).

	Horas	Potencia (kWh)	Total PLA (€)
Base mordaza fija	2	6,6	0,8
Base mordaza móvil	2	6,6	0,8
Accionador	4,25	14	1,7
Mordaza cilíndrica inferior	0,8	2,6	0,3
Mordaza cilíndrica superior	2,5	8,2	0,9
Mordaza rectangular inferior	2,6	8,3	0,9
Mordaza rectangular superior	4	13,2	1,6
Rail	2	6,6	0,8
Estructura base	12,4	40,9	4,9
Apoyo	3,2	10,6	1,3
Apoyo central	0,5	1,6	0,2
Placa de unión	1,2	3,9	0,5
Soportes cojinetes	0,6	1,9	0,2
<b>TOTAL PIEZAS</b>			<b>14,9</b>

Tabla 13. Coste energético de la impresión.

En la Tabla 14 se detalla el coste total del prototipo mediante impresión 3D empleando como material el polímero PLA. Empleando esta técnica de fabricación y este material se reduce de manera considerable el coste de la máquina con respecto a usar materiales metálicos. Cabe destacar que, fabricándola mediante impresión 3D, el mayor porcentaje de coste corresponde a los sensores de fuerza. Debido a que finalmente se opta por esta opción, en la Tabla 14 se añade el coste relativo al estudio y mano de obra del proyecto, considerándose un 30% del coste total.

	Coste (€)	Coste (%)
Material PLA	20	4
Energía	14,9	3
Sensores	272	55
Husillos	23,8	4,8
Cojinetes	8,6	1,7
Acopladores	3	0,6
Tornillería	4	0,9
Estudio y mano de obra	148,4	30
<b>TOTAL</b>	<b>494,7</b>	<b>100</b>

*Tabla 14. Coste total de la máquina mediante impresión 3D.*





# 5 SIMULACIONES MECÁNICAS

---

## 5.1. Introducción

En este capítulo se realiza una simulación mediante elementos finitos con el software ANSYS® para comprobar la resistencia de la pieza que, debido a los esfuerzos que soporta, resulta la más crítica de la máquina, la mordaza.

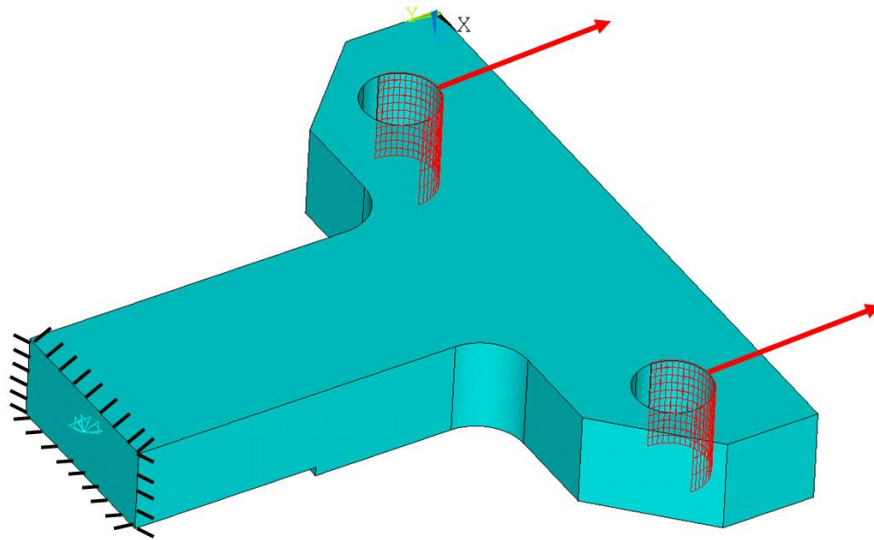
## 5.2. Condiciones de contorno y fuerzas aplicadas

Para la mordaza rectangular, las condiciones de contorno y las fuerzas aplicadas son las siguientes (Figura 5.1):

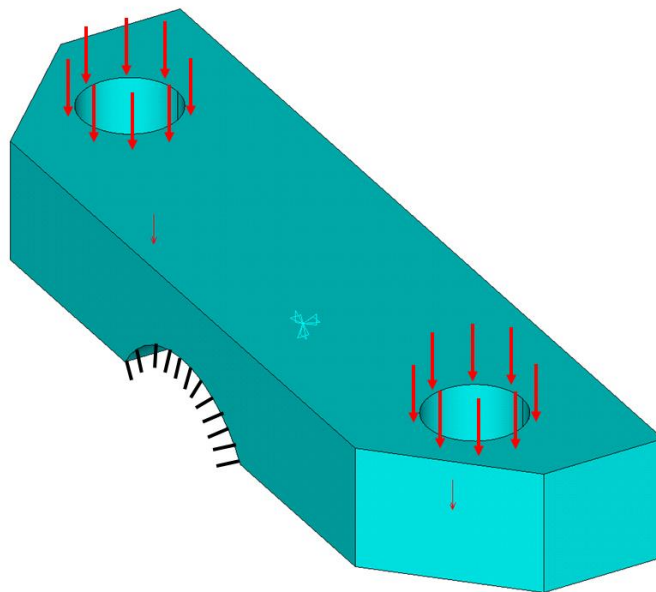
- Se restringen los desplazamientos en las tres direcciones de la cara más extrema de la probeta suponiendo que durante la aplicación de la fuerza, el agarre entre la mordaza y la probeta es perfectamente fijo.
- Se aplica una fuerza de 1000 N (máxima fuerza medible por el sensor elegido) sobre la mitad correspondiente de los taladros, dependiendo si se simula la tracción o la compresión.

En el caso de la mordaza para probetas cilíndricas, debido a su forma, el aspecto más crítico es la flexión producida por un elevado apriete de los tornillos. De manera que las condiciones de contorno y la fuerza aplicada a este tipo de mordaza son (Figura 5.2):

- Se restringen los desplazamientos en las tres direcciones del área cilíndrica que se encuentra en contacto con la probeta.
- Se aplica una fuerza simulando la presión de los tornillos en ambos taladros, produciéndose la flexión de la pieza. Como esta fuerza varía según el apriete de los tornillos, se calcula la máxima fuerza soportada por la mordaza.



*Figura 5.1. Condiciones de contorno y aplicación de fuerza de tracción en mordaza rectangular.*



*Figura 5.2. Condiciones de contorno y aplicación de fuerza en mordaza cilíndrica.*

### 5.3. Análisis de sensibilidad de la malla

Se ha realizado un análisis de sensibilidad con el objetivo de obtener la malla óptima que maximice la precisión de los resultados con un coste computacional bajo. El tamaño de los elementos ha oscilado entre 5 mm y 0,8 mm obteniéndose una malla óptima para tamaños de elementos de 1,5 mm (Figura 5.3 y Figura 5.4).

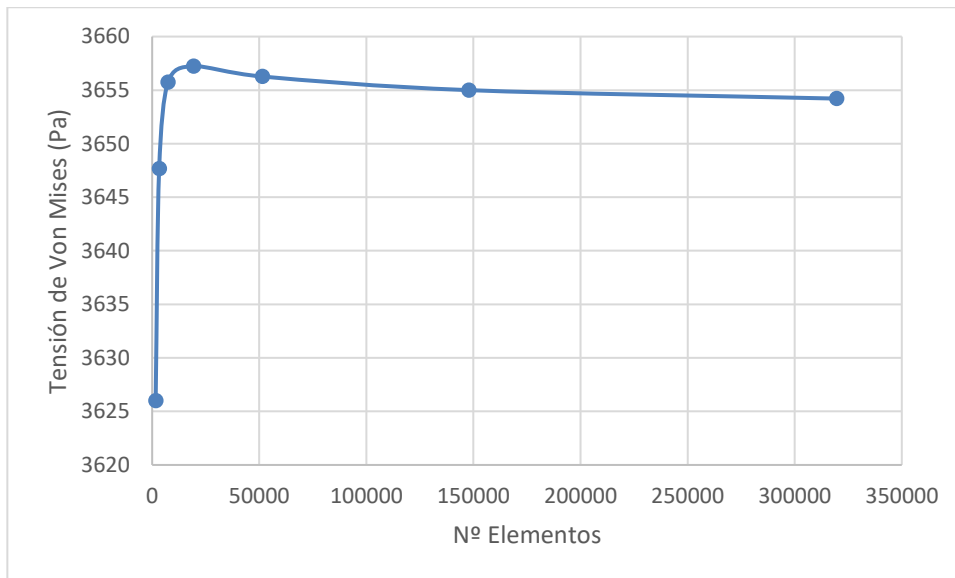


Figura 5.3. Análisis de sensibilidad de la malla en mordaza rectangular.

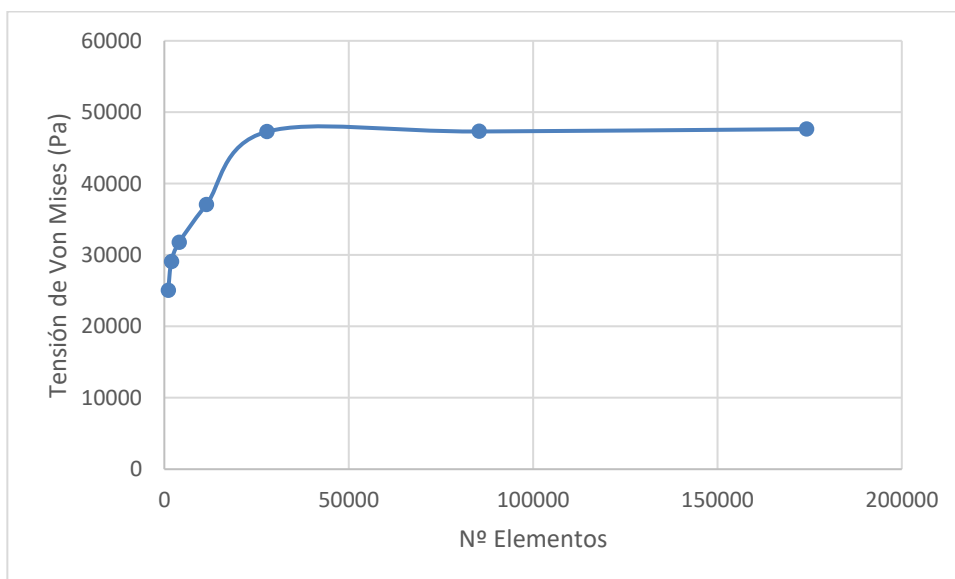


Figura 5.4. Análisis de sensibilidad de la malla en mordaza cilíndrica.

Se ha empleado el elemento SOLID187, elemento tetraédrico sólido formado por 10 nodos. La malla de la mordaza rectangular consta de 51442 elementos y 76379 nodos, mientras que la malla de la mordaza cilíndrica cuenta con 27793 elementos y 42183 nodos.

#### 5.4. Análisis estático y Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la mordaza rectangular tanto a tracción como a compresión, calculando la tensión de Von Mises máxima y comparándola con el límite elástico del acero, del aluminio y del PLA (Figura 5.5 y Figura 5.6).

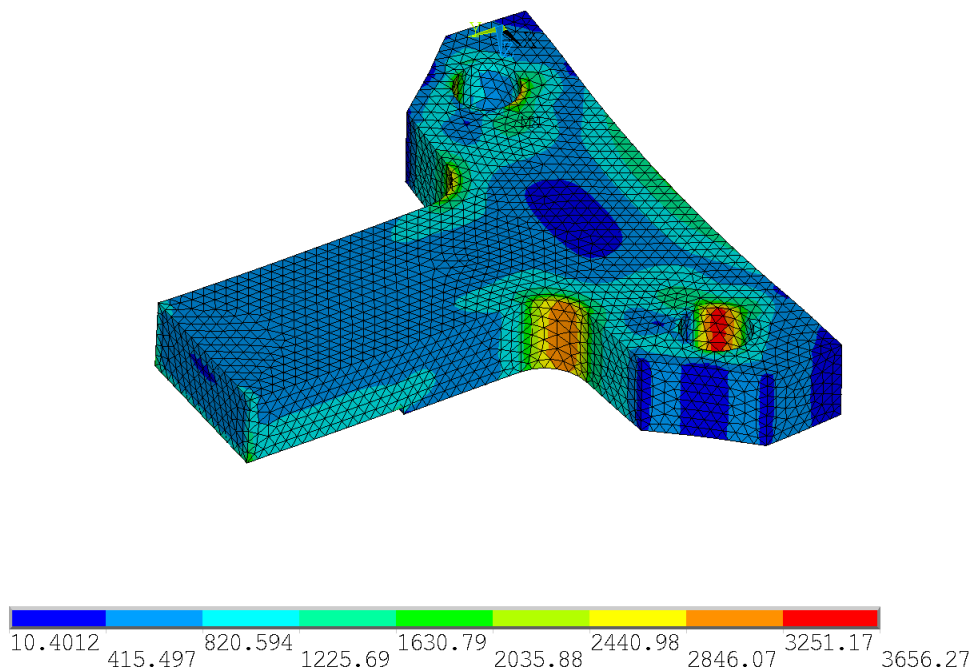


Figura 5.5. Análisis estático de mordaza rectangular a tracción (Tensión de Von Mises (Pa)).

