



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y fabricación de una máquina de ensayos de torsión

Autor: Gonzalo Aguirre Estalella

Director: Juan Carlos del Real Romero

Madrid

Junio de 2026

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Diseño y fabricación de una máquina de ensayos de torsión en la ETS de Ingeniería - ICAI
de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2025/26 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Gonzalo Aguirre Estalella

Fecha: 06/07/2026

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Juan Carlos del Real Romero

Fecha: 06/07/2026



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y fabricación de una máquina de ensayos de torsión

Autor: Gonzalo Aguirre Estalella

Director: Juan Carlos del Real Romero

Madrid

Junio de 2026

Agradecimientos

A la comunidad religiosa de Cerro del Coto y a las Siervas de los Pobres, por su acogida continua durante este proyecto.

Al Laboratorio de Materiales de ICAI y todo el personal de la escuela.

A mi familia, por haber estado ahí siempre.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA MÁQUINA DE ENSAYOS DE TORSIÓN

Autor: Aguirre Estalella, Gonzalo.

Director: del Real Romero, Juan Carlos.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente proyecto de fin de grado tiene por objetivo principal el diseño y fabricación de una máquina para ensayos mecánicos de torsión de bajo par (hasta aproximadamente 10Nm), particularmente indicada para el ensayo de muestras biológicas y biomodelos, así como la caracterización de materiales biológicos.

Palabras clave: Ensayo mecánico, ensayo de torsión, biomodelos.

1. Introducción

Se denomina ensayo mecánico al proceso experimental de determinación de las propiedades mecánicas de un material, mediante la evaluación de su comportamiento frente a ciertas condiciones de carga y esfuerzo. Los ensayos mecánicos más comunes son los de tracción, compresión, dureza, flexión e impacto. Sin embargo, en el caso de materiales heterogéneos o anisótropos, así como en piezas de geometrías complejas, se hacen necesarios ensayos adicionales, entre los cuales destacamos el ensayo de torsión.

El ensayo de torsión permite determinar el comportamiento de un material frente a esfuerzos cortantes. Este ensayo es de particular interés para muestras biológicas, ya que están formadas por materiales heterogéneos y anisótropos (hueso, cartílago, etc.), y a menudo se ven sometidas a condiciones de carga muy complejas. También es relevante este ensayo para la evaluación de biomodelos.

2. Definición del proyecto

Este proyecto tiene varias partes claramente diferenciadas, a saber: estado del arte, diseño de la máquina, fabricación e implementación.

Cada una de estas etapas surge a partir de la conclusión de la etapa anterior, es decir, se diseñará una máquina que supla las necesidades que no suple el sistema actual de ensayos, se fabricará la herramienta según los parámetros obtenidos en el diseño, y se implementará dicha herramienta una vez haya sido fabricada.

3. Descripción del modelo

El equipo, en esencia, tiene dos funciones. La primera es la de provocar el giro controlado de un extremo de la pieza mediante la aplicación de un par, la segunda es la de capturar información sobre la magnitud de dicho giro y el par aplicado, para así obtener una curva par torsor – carrera que, con información sobre la muestra, permita caracterizar el material.

Para esto, la máquina dispone de una mordaza fija (que sujeta el extremo fijo de la muestra) y de una mordaza giratoria (que provoca el giro del extremo opuesto), estas dos mordazas quedan montadas sobre un bastidor fabricado con perfiles extruidos de aluminio mediante tornillos y piezas de acople.