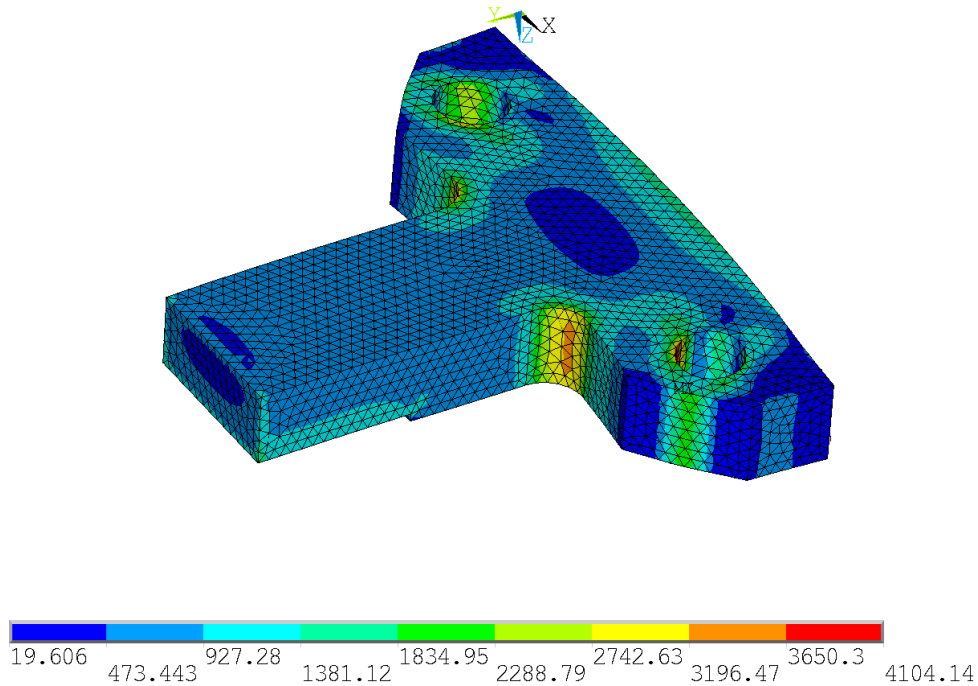


Figura 5.6. Análisis estático de mordaza rectangular a compresión (Tensión de Von Mises (Pa)).

Se observa que la máxima tensión de Von Mises tanto a tracción (3656,27 Pa) como a compresión (4104,14 Pa) es muy inferior al límite elástico de los tres materiales indicados anteriormente (Tabla 15). Por lo tanto, la mordaza rectangular resiste perfectamente la fuerza aplicada.

	Límite elástico (MPa)
Acero	275
Aluminio	250
PLA	60

Tabla 15. Límite elástico de los materiales candidatos.

El análisis de la mordaza cilíndrica se lleva a cabo aumentando la fuerza aplicada como consecuencia del apriete de los tornillos hasta que la máxima tensión de Von Mises en la mordaza supere el límite elástico de cada uno de los materiales, obteniéndose así, la fuerza máxima que soporta cada material (Figura 5.7).

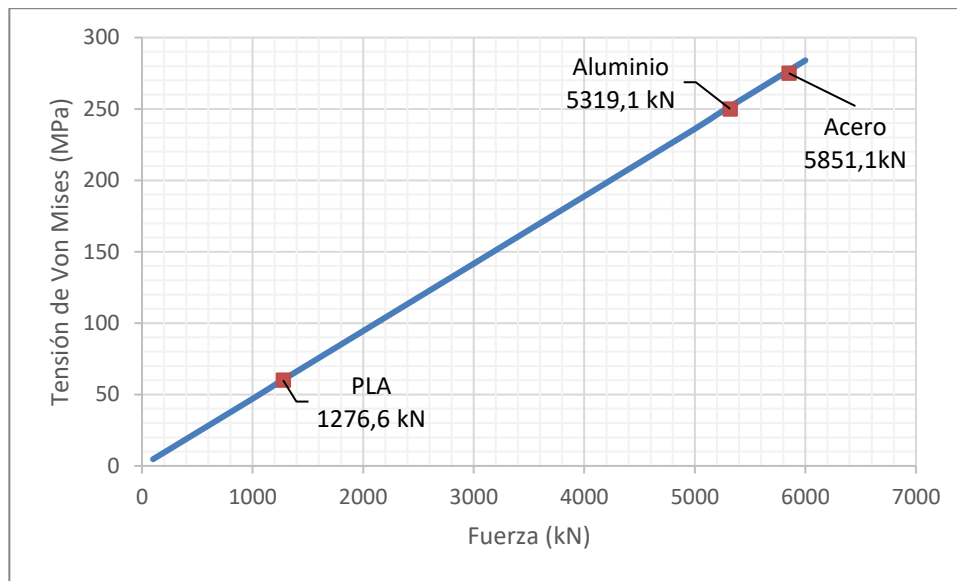


Figura 5.7. Fuerza aplicada en mordaza cilíndrica frente a tensión máxima de Von Mises.

Los análisis anteriores han sido realizados a mordazas de acero, aluminio y PLA completamente sólidas, es decir, sin huecos internos. En el caso del PLA, debido a que se fabrican mediante impresión 3D, las piezas no son totalmente sólidas, ya que internamente están formadas por mallas de distintas geometrías (cuadrícula, circular, panal de abeja) y diferentes densidades. Ya que generar la geometría de la pieza con la malla interna en CATIA V5® resulta difícil y extremadamente laborioso, se ha creado la geometría de las mordazas totalmente huecas con un espesor de pared de 1 mm (Figura 5.8), de manera que, si estas piezas huecas son capaces de soportar las fuerzas aplicadas, son capaces de hacerlo aquellas piezas con una malla interna impresas en 3D.

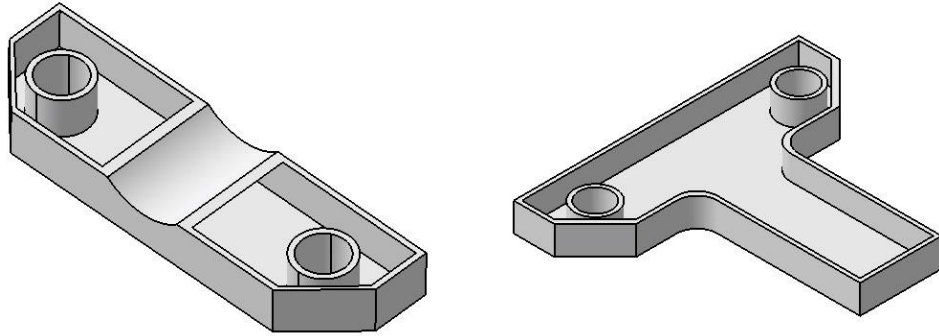


Figura 5.8. Mordazas huecas (corte).

En primer lugar, se realiza el análisis estático de la mordaza rectangular con las mismas condiciones de contorno y fuerzas aplicadas anteriormente para la pieza “llena”, obteniéndose los siguientes resultados (Figura 5.9 y Figura 5.10).

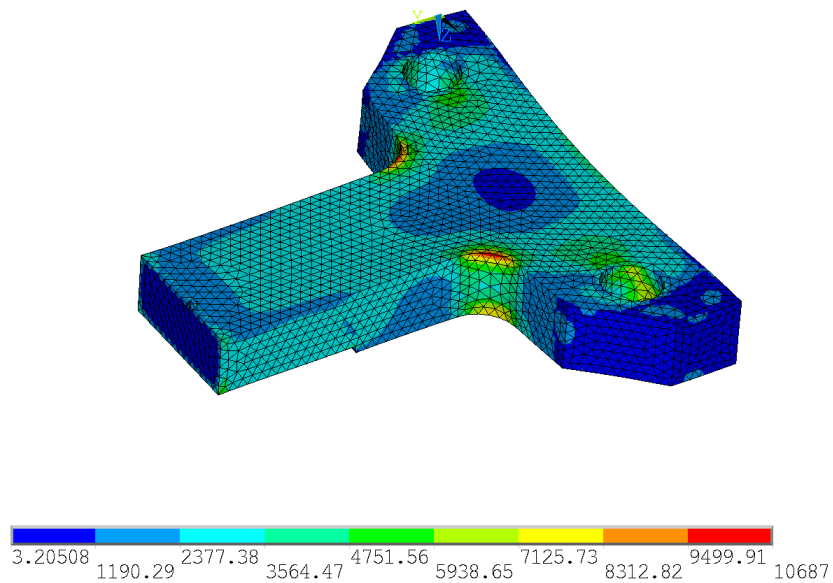
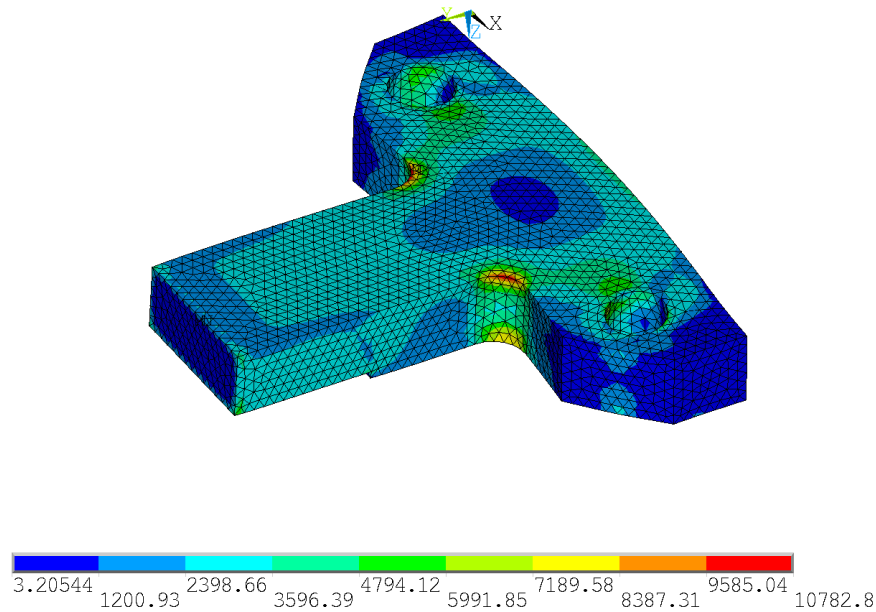


Figura 5.9. Análisis estático de mordaza rectangular hueca a tracción (Tensión de Von Mises (Pa)).



*Figura 5.10. Análisis estático de mordaza rectangular hueca a compresión (Tensión de Von Mises (Pa)).*

Se observa que la máxima tensión de Von Mises tanto a tracción (10687 Pa) como a compresión (10782,8 Pa) es muy inferior al límite elástico del PLA (60 MPa) por lo que la pieza totalmente hueca es capaz de soportar la carga. Por lo tanto, la mordaza rectangular creada por impresión 3D con una malla interior soporta la carga.

Para la mordaza cilíndrica hueca, análogamente a lo realizado con anterioridad a la mordaza “llena”, se aumenta la fuerza aplicada hasta que la máxima tensión de Von Mises coincida con el límite elástico del PLA (Figura 5.11 y Figura 5.12).



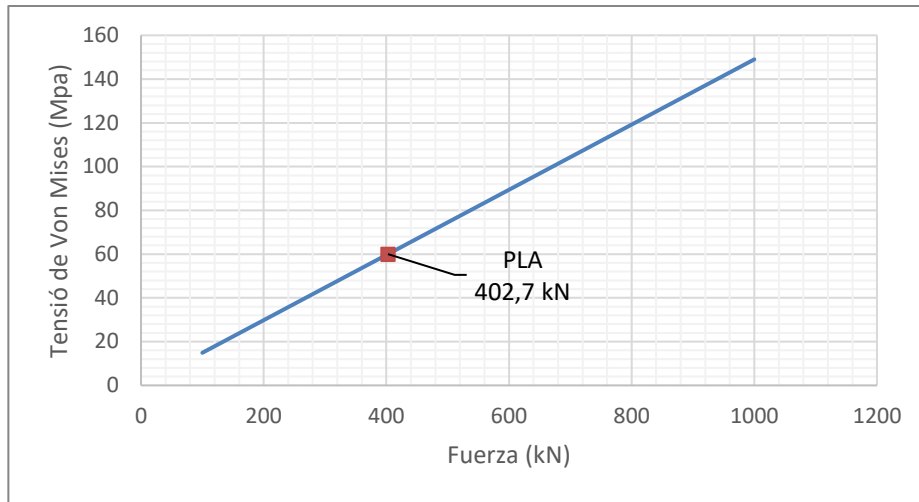


Figura 5.11. Fuerza aplicada en mordaza cilíndrica hueca frente a tensión máxima de Von Mises.

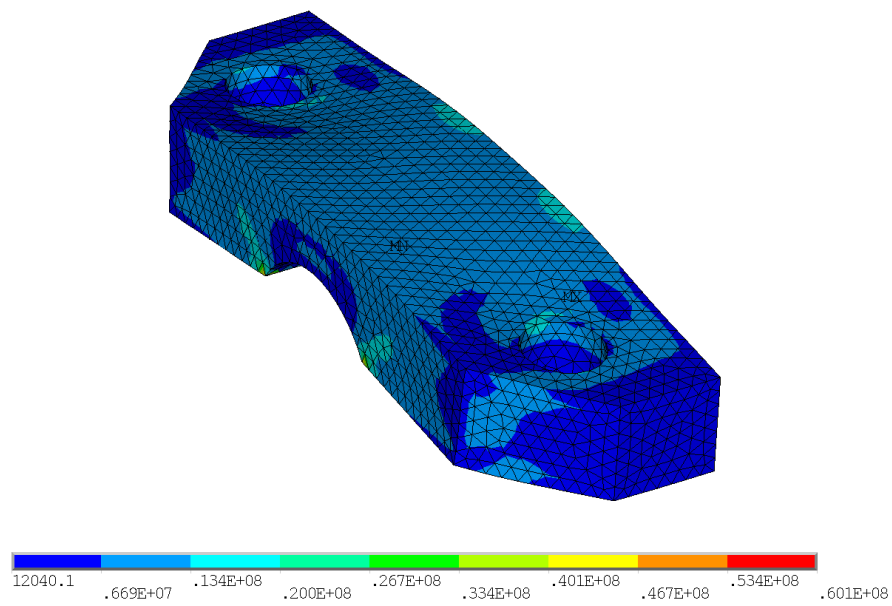


Figura 5.12. Análisis estático de mordaza cilíndrica hueca a flexión (Tensión de Von Mises (Pa)).



# 6 CORRELACIÓN DE IMÁGENES DIGITALES

---

## 6.1. Introducción

La técnica de la correlación de imágenes digitales (DIC) o videocorrelación nace de la necesidad de tener un mapa de deformaciones sobre la superficie de una muestra, hecho que resulta de gran interés en el estudio del comportamiento de los materiales.

Los sistemas de correlación de imágenes digitales permiten medir de forma óptica desplazamientos, deformaciones y, en algunos casos, tensiones e incluso aceleraciones, siendo posible conocer las propiedades de un material sin contacto (Correlated-Solutions, 2008).

Se trata de un método óptico que utiliza un análisis de correlación matemática para examinar los datos de imágenes digitales tomadas mientras que una o varias muestras se encuentran sometidas a ensayos mecánicos.

La técnica consiste en la captura de imágenes consecutivas con una cámara digital durante la aplicación de la carga, evaluando posteriormente los cambios producidos en la superficie de la muestra y obteniendo información sobre el comportamiento del material bajo cargas incrementales.

Las principales ventajas de esta técnica respecto a otros métodos de medición de desplazamientos y deformaciones son las siguientes (López Alba et al. 2012):

- Tanto la preparación de las muestras como el montaje son sencillos.
- Puede utilizarse luz natural para la realización de los ensayos, aunque es frecuente emplear fuentes de luz externas para mejorar la calidad de las imágenes.

- Se caracteriza por ser versátil, no invasiva y precisa. Existen equipos que permiten llegar a tener 0,01 píxel de precisión para la medida de los desplazamientos y 0,01 % para la medida de las deformaciones.
- Permite realizar un análisis a tiempo real, ya que los algoritmos que implementa tienen bajos requisitos computacionales.
- Esta técnica permite obtener campos de deformación de toda la zona del campo de visión de la cámara, y no sólo de un punto, lo que no es posible por el método tradicional mediante galgas extensiométricas (o resultaría muy costoso por emplear varias galgas).

Sin embargo, esta técnica presenta algunas desventajas, entre las que destacan la rigurosidad en cuanto a la calidad de las imágenes y en cuanto al patrón moteado que ha de generarse en las muestras, así como la posible pérdida de información donde la superficie presente roturas.

## **6.2. Aplicaciones de la técnica DIC**

Investigaciones recientes han empleado y desarrollado la técnica de correlación de imágenes digitales en ensayos que, por las características de los materiales ensayados, es difícil utilizar los métodos tradicionales. Es el caso de ensayos para caracterizar el comportamiento mecánico de la aorta (Peña et al. 2018), ensayos en el tendón supraespinoso (Szczesny et al. 2012) o ensayos sobre huesos de rata (Sztefek et al. 2010).

Además, esta técnica se ha empleado en ensayos biaxiales de materiales compuestos, ensayos de fatiga, mecánica de la fractura, y deformación plástica de materiales anisótropos.

El sistema VIC 2D de Limesh (Figura 6.1) que posee el Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla ha sido utilizado en diversos ensayos entre los que destacan la evaluación de las propiedades mecánicas de fémures

de rata (Ruiz García, 2015) o el estudio del contacto entre sólidos (Serrano Cabello, 2015).



*Figura 6.1. Cámara digital, VIC 2D Limess (Serrano Cabello, 2015).*

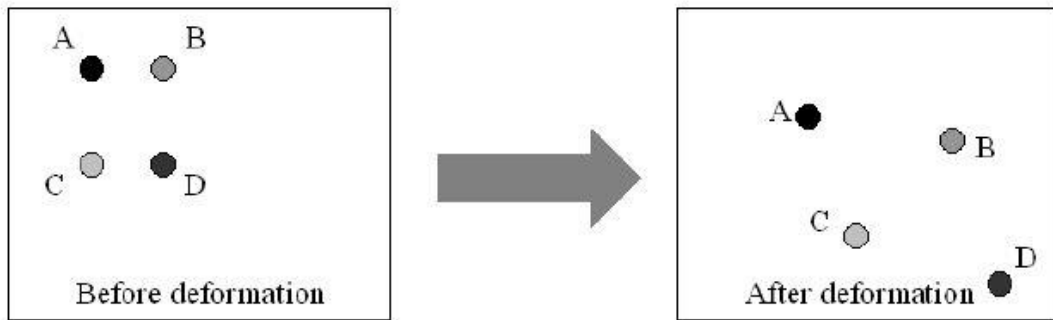
### **6.3. Sistema VIC 2D**

VIC 2D emplea algoritmos de correlación proporcionando información sobre desplazamiento y deformación en ensayos con probetas planas. Es capaz de calcular el movimiento en el plano de todos los puntos incluidos en la zona de medición, obteniendo las deformaciones que se producen.

En primer lugar, es necesario prepara las probetas aplicando una base de pintura blanca mate, flexible y adherente, para posteriormente, mediante un spray de pintura negra, aplicar un fino patrón moteado. Dicho patrón debe ser regular en toda la superficie de análisis y poseer un alto contraste de blancos y negros para la correcta captación de su evolución por parte del sistema óptico (Martínez Donaire, 2012).

Una vez que la muestra ha sido moteada, se capturan fotogramas de la zona de interés a una frecuencia determinada mientras la probeta se deforma. Durante el ensayo, el sistema analiza los cambios en el patrón de motas. Mediante algoritmos de correlación,

el sistema compara la imagen final con una imagen de referencia, calculando así los desplazamientos en la superficie (Figura 6.2).



*Figura 6.2. Correlación de imágenes (Ruiz García, 2015).*

# 7 IMPRESIÓN 3D DEL PROTOTIPO

---

## 7.1. Introducción

En este capítulo se presenta la impresora 3D empleada en la fabricación de la mayor parte de las piezas de la máquina, así como el software utilizado y los parámetros más importantes en el proceso de impresión. Además, tras el estudio de los materiales candidatos y las simulaciones mecánicas realizadas en los capítulos anteriores se ha optado por la fabricación de un prototipo mediante impresión 3D del polímero PLA.

La impresión 3D es una tecnología de fabricación consistente en la creación de un objeto tridimensional mediante la adición de sucesivas capas de material. Dentro de los procesos de fabricación aditiva, la impresión 3D es el más extendido debido al bajo coste de sus equipos (comparado con equipos de sinterizado láser u otras técnicas de fabricación aditiva), a la rapidez de fabricación y a la relativa facilidad de uso (Fuentes Bordallo, 2017).

## 7.2. Impresora BQ Witbox 2

En el presente proyecto se ha utilizado la impresora BQ Witbox 2 del laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior de Ingeniería de Sevilla (Figura 7.1).

Las dimensiones de la cama de impresión son  $297 \times 210 \times 200$  mm, la máxima resolución (distancia entre capa y capa) es de 20 micras e imprime a velocidades de hasta 200 mm/s. Emplea bobinas de filamentos de 1,75 mm de diámetro de PLA, madera, bronce, cobre y Filaflex. Debido a que no posee cama caliente, no es posible imprimir materiales como el ABS, y además es necesario impregnar de laca la bandeja previamente. Admite entrada de datos tanto por cable USB como mediante tarjeta SD.



Figura 7.1. Impresora BQ Witbox 2.

### 7.3. Software Ultimaker CURA

Una vez creada la geometría de la pieza en CATIA V5® (.stl), esta es importada al software Ultimaker CURA el cual se encarga de generar cada una de las capas que conforman la pieza impresa. Posteriormente, genera el código (.gcode) con las trayectorias que sigue el extrusor para crear la pieza, siendo este el archivo que se le introduce a la impresora. Además, el software permite distribuir las piezas en la bandeja y configurar los parámetros de impresión (Figura 7.2).

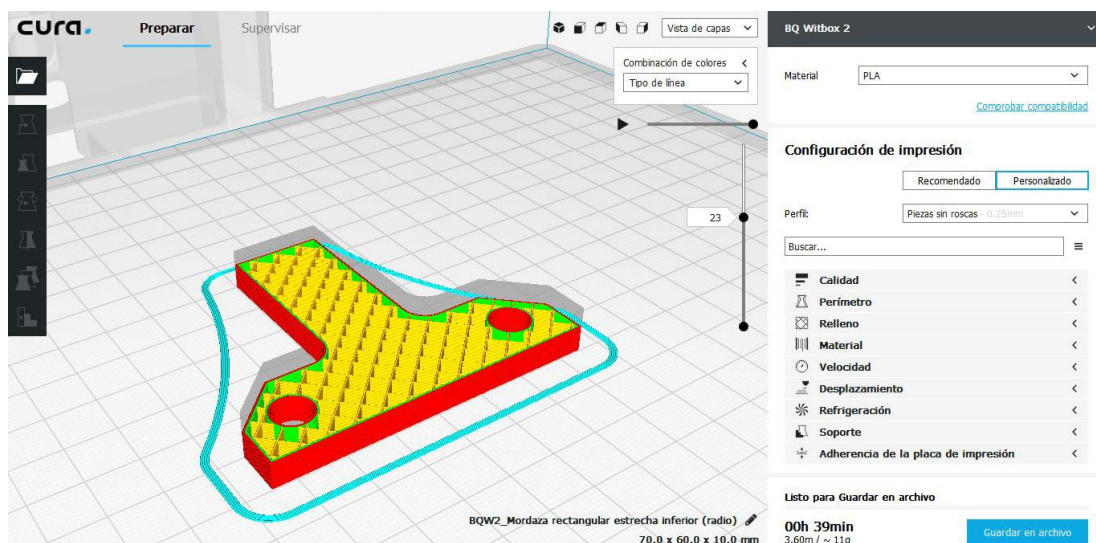


Figura 7.2. Software Ultimaker CURA.



A continuación, se describen los principales parámetros de configuración de la impresión, en el siguiente apartado se detallan los valores empleados para la fabricación de las piezas de la máquina.

### **Calidad**

- Altura de capa: valores altos producen impresiones rápidas con una menor resolución, mientras que con valores bajos se consiguen mejores acabados siendo la impresión más lenta.

### **Perímetro**

- Grosor de pared: grosor de las paredes en dirección horizontal.
- Grosor superior/inferior: grosor de las capas superiores e inferiores.

### **Relleno**

- Densidad de relleno: densidad de la red interna que componen las piezas. La mínima densidad corresponde a la pieza hueca mientras que la máxima es la pieza totalmente maciza.
- Patrón de relleno: forma de la red interna. Puede ser de rejilla, líneas, triángulos, trihexagonal, cúbico, octeto, concéntrico, zigzag o cruz.

### **Material**

- Temperatura de impresión: fijada normalmente por el fabricante.
- Habilitar la retracción: retrae el filamento cuando el extrusor se desplaza sobre un área no impresa.

### **Velocidad**

- Velocidad de relleno: velocidad a la que se imprime la red interna.
- Velocidad de pared exterior/interior: velocidad de la impresión de las paredes, tanto la más externa como las interiores. Velocidades pequeñas mejoran el acabado superficial de la pieza.
- Velocidad superior/inferior: afecta a las paredes superiores e inferiores y, con ello, al acabado superficial.

### **Refrigeración**

- Activar refrigeración de impresión: habilita ventiladores de refrigeración mientras se imprime. Los ventiladores mejoran la calidad ya que acelera el enfriamiento y endurecimiento del material.

### **Soporte**

- Generar soporte: genera estructuras para soportar partes de las piezas en voladizo. Sin estas estructuras, la pieza se rompería durante la impresión.

### **Adherencia de la placa de impresión**

- Tipo de adherencia: diferentes opciones que ayudan a mejorar tanto la extrusión como la adherencia a la placa. Es la línea que se crea alrededor de la pieza, sin contacto con ella, y tiene como función ajustar la extrusión de manera que cuando comience la impresión de la pieza, el hilo de material fluya de manera continua y sin restos.

## 7.4. Fabricación del prototipo

En este apartado se detalla el proceso de fabricación del prototipo mediante impresión 3D.

La Tabla 16 muestra el valor de los parámetros empleados en la fabricación de las piezas del presente proyecto, distinguiendo las piezas que contienen roscas de las que no, ya que la existencia de roscas requiere una mayor precisión y mejor acabado con el objetivo de que cumplan correctamente su función.