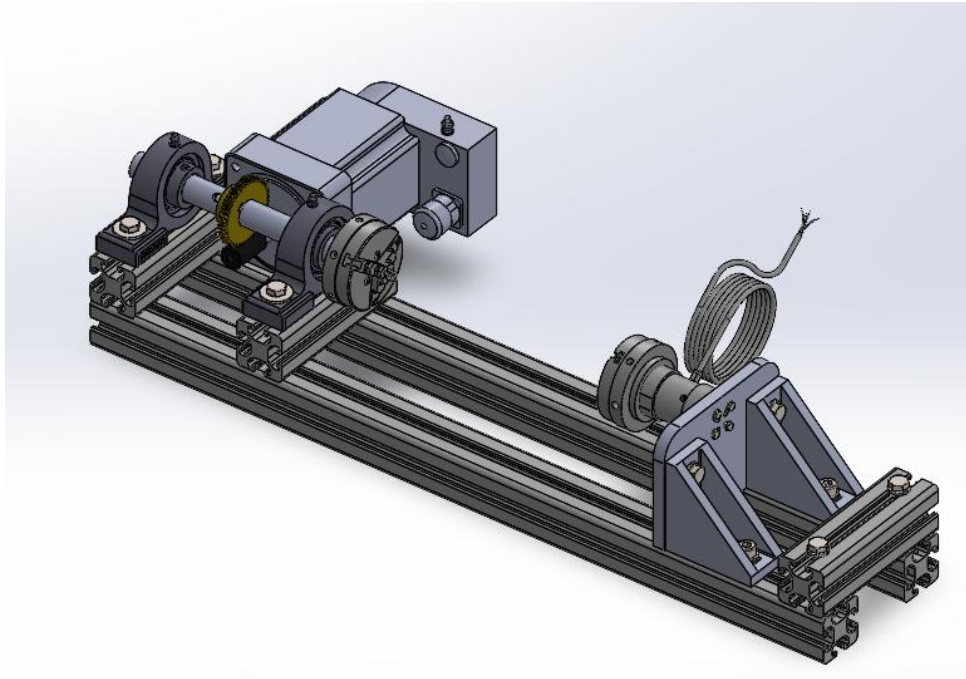


Figura 1 Vista general del modelo CAD de la máquina.

Las características más importantes de este diseño son la rigidez a torsión del bastidor (para garantizar que este sirve como referencia de ángulo incluso bajo carga) y la capacidad de evitar estados tensionales complejos, debidos al efecto de la gravedad o de errores de alineamiento, que tergiversarían la medida.

4. Resultados

Del trabajo realizado se ha obtenido un diseño exhaustivo para una máquina de ensayos de torsión que, además, es fácilmente adaptable para realizar ensayos de tracción – torsión (siendo estos una variación típica del ensayo fundamental de torsión).

Un análisis exhaustivo del diseño mediante herramientas de CAD y FEA prevé una rigidez torsional perfectamente aceptable para los rangos de carga esperados, y un correcto funcionamiento del conjunto.

Debido a cuestiones de plazo, no ha sido posible fabricar el aparato antes de la presentación de este TFG, por lo que la fabricación se llevará a cabo el siguiente curso académico a partir del modelo recogido en esta memoria.

5. Conclusiones

Se ha diseñado una máquina de ensayos de torsión de bajo par especialmente indicada para la caracterización de tejido biológico y de biomodelos. El equipo resultante de este diseño resultará medianamente sencillo a la par que preciso.

Terminada esta fase, la siguiente es, naturalmente, la fabricación y programación de la máquina.

6. Referencias

Wang, X. et al. (2010). *Fundamental Biomechanics in Bone Tissue Engineering*. Morgan & Claypool.

Organización Internacional de Normalización. (2024). *Materiales metálicos. Alambre. Ensayo de torsión simple (Norma ISO 7800:2024)*.

Martins da Costa, M. (2015). *Torsion Testing: A Comprehensive Guide to Engineering Analysis*. Obtenido de biopdi.com: <https://biopdi.com/torsion-testing/>

DESIGN AND FABRICATION OF A TORSION TEST MACHINE

Author: Aguirre Estalella, Gonzalo.

Supervisor: del Real Romero, Juan Carlos.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

The primary objective of this undergraduate thesis project is the design and manufacturing of a machine for low-torque mechanical torsion testing (up to approximately 10 Nm), particularly suited for testing biological samples and biomodels, as well as the characterization of biological materials.

Keywords: Mechanical test, torsion test, biomodels.

1. Introduction

A mechanical test is defined as the experimental process of determining the mechanical properties of a material through the evaluation of its behavior under certain loading and stress conditions. The most common mechanical tests are tensile, compressive, hardness, bending, and impact tests. However, in the case of heterogeneous or anisotropic materials, as well as in components with complex geometries, additional tests become necessary, among which we highlight the torsion test.

The torsion test allows for the determination of a material under shear stress. This test is of particular interest for biological samples, as they are composed of heterogeneous and anisotropic materials (bone, cartilage, etc.) and are often subjected to very complex loading conditions. This test is also relevant to the evaluation of biomodels.

2. Project definition

This project comprises several clearly differentiated phases, namely: state-of-the-art, machine design, manufacturing, and implementation.

Each of these stages emerges from the conclusion of the previous stage; that is, a machine will be designed to meet the needs not addressed by the current testing system, the tool will be manufactured according to the parameters obtained in the design phase, and the tool will be implemented once it has been manufactured.

3. Description of the model

The device, in essence, has two functions. The first is to provoke the controlled rotation of one end of the specimen through the application of a torque; the second is to capture information about the magnitude of said rotation and torque, in order to characterize the tested specimen.