	Piezas <b>sin</b> rosca	Piezas <b>con</b> rosca
Altura de capa	0,25 mm	0,1 mm
Grosor de pared	1 mm	1 mm
Grosor superior/inferior	1 mm	1,2 mm
Densidad de relleno	20%	20%
Patrón de relleno	Rejilla	Rejilla
Temperatura de impresión	205 °C	205 °C
Velocidad de relleno	100 mm/s	100 mm/s
Velocidad de pared exterior	30 mm/s	30 mm/s
Velocidad de pared interior	60 mm/s	30 mm/s
Velocidad superior/inferior	30 mm/s	30 mm/s
Refrigeración	Sí	Sí
Soporte	No necesario	No necesario
Tipo de adherencia a placa	Falda	Falda

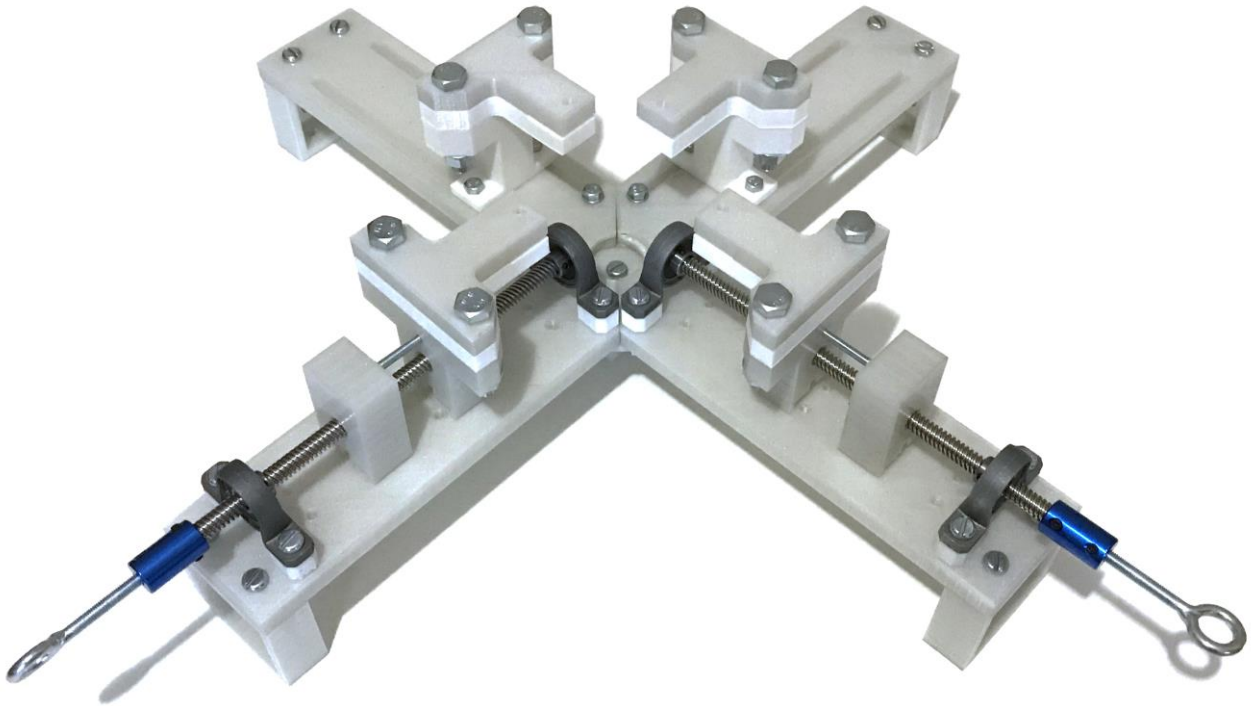
Tabla 16. Parámetros de impresión del prototipo.

Utilizando los parámetros anteriores, el software CURA genera un archivo con el código de la pieza o piezas que se pretendan imprimir en el formato .gcode, formato compatible con la impresora. Este archivo se introduce en la impresora mediante una tarjeta SD o mediante conexión USB con un ordenador, siendo más recomendable el uso de la tarjeta SD para impresiones de tiempo elevado. Previamente a ejecutar la impresión, es necesario precalentar el extrusor hasta la temperatura fijada y, debido a que la impresora BQ Witbox 2 no dispone de cama caliente, aplicar una capa de laca en la bandeja de impresión para evitar que la pieza se mueva al enfriarse las primeras capas.

A continuación se muestran imágenes de algunas de las piezas del prototipo fabricadas en polímero PLA (Figura 7.3) así como el montaje final de la máquina (Figura 7.4).



*Figura 7.3. Conjunto de piezas fabricadas mediante impresión 3D.*



*Figura 7.4. Montaje completo del prototipo.*

Cabe destacar que en el montaje final del prototipo se han obviado los sensores ya que el alcance del proyecto no incluye el diseño del sistema de adquisición de datos, en su lugar se ha unido el accionador y la mordaza mediante un simple tornillo.



# 8 CONCLUSIONES

---

## 8.1. Introducción

En este último capítulo, se exponen las conclusiones del proyecto. Además, se proponen algunas mejoras que pueden servir de objeto para proyectos futuros.

## 8.2. Conclusiones

Tras el proceso de diseño y fabricación del prototipo de máquina biaxial se ha concluido que:

- De entre las dos tipologías de máquina biaxial existente en la literatura, mecanismos accesorios para ensayos biaxiales y máquinas biaxiales autónomas, esta última es la más adecuada debido a sus ventajas, entre las que destaca la posibilidad de aplicar diferentes valores de cargas en cada uno de los ejes.
- Una vez elegido este tipo de máquina biaxial, el elevado coste de las máquinas biaxiales autónomas comerciales y sus dimensiones, crea la necesidad de diseñar una máquina biaxial compacta y económica que cumpla con los objetivos fijados, es decir, que sea capaz de producir en materiales biológicos, en particular en los huesos, deformaciones suficientes como para ser medidas.
- Tras el estudio de los tres materiales candidatos para la fabricación de la máquina ( acero, aluminio y PLA), se ha decidido fabricar el prototipo con el polímero PLA debido a su bajo coste respecto a los materiales metálicos. Además se ha comprobado que cumple con los requisitos mecánicos necesarios mediante el estudio de elementos finitos.

- Para medir deformaciones en las probetas se escoge la técnica de correlación de imágenes digitales (DIC) o videocorrelación frente a técnicas más tradicionales como las galgas extensiométricas por ser una técnica sencilla de aplicar, precisa, no invasiva y versátil, y capaz de medir deformaciones en todo el campo de visión de la cámara a tiempo real.

### **8.3. Mejoras futuras**

Este proyecto cuenta con ciertas simplificaciones, ya sean por el propio alcance del proyecto o bien por el presupuesto existente. Estas limitaciones suponen caminos de mejora de la máquina que pueden ser objeto de proyectos futuros. Entre ellos destacan:

- La fabricación de las piezas mediante mecanizado en acero o aluminio, aumentando así la capacidad de carga de máquina, haciéndola más robusta y versátil, capaz de ensayar un mayor número de materiales diferentes.
- Mejorar el diseño de las piezas de la máquina empleando técnicas de optimización topológica, es decir, realizar un estudio mecánico con elementos finitos con el fin de aligerar el componente manteniendo sus funcionalidades mecánicas.
- La adquisición de los sensores y el diseño y fabricación del sistema de adquisición de datos, así como el software necesario para medir la fuerza aplicada.
- La realización de ensayos en probetas de huesos, midiendo las deformaciones con la cámara de videocorrelación y asegurando así el correcto funcionamiento del prototipo.



## BIBLIOGRAFÍA

---

T. Altan, (2003). Advanced Methods of Simulation in Tube Hydroforming – Research Progress and Cases Studies. Proceedings of the THF Conference, Stuttgart, October 27-28:111.

R. B. Ashman, S. C. Cowin, W. C. Van Buskirk, J. C: Rice, (1984). A Continuous Wave Technique for the Measurement of the Elastic Properties of Cortical Bone. Journal of Biomechanics, 17:349-361.

R. C. Aydin, S. Brandstaeter, F. A. Braeu, M. Steigenberger, R. P. Marcus, K. Nikolaou, M. Notohamiprodjo, C. J. Cyron, (2017). Experimental Characterization of the Biaxial Mechanical Properties of Porcine Gastric Tissue. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 74:499-506.

A. Baah-Dwomoh, R. De Vita, (2017). Effects od Repeated Biaxial Loads on the Creep Properties of Cardinal Ligaments. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 74:128-141.

A. Barroso, E. Correa, J. Freire, F. Paris, (2018). A Device for Biaxial Testing in Uniaxial Machines. Design, Manufacturing and Experimental Results Using Cruciform Specimens of Composite Materials. Experimental Mechanics, 58:49-53.

J. P. Boehler, S. Demmerle, S. Koss, (1994). A New Direct Biaxial Testing Machine for Anisotropic Materials. Exp. Mech. 34:1-9.

Correlated-Solutions, (2008). Strain Measurement System, VIC 2D. (<http://correlatedsolutions.com/digital-image-correlation/>).

E. DeGarmo, R. Kohser, J. T. Black, (1997). *Materials and Processes in Manufacturing*, 8th ed. Prentice Hall, USA, 1259.

A. J. Del Médico Bravo, (2017). *Propiedades Mecánicas de Componentes Fabricados mediante Modelado por Deposición Fundida*. Trabajo Fin de Grado, Universidad de la Laguna.

Fraunhofer, (2005). *Dynamic Material Testing* (<http://www.emi.fraunhofer.de>).

M. Fuentes Bordallo, (2017). *Diseño y Ensayo de Férulas Personalizadas mediante Impresión 3D*. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Sevilla.

M. Geiger, G. van der Heyd, M. Merklein, W. Husßnätter, (2005). *Novel Concept of Experimental Setup for Characterisation of Plastic Yielding of Sheet Metal at Elevated Temperatures*. *Proceedings of SheMet'05*, 657-664, Erlangen, Germany. *Advanced Materials Research*, 6-8.

J. Gozzi, A. Olsson, O. Lagerqvist, (2005). *Experimental Investigation of the Behaviour of Extra-High Strength Steel*. *Exp. Mech.* 533-540.

D. E. Green, K. W. Neale, S. R. MacEwen, A. Makinde, R. Perrin, (2004). *Experimental Investigation of the Biaxial Behaviour of an Aluminium Sheet*. *Int. J. Plasticity*, 20(8-9):1677-1706.

P. Groover, (2002). *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc, USA, 1008.

Hailian Li, Hongwei Zhao, Chunyang Luo, Lijia Li, He Zhang, (2017). *Research on Design and Simulation of Biaxial Tensile-Bending Complex Mechanical Performance Test Apparatus*. *Micromachines*, 8(9):286.

A. Hannon, P. Tiernan, (2008). A Review of Planar Biaxial Tensile Test. *Journal of Materials Processing Technology*, 198:1-13.

E. Hoferlin, A. Van Bael, P. Van Houtte, G. Steyaert, C. De Maré, (2000). The Design of a Biaxial Tensile Test and Its Use for the Validation of Crystallographic Yield Loci. *Model. Simulat. Mater. Sci Eng.* 8:423-433.

C. Jones, (2005). Biaxial Testing of Polymer Composites. *Mater. World*, 9(11):19-21.

A. C. Keefe, G. P. Carman, P. Jardine, (1998). Torsional Behaviour of Shape Memory Alloys. *Smart Struct. Mater.* 3324:58-67.

K. A. Khoiy, S. Abdulhai, I. C. Glenn, T. A. Ponsky, R. Amini, (2018). Anisotropic and Nonlinear Biaxial Mechanical Response of Porcine Small Bowel Mesentery. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 78:154-163.

T. Kuwabara, S. Ikeda, K. Kuroda, (1998). Measurement and Analysis of Differential Work Hardening in Cold Rolled Steel Sheet Under Biaxial Tension. *J. Mater. Process. Technol.* 80-81:517-523

T. Kuwabara, S. Ikeda, (2002). Plain-Strain Tension Test of Steel Sheet Using Servo-Controlled Biaxial Tensile Testing Machine. *Proceedings of 5th ESAFORM Conference, Krakow, April* 499-502.

D. Li, A. Ghosh, (2004). Biaxial Warm Forming Behaviour of Aluminium Sheet Alloys. *J. Mater. Process. Technol.* 145:281-293.

J. Lian, M. Sharaf, F. Archie, S. Muenstermann, (2013). A Hybrid Approach for Modelling of Plasticity and Failure Behaviour of Advanced High-Strength Steel Sheets. *International Journal of Damage Mechanics*, 22(2):188-218.

E. López Alba, R. López García, R. Dorado, F. A. Díaz, (2012). Aplicación de Correlación Digital de Imágenes para el Análisis de Problemas de Contacto. Dpto. Ingeniería Mecánica y Minera, Campus las Lagunillas, Jaén.

A. Makinde, L. Thibodeau, K. W. Neale, (1992). Development of an Apparatus for Biaxial Testing for Cruciform Specimens. *Exp. Mech.* 32:138-144.

A. J. Martínez-Donaire, (2012). Análisis del Efecto del Gradiente de Deformaciones en el Conformado de Chapa Metálica. Tesis. Universidad de Sevilla.

J. L. Martínez Vicente, (2016). Estados de Tensión y de Deformación en Materiales Compuestos Reforzados con Fibra ante Diferentes Casos de Carga. Universidad de Castilla la Mancha.

M. Merklein, M. Biasutti, (2013). Development of a Biaxial Tensile Machine for Characterization of Sheet Metals. *Journal of Materials Processing Technology* 213:939-946.

A. Meunier, O. Riot, P. Christel, J. L. Katz, L. Sedel, (1989). Inhomogeneities in Anisotropic Elastic Constants of Cortical Bone. *Ultrasonics Symposium*, 1015-1018.

T. Namazu, H. Yamagiwa, S. Inoue, (2013). Tension-Torsion Combined Loading Test Equipment for a Minute Beam Specimen. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 135(1):011004.