For this purpose, the machine is equipped with a fixed jaw (which holds the fixed end of the specimen) and a rotating jaw (which causes the rotation of the opposite end of the specimen). These two jaws are mounted on a frame made of aluminum extrusions by means of screws.

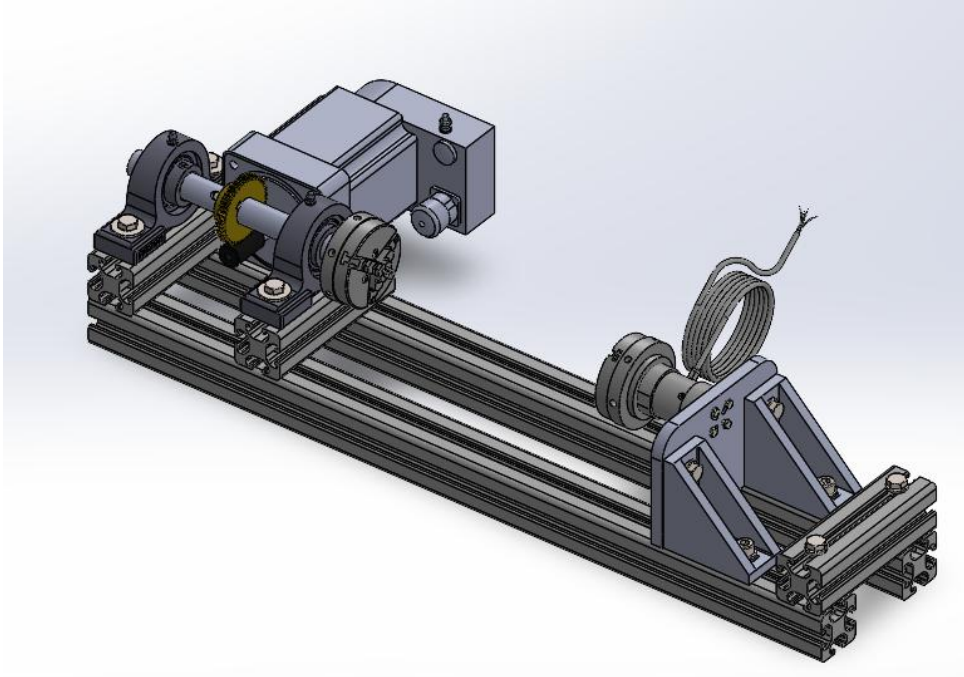


Figure 1 General view of the CAD model of the machine.

The main characteristics of this design are torsional rigidity (in order to guarantee an angular reference even when under load) and the ability to avoid complex tensional states, caused by gravity or alignment errors, which would cause the measurements to be imprecise.

4. Results

A comprehensive design has been obtained for a torsion testing machine that is, furthermore, easily adaptable for conducting tensile–torsion tests (these being a typical variation of the fundamental torsion test).

An exhaustive design analysis by means of CAD and FEA tools foresees a perfectly acceptable torsional rigidity for the expected load range, and a correct overall performance of the assembly.

Due to time constraints, it has not been possible to manufacture the apparatus prior to the presentation of this Final Project, this is why manufacturing will be undertaken in the following academic year, based on the design documented in this document.

5. Conclusions

A low-torque torsion testing apparatus has been developed specifically for the characterization of biological tissues and biomodels. The resulting equipment will combine practical simplicity with precision.

Following the completion of this phase, the next stage necessarily encompasses the fabrication and programming of the apparatus.

6. References

Wang, X. et al. (2010). *Fundamental Biomechanics in Bone Tissue Engineering*. Morgan & Claypool.

Organización Internacional de Normalización. (2024). *Materiales metálicos. Alambre. Ensayo de torsión simple (Norma ISO 7800:2024)*.

Martins da Costa, M. (2015). *Torsion Testing: A Comprehensive Guide to Engineering Analysis*. Obtenido de biopdi.com: <https://biopdi.com/torsion-testing/>

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Motivación del proyecto.....	8
1.2 Estructura de la memoria.....	9
Capítulo 2. Estado del arte	10
2.1 Caracterización mecánica de materiales.....	10
2.1.1 Ensayos destructivos	10
2.1.2 Ensayos no destructivos	13
2.2 Ensayo de torsión	14
2.2.1 Experiencias previas en ICAI.....	15
2.2.2 En la industria	16
2.3 Muestras a ensayar	17
Capítulo 3. Alcance del proyecto.....	19
3.1 Justificación del diseño	19
3.1.1 Límites de los ensayos manuales	19
3.1.2 Aprendizaje a partir de la experiencia	20
3.2 Objetivos	21
3.3 Metodología.....	22
3.4 Planificación.....	23
3.4.1 Planificación temporal	23
Capítulo 4. Diseño del equipo	25
4.1 Introducción.....	25
4.1.1 Normativa y estándares	25
4.2 Selección de materiales	27
4.2.1 Material para el bastidor	28
4.3 Diseño de la zona de ensayo.....	29
4.3.1 Par máximo	29
4.3.2 Giro admisible.....	30
4.3.3 Longitud admisible.....	31
4.4 Diseño 3D.....	31

4.4.1 Bastidor	32
4.4.2 Bloque motor	34
4.4.3 Bloque de medición	38
4.5 Análisis de elementos finitos.....	42
4.5.1 Fijación	43
4.5.2 Cargas	43
4.5.3 Materiales.....	44
4.5.4 Mallado	45
4.5.5 Resultados	47
4.5.6 Conclusiones del FEA	49
Capítulo 5. Control y captación de datos.....	50
5.1 Control del motor	50
5.2 Captación de datos.....	51
5.2.1 Par torsor	52
5.2.2 Ángulo girado.....	52
5.2.3 La posibilidad de control en par	53
5.3 Interpretación de los datos.....	53
5.3.1 Extrapolación de la curva esfuerzo – carrera.....	53
Capítulo 6. Diseño final.....	56
Capítulo 7. Presupuesto.....	60
7.1 Coste de despiece	60
7.2 Célula de carga	62
7.3 Coste del equipo	64
7.4 Coste final	65
Capítulo 8. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	66
Capítulo 9. Bibliografía.....	67
ANEXO I: Declaración de originalidad y uso de IA.....	69
ANEXO II: Catálogo de piezas comerciales.....	71

<i>ANEXO III: Alineación con los ODS.....</i>	<i>75</i>
<i>ANEXO IV: Planos</i>	<i>77</i>

Índice de figuras

Figura 1 Vista general del modelo CAD de la máquina.....	8
Figura 2 Diagrama de un ensayo de tracción genérico (Wang, X. et al., 2010).....	11
Figura 3 Diagrama de un ensayo de compresión genérico (Wang, X. et al., 2010).....	11
Figura 4 Diagrama de un ensayo de flexión genérico, a 3 y a 4 puntos (Wang, X. et al., 2010).	12
Figura 5 Esquema de una probeta típica para un ensayo de fractura de tipo I y baja velocidad (Wang, X. et al., 2010)..	12
Figura 6 Esquema de los ensayos de impacto Charpy e Izod (Wang, X. et al., 2010).....	13
Figura 7 Esquema de un ensayo de torsión genérico (Martins da Costa, 2015).....	14
Figura 8 Ensayo de torsión manual sobre muestras de hueso de búho y detalle de estas. ..	15
Figura 9 Ejemplo de un equipo comercial para ensayos de torsión con control de ángulo INSTRON (Instron, 2026).....	16
Figura 10 Ejemplo de un equipo comercial para ensayos de torsión con control de vueltas UMI T-300 (Útiles y Máquinas Industriales, S.A., 2026).....	17
Figura 11 Muestras de huesos de búho con implantes de PLA y Nylon listas para su ensayo a torsión.	18
Figura 12 Proceso de embebido en resina de los extremos de muestras de PLA para su posterior ensayo a torsión.	20
Figura 13 Diagrama de Gantt tentativo.	24
Figura 14 Extracto de un conjunto de resultados de ensayos de torsión manuales sobre muestras de húmeros de búho.....	29
Figura 15 Extracto de un conjunto de resultados de ensayos de torsión manuales sobre muestras de tibiotarsos de búho.....	31
Figura 16 Explosionado del modelo CAD mostrando los distintos componentes.	32
Figura 17 Vista general del bastidor con sus componentes de conexión.	33
Figura 18 Explosionado del bastidor.	34

Figura 19 Vista general del conjunto motor, mostrando la disposición final de los elementos de unión.	35
Figura 20 Explosionado del bloque motor.	37
Figura 21 Vista general del bloque de medición.	39
Figura 22 Explosionado del bloque de medición.	41
Figura 23 Representación gráfica del mallado.	46
Figura 24 Tensiones en MPa según elementos finitos (20Nm).	47
Figura 25 Desplazamientos en mm según elementos finitos (20Nm).	48
Figura 26 Medida de la distancia máxima entre uno de los puntos fijos y el punto de mayor desplazamiento.	48
Figura 27 Resultados de ensayos de torsión manuales sobre muestras de búho. B20(D)H es el ensayo de torsión de más corto recorrido entre los realizados por el autor.	49
Figura 28 Extracto de un conjunto de resultados de ensayos de torsión manuales sobre muestras de fémur de búho, como gráfica.	52
Figura 29 Vista isométrica del modelo CAD del conjunto.	57
Figura 30 Vista frontal del modelo CAD del conjunto.	57
Figura 31 Vista superior del modelo CAD del conjunto.	58
Figura 32 Detalle de la vista lateral del modelo CAD del conjunto.	58