J. A. Peña, V. Corral, M. A. Martínez, E. Peña, (2018). Over Length Quantification of the Multiaxial Mechanical Properties of the Ascending, Descending and Abdominal Aorta Using Digital Image Correlation. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 77:434-445.

L. F. Puente Medellín, J. A. Diosdado De La Peña, (2016). Design of a Biaxial Test Module for Uniaxial Testing Machine. *Materials Today*, 4:7911-7920.

- E. Rincón Rincón, A. Ros Felip, R. Claramunt Alonso, F. Arranz Merino, (2004). Caracterización Mecánica del Material Óseo. Escuela Politécnica Superior, Universidad Alfonso X el Sabio, Madrid.
- M. Ruiz García, (2015). Ensayos para la Evaluación de Propiedades Mecánicas en Fémures de Rata. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla.
- S. K. Saha, M. L. Culpepper, (2015). Design of a Compact Biaxial Tensile Stage for Fabrication and Tuning of Complex Micro and Nano Scale Wrinkle Patterns. *Journal of Micro and Nano Manufacturing*, 3(4):041004.
- A. Sanyal, T. M. Keaveny, (2013). Biaxial Normal Strength Behaviour in the Axial-Transverse Plane for Human Trabecular Bone. Effects of Bone Volume Fraction, Microarchitecture, and Anisotropy. *Journal of Biomechanical Engineering*, 135.
- M. Schodel, U. Zerbst, C. Donne, (2006). Application of the European Flaw Assessment Procedure SINTAP to Thin Wall Structures Subjected to Biaxial and Mixed Mode Loadings. *Eng. Fract. Mech.* 73:626-642.
- R. Serrano Cabello, (2015). Técnica de Videocorrelación Aplicada al Estudio del Contacto entre Sólidos. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla.
- A. Shimamoto, T. Shimomura, J. Nam, (2003). The Development of a Servo Dynamic Loading Device. *Key Eng. Mater.* 243-244:99-107.
- S. R. Soni, M. Balan, C. Cross, (2003). Response Characteristics of Composites Under Combined Bending and In-Plane Loading. *SAMPE 2003*.
- S. E. Szczesny, J. M. Peloquin, D. H. Cortes, J. A. Kadlowec, L. J. Soslowsky, D. M. Elliott, (2012). Biaxial Tensile Testing and Constitutive Modeling of Human Supraspinatus Tendon. *Journal of Biomechanical Engineering*, 134.

P. Sztetek, M. Vanleene, R. Olsson, R. Collison, A. A. Pitsillides, S. Shefelbine, (2010). Using Digital Image Correlation to Determine Bone Surface Strains During Loading and After Adaptation of the Mouse Tibia. *Journal of Biomechanics*, 43:599-605.

J. J. Vlassak, W. D. Nix, (1992). A New Bulge Test Technique of Young's Modulus and Poisson's Ratio of Thin Films. *J. Mater. Res.* 7(12):3242-3249.

W. Xiang-Dong, M. Wan, Z. Xian-Bin (2005). Biaxial Tensile Testing of Cruciform Specimen Under Complex Loading. *J. Mater. Process. Technol.* 168:181-183.

R. Xiao, X. X. Li, L. H. Lang, Y. K. Chen, Y. F. Yang (2016). Biaxial Tensile Testing of Cruciform Slim Superalloy at Elevated Temperatures. *Materials & Design*, 94:286-294.

H. S. Yoon, J. L. Katz, (1976). Ultrasonic Wave Propagation in Human Cortical Bone. Measurements of Elastic Properties and Microhardness. *Journal of Biomechanics*, 9:459-464.

Z. Yuan, F. Li, P. Zhang, B. Chen, F. Xue (2014). Mechanical Properties Study of Particles Reinforced Aluminium Matrix Composites by Micro-indentation Experiments. *Chin. J. Aeronaut.* 27:397-406.

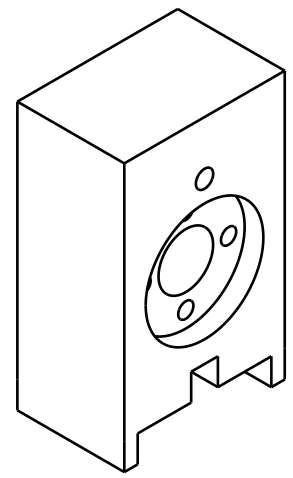
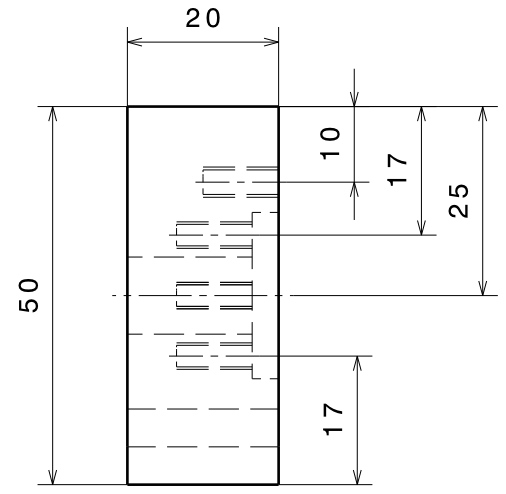
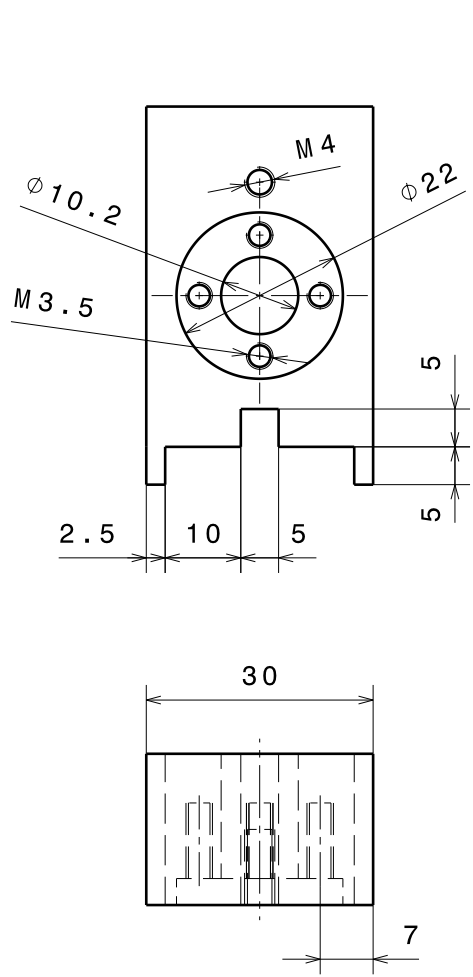
W. Zhang, X. L. Gong, T. L. Sun, Y. C. Fan, W. Q. Jiang (2010). Effect of Cyclic Deformation on Magnetorheological Elastomers. *Chin. J. Chem. Phys.* 23:226-230.

# ANEXO. PLANOS

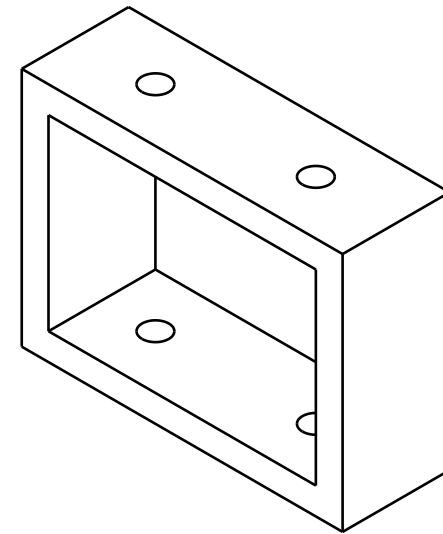
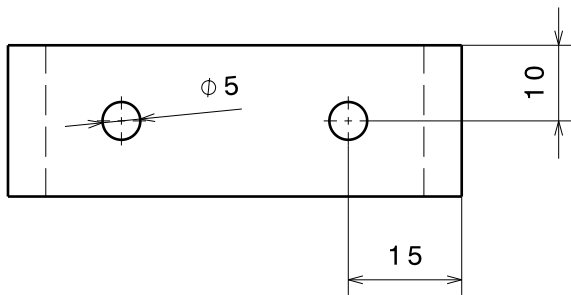
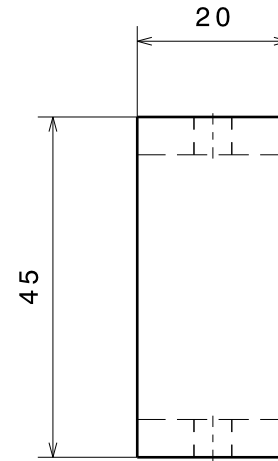
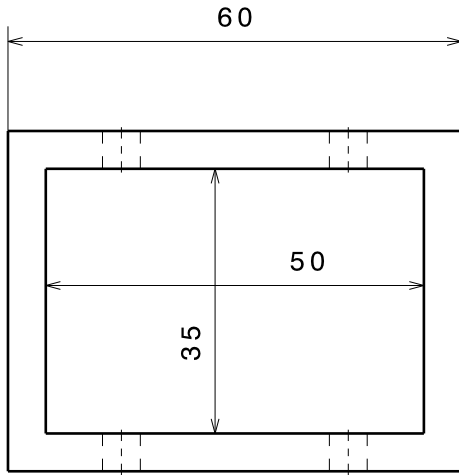
---



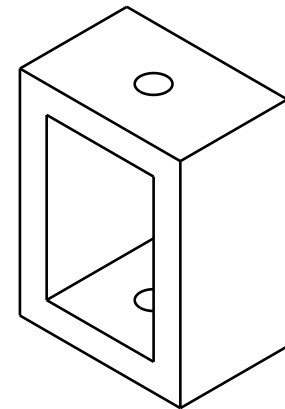
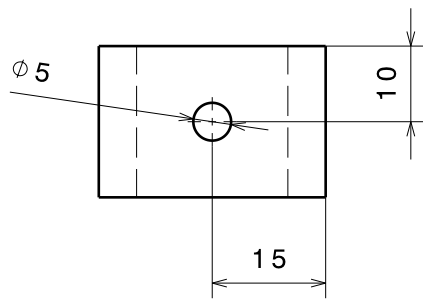
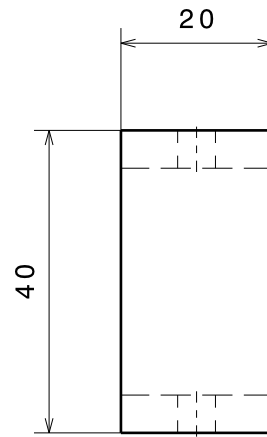
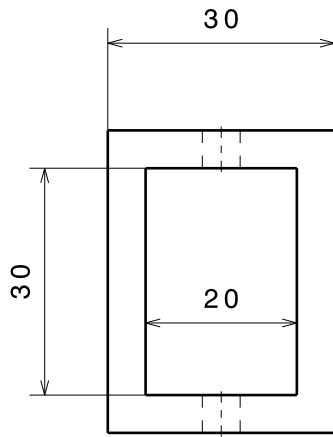


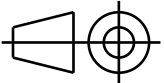


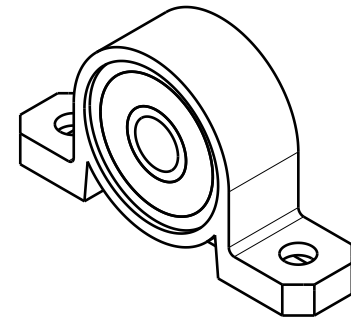
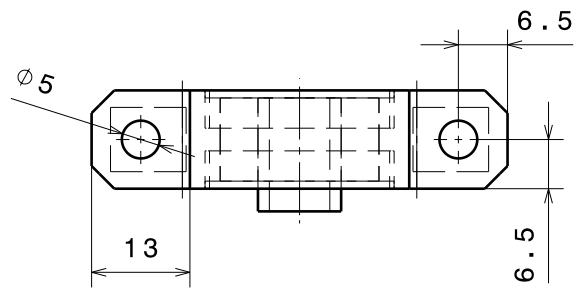
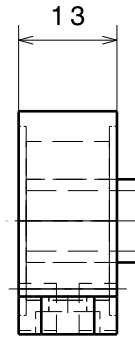
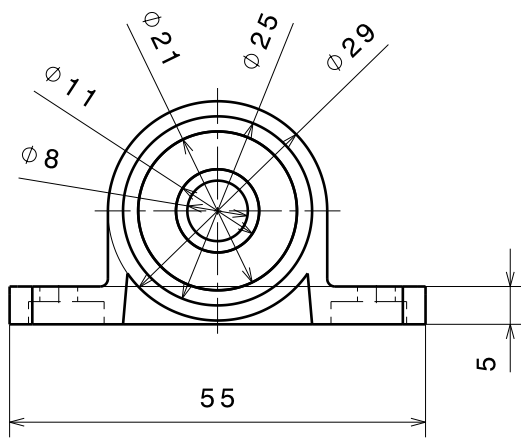
FORMATO <b>A4</b>	FECHA 14/06/18	PIEZA <b>Accionador</b>	
ESCALA <b>1:1</b>		AUTOR José Rodríguez Vallés	MATERIAL PLA



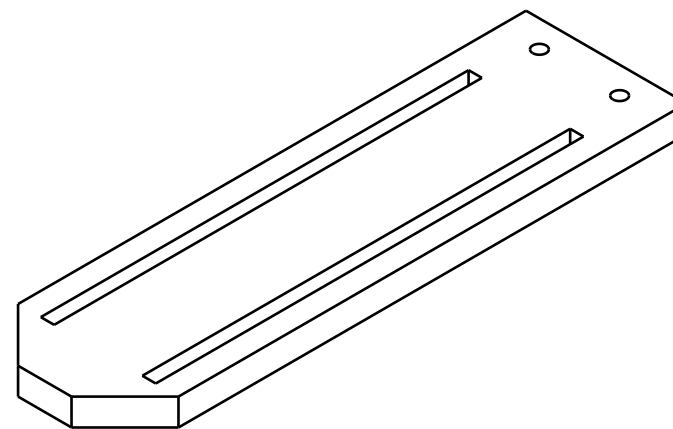
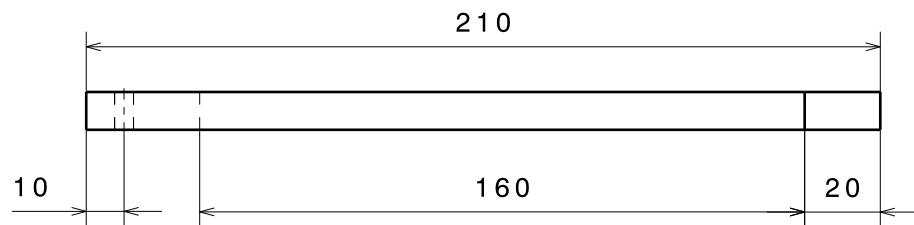
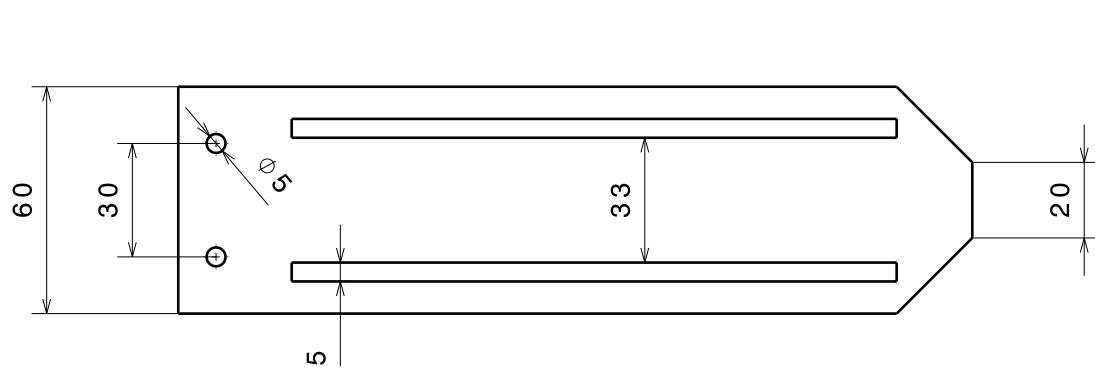
FORMATO <b>A4</b>	FECHA 14/06/18	PIEZA <b>Apoyo</b>	
ESCALA <b>1:1</b>		AUTOR José Rodríguez Vallés	MATERIAL PLA

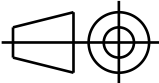


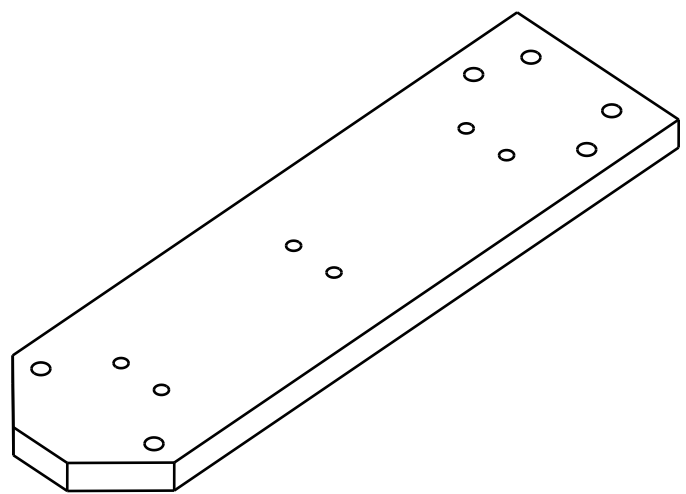
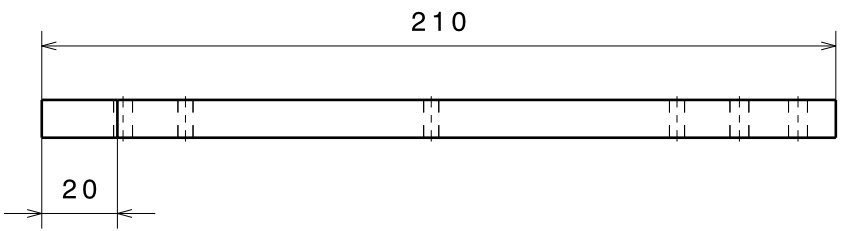
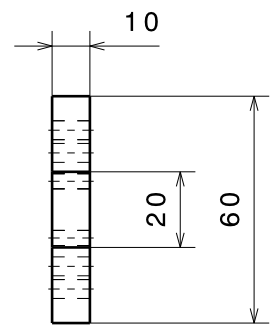
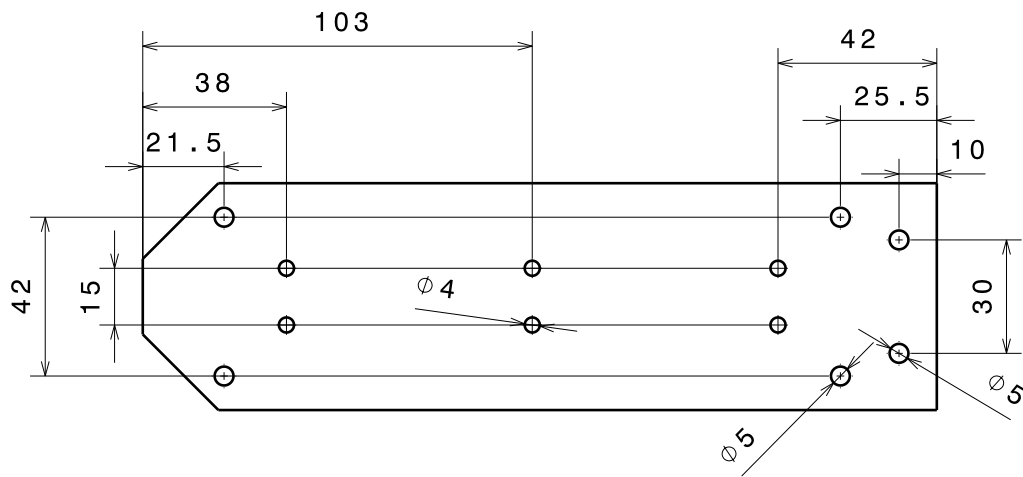
FORMATO <b>A4</b>	FECHA 14/06/18	PIEZA <b>Apoyo central</b>	
ESCALA <b>1:1</b>		AUTOR José Rodríguez Vallés	MATERIAL PLA

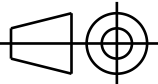


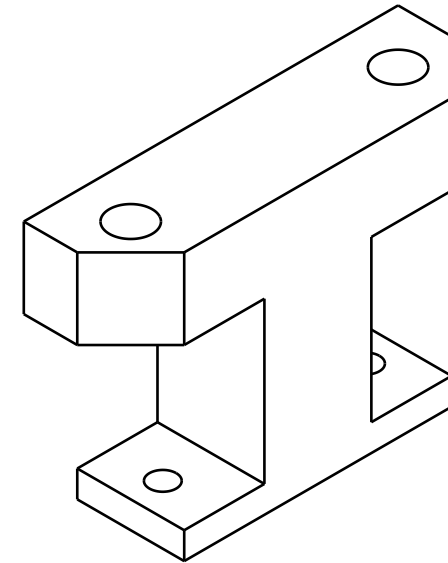
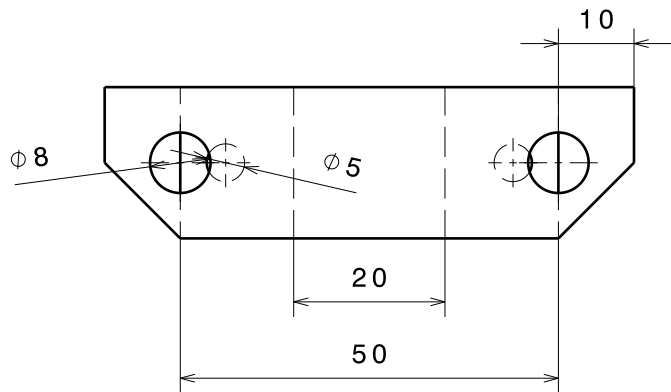
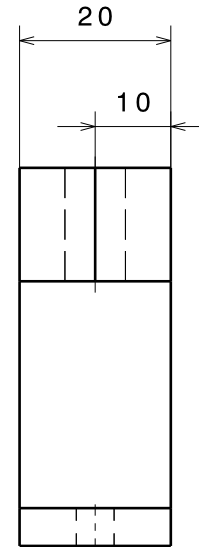
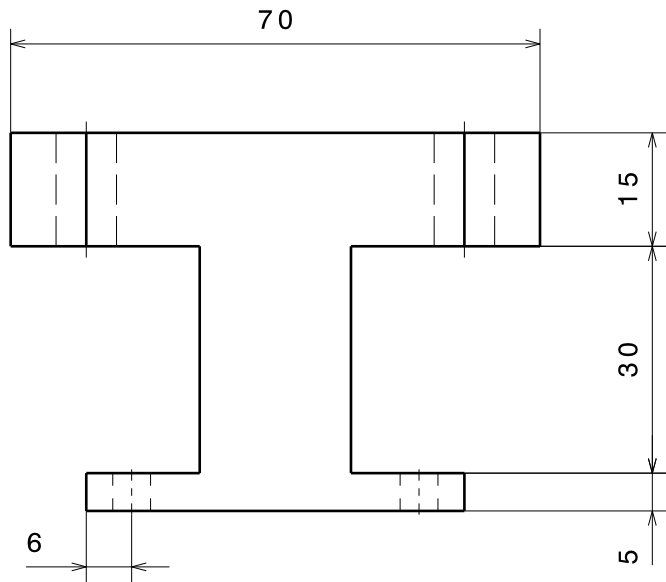
FORMATO <b>A4</b>	FECHA 14/06/18	PIEZA <b>Cojinete</b>	
ESCALA <b>1:1</b>		AUTOR José Rodríguez Vallés	MATERIAL Aleación de Zinc

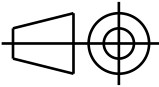


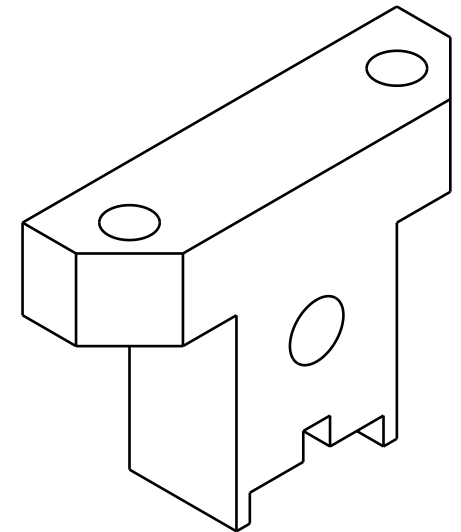
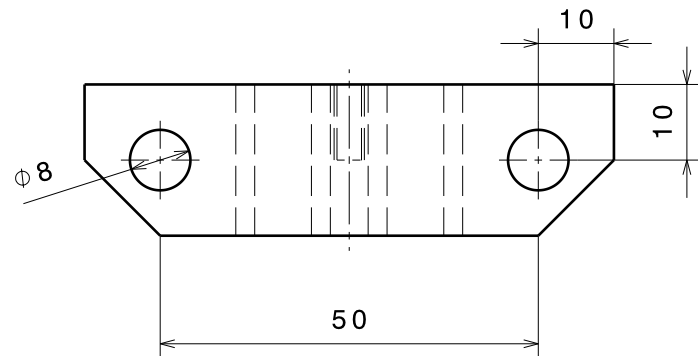
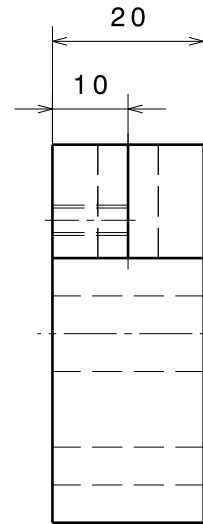
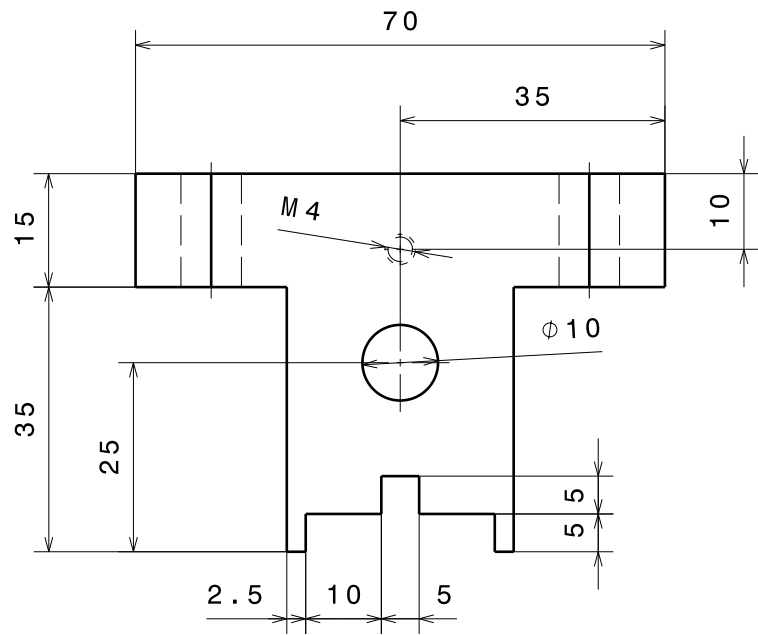
FORMATO <b>A4</b>	FECHA 14/06/18	PIEZA <b>Estructura base fija</b>	
ESCALA <b>1:2</b>		AUTOR José Rodríguez Vallés	MATERIAL PLA



FORMATO <b>A4</b>	FECHA 14/06/18	PIEZA <b>Estructura base móvil</b>	
ESCALA <b>1:2</b>		AUTOR José Rodríguez Vallés	MATERIAL PLA

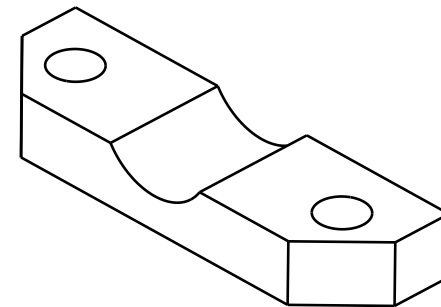
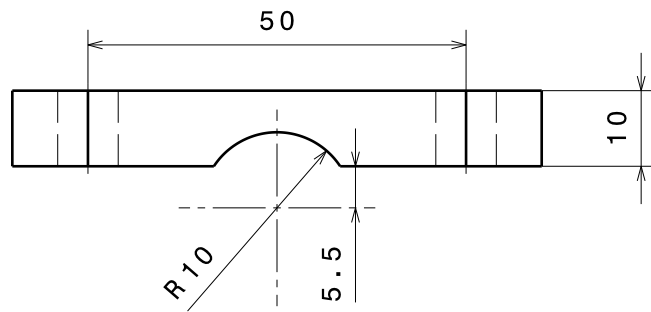
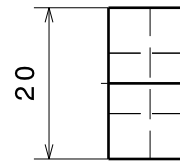
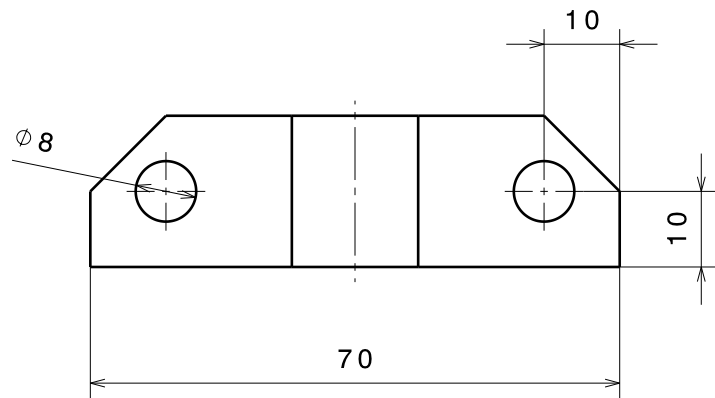


FORMATO <b>A4</b>	FECHA 14/06/18	PIEZA <b>Mordaza base fija</b>	
ESCALA <b>1:1</b>		AUTOR José Rodríguez Vallés	MATERIAL PLA

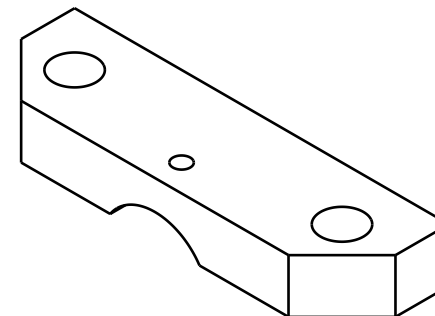
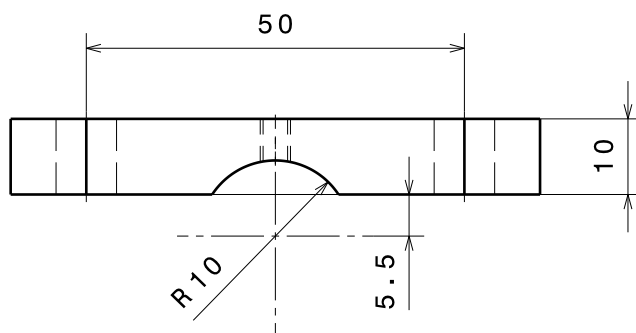
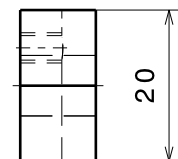
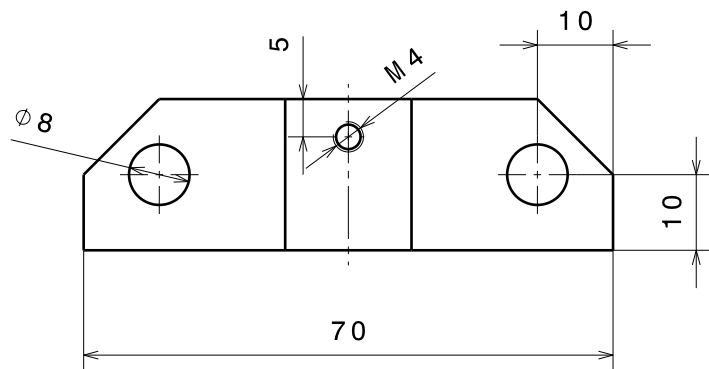


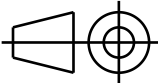
FORMATO <b>A4</b>	FECHA 14/06/18	PIEZA <b>Mordaza base móvil</b>	
ESCALA <b>1:1</b>		AUTOR José Rodríguez Vallés	MATERIAL PLA

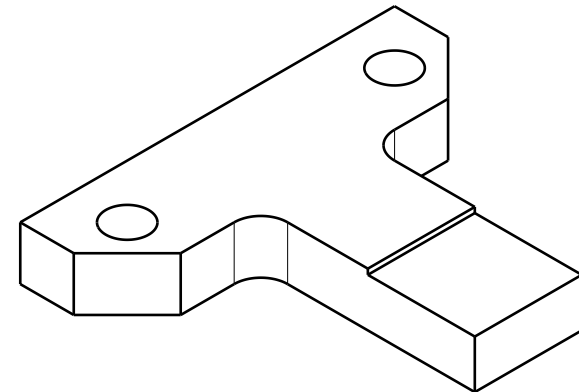
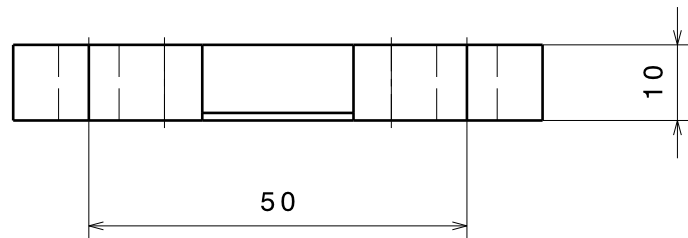
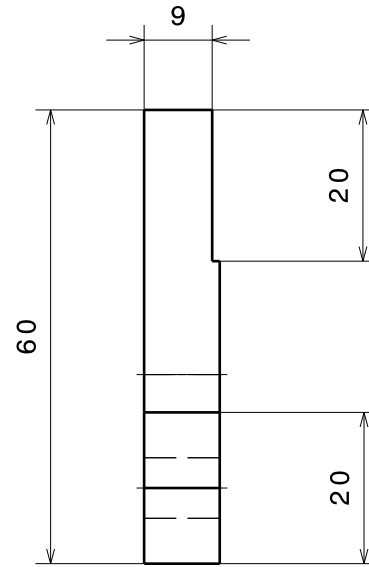
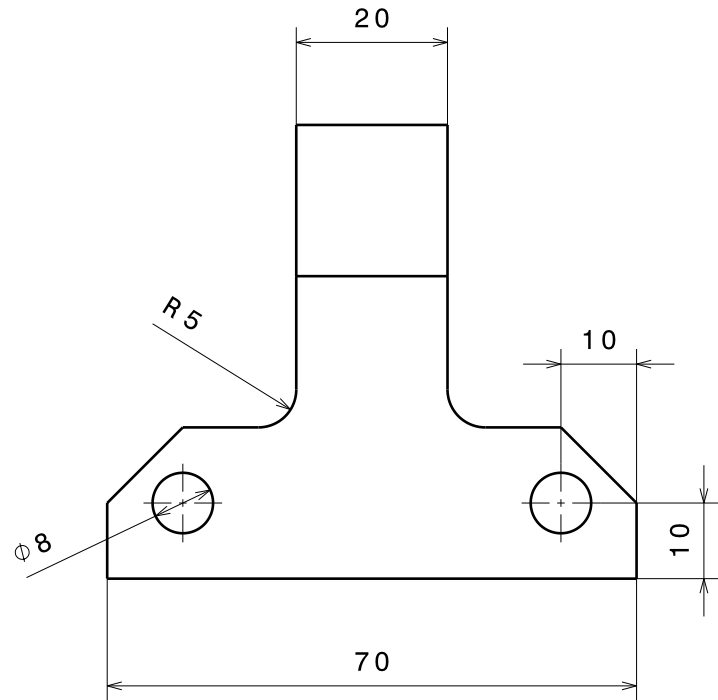


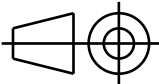


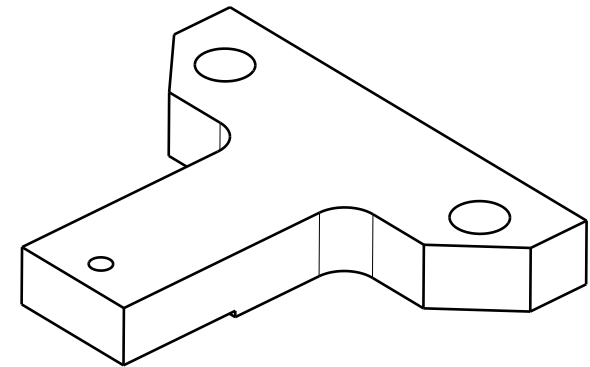
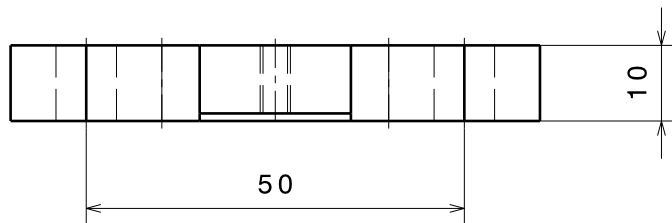
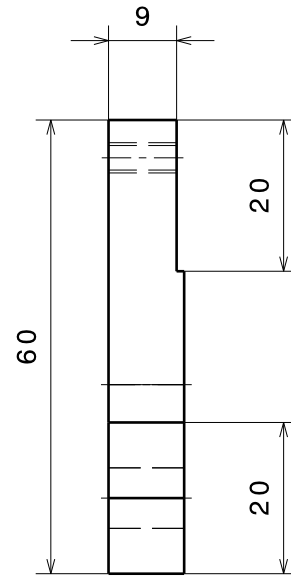
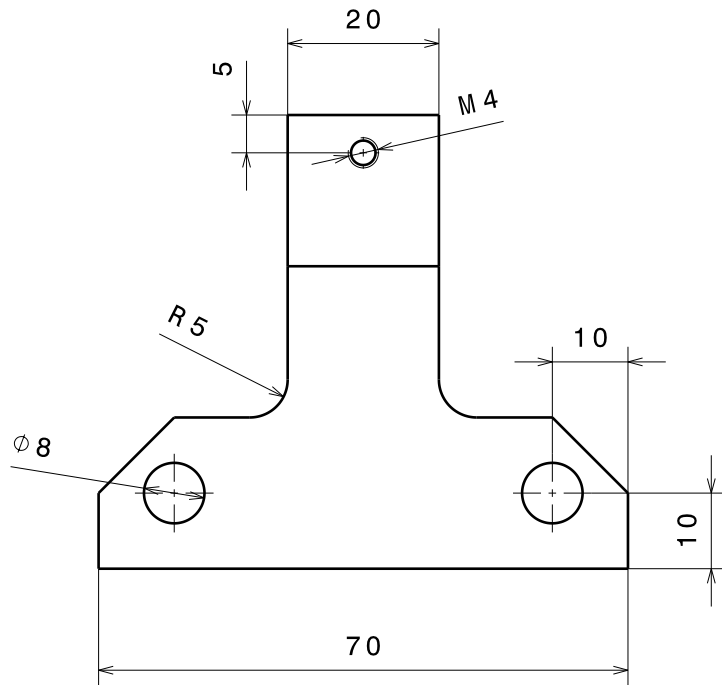
FORMATO <b>A4</b>	FECHA 14/06/18	PIEZA <b>Mordaza cilíndrica inferior</b>	
ESCALA <b>1:1</b>		AUTOR José Rodríguez Vallés	MATERIAL PLA



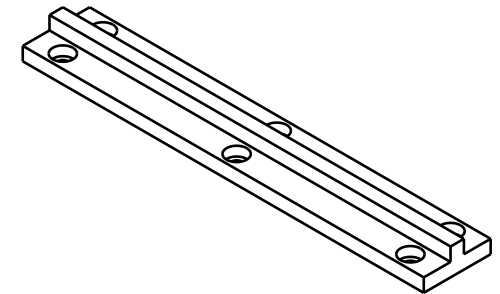
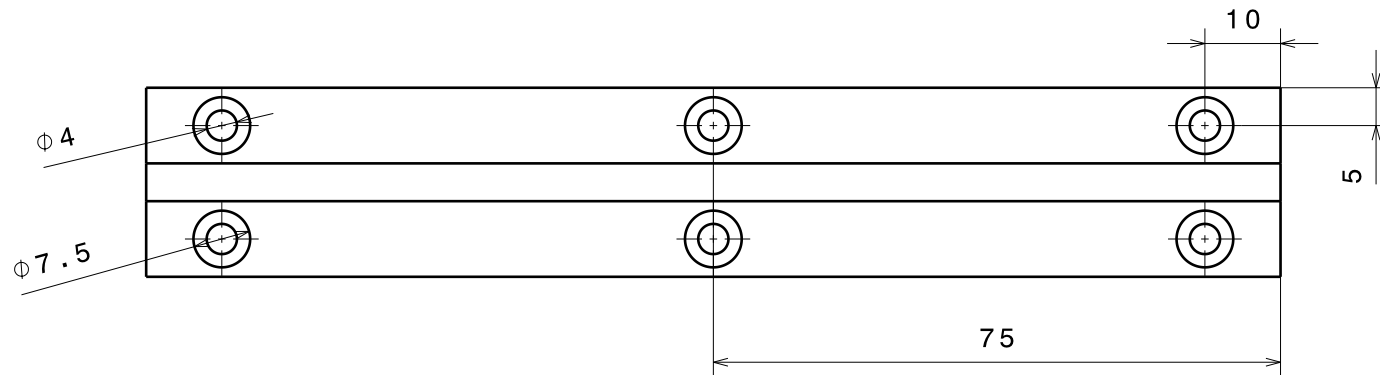
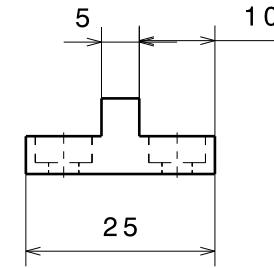
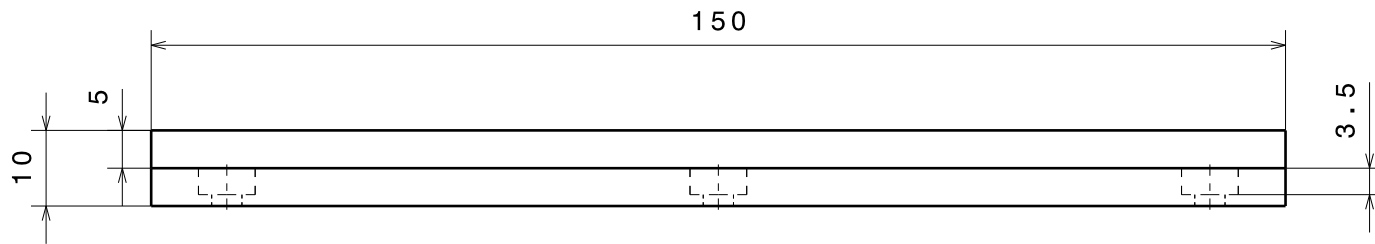
FORMATO <b>A4</b>	FECHA 14/06/18	PIEZA <b>Mordaza cilíndrica superior</b>	
ESCALA <b>1:1</b>		AUTOR José Rodríguez Vallés	MATERIAL PLA

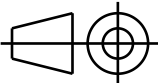


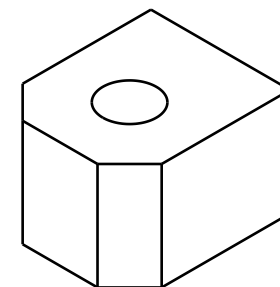
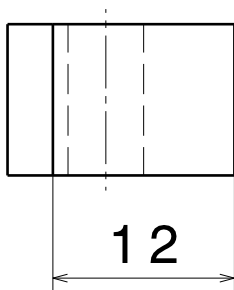
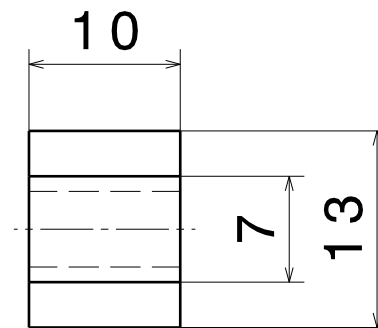
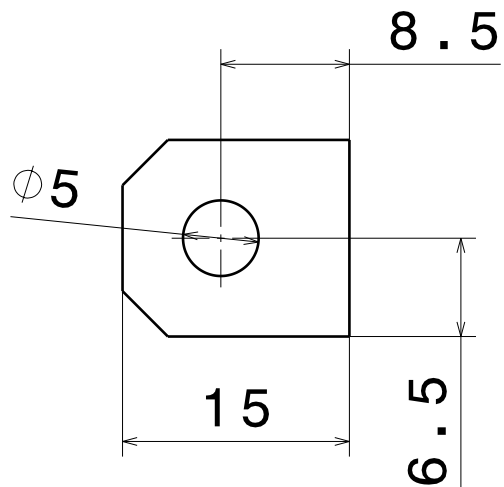
FORMATO <b>A4</b>	FECHA 14/06/18	PIEZA <b>Mordaza rectangular inferior</b>	
ESCALA <b>1:1</b>		AUTOR José Rodríguez Vallés	MATERIAL PLA

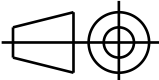


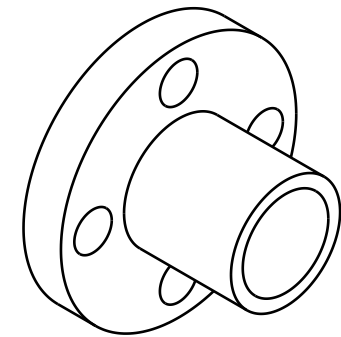
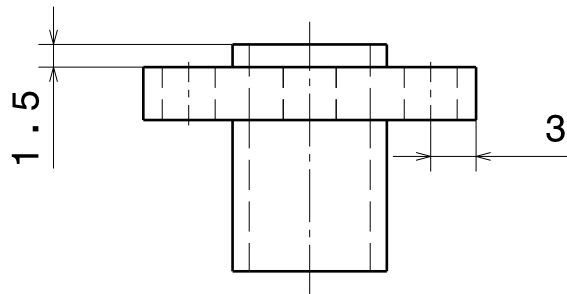
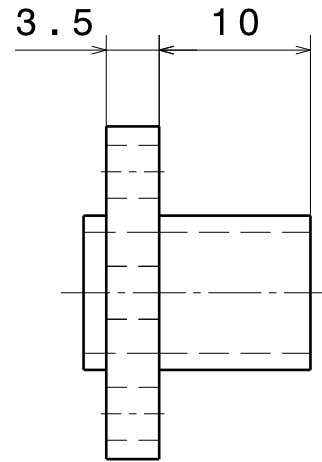
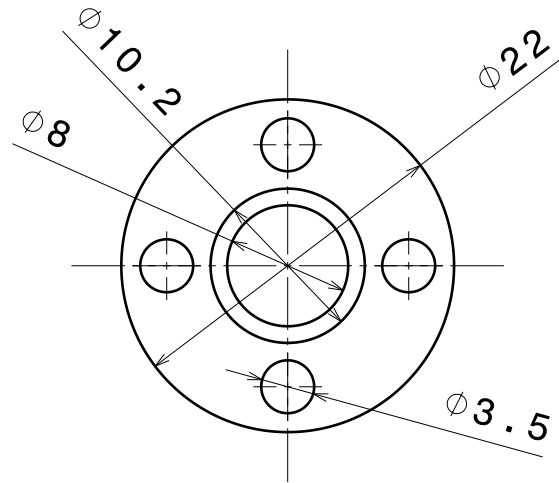
FORMATO <b>A4</b>	FECHA 14/06/18	PIEZA <b>Mordaza rectangular superior</b>	
ESCALA <b>1:1</b>		AUTOR José Rodríguez Vallés	MATERIAL PLA

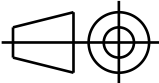


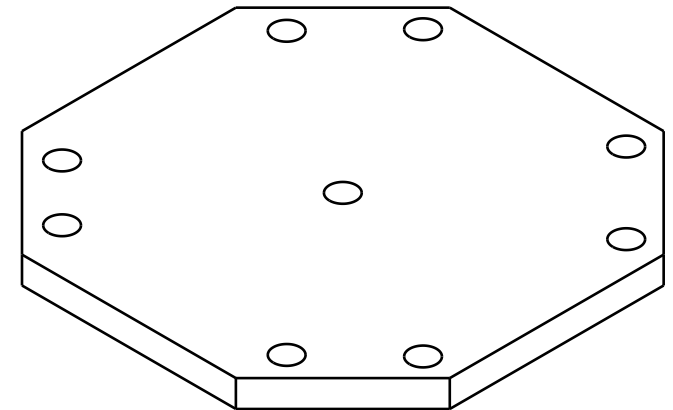
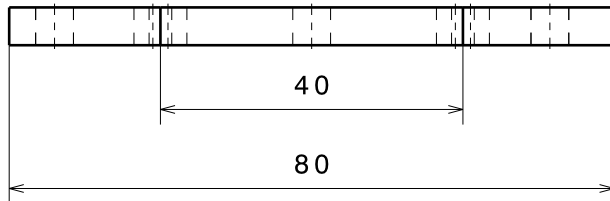
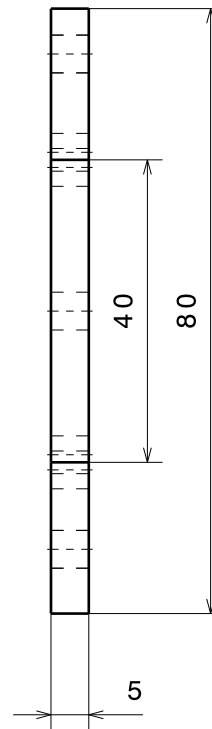
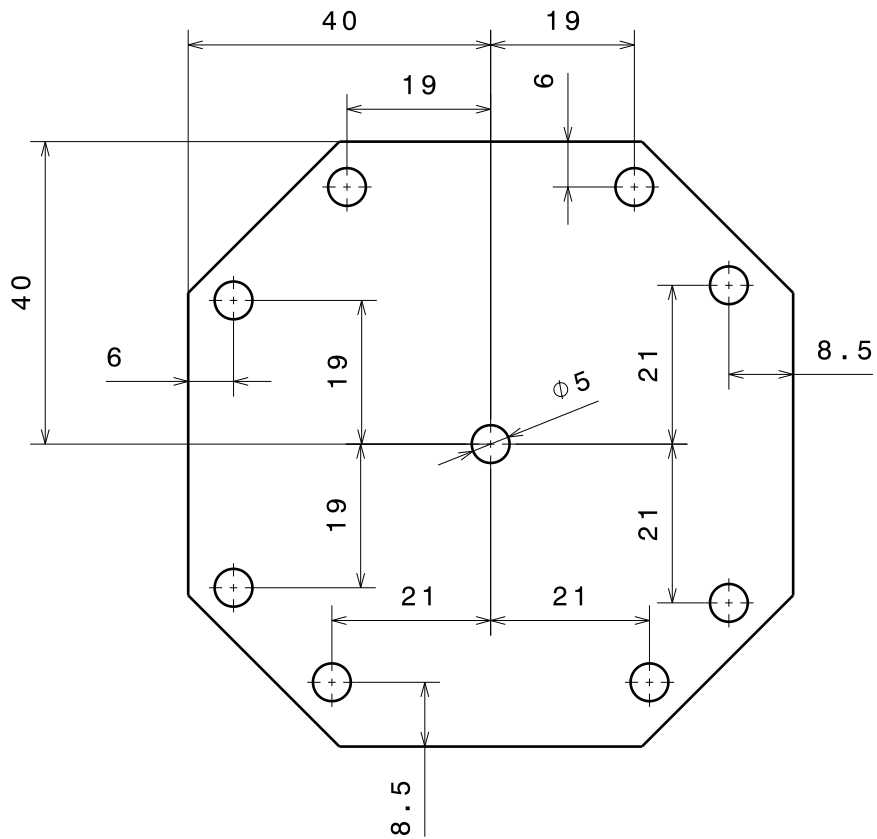
FORMATO <b>A4</b>	FECHA 14/06/18	PIEZA <b>Rail</b>	
ESCALA <b>1:1</b>		AUTOR José Rodríguez Vallés	MATERIAL PLA

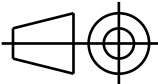


FORMATO <b>A4</b>	FECHA 14/06/18	PIEZA <b>Suplemento de cojinete</b>	
ESCALA <b>2:1</b>		AUTOR José Rodríguez Vallés	MATERIAL PLA



FORMATO <b>A4</b>	FECHA 14/06/18	PIEZA <b>Tuerca</b>	
ESCALA <b>2:1</b>		AUTOR José Rodríguez Vallés	MATERIAL Latón



FORMATO <b>A4</b>	FECHA 14/06/18	PIEZA <b>Unión central</b>	
ESCALA <b>1:1</b>		AUTOR José Rodríguez Vallés	MATERIAL PLA