Índice de tablas

Tabla 1 Composición química de la aleación Al 6063 (ASM International, 1992).....	28
Tabla 2 Par torsor de fractura de distintas muestras óseas (Wang, X. et al., 2010).	30
Tabla 3 Parámetros teóricos del bloque motor.	36
Tabla 4 Propiedades mecánicas del aluminio 6063-O, Extruded Rod (SS) (MATEREALITY, 2026).....	44
Tabla 5 Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304 (MATEREALITY, 2026).	45
Tabla 6 Propiedades mecánicas de la aleación Zinc AC41A Alloy, As Cast (MATEREALITY, 2026).	45
Tabla 7 Características del mallado.....	46
Tabla 8 Extracto de un conjunto de resultados de ensayos de torsión manuales sobre muestras de fémur de búho, como parejas de datos.....	51
Tabla 9 Costes de adquisición del despiece.....	62
Tabla 10 Comparativa de precios de distintos proveedores de transductores de par estático.	63
Tabla 11 Coste del equipo.	64

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de fin de grado tiene por objetivo principal el diseño y fabricación de una máquina para ensayos mecánicos de torsión de bajo par (hasta aproximadamente 10Nm), particularmente indicada para el ensayo de muestras biológicas y biomodelos, así como la caracterización de materiales biológicos. Dicho equipo deberá ser capaz de realizar los ensayos de forma automática, según los parámetros introducidos por el usuario, con posibilidad de control en par o en ángulo.

Se denomina ensayo mecánico al proceso experimental de determinación de las propiedades mecánicas de un material, mediante la evaluación de su comportamiento frente a ciertas condiciones de carga y esfuerzo. Los ensayos mecánicos más comunes son los de tracción, compresión, dureza, flexión e impacto. Sin embargo, en el caso de materiales heterogéneos o anisótropos y en piezas de geometrías complejas, se hacen necesarios ensayos adicionales, entre los cuales destacamos el ensayo de torsión.

El ensayo de torsión permite determinar el comportamiento de una pieza frente a esfuerzos cortantes. Este ensayo es particularmente importante en muestras biológicas, ya que están formadas por materiales heterogéneos y anisótropos (hueso, cartílago, etc.), y a menudo se ven sometidas a condiciones de carga muy complejas.

La normativa vigente respectiva a los ensayos de este tipo es limitada, debido a la complejidad de este tipo de pruebas que, en general, sólo son extrapolables a piezas material y geoméricamente semejantes a las ensayadas.

De aquí resulta la importancia de la caracterización de piezas a torsión ya que, en el caso de piezas como implantes óseos o cartílagos sintéticos, la aproximación analítica resulta tremendamente compleja cuando no impracticable.

La máquina resultante de este trabajo deberá ser capaz de realizar este tipo de ensayos en una gran variedad de geometrías y materiales, arrojando una alta precisión, de forma automática y suponiendo un bajo coste de fabricación.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La idea de construir una máquina para ensayos de torsión surge de la necesidad de realizar estos ensayos para varios proyectos de investigación que se han llevado a cabo durante los últimos años en el Laboratorio de Materiales de ICAI. Si bien los ensayos manuales arrojan resultados suficientemente válidos para muchos de estos proyectos, la falta de precisión y difícil repetibilidad de estos evidencian el amplio espacio de mejora.

El Laboratorio de Materiales ha colaborado en proyectos de desarrollo de implantes óseos, requiriendo este tipo de ensayos. Teniendo la excelencia como criterio de calidad, se hace inmediata la necesidad de un equipo especializado y capaz de obtener resultados precisos.

Reconociendo que desarrollar y fabricar esta máquina resultaría mucho más valioso a nivel formativo que comprar un equipo comercial, y que era un de cierta complejidad y envergadura, se decidió enmarcar este proyecto en un TFG.

Las decisiones de diseño adoptadas a lo largo de la realización de este proyecto responden en parte a la experiencia del autor, que ha realizado decenas de ensayos de torsión manuales en calidad de becario del Laboratorio de Materiales de ICAI.

Este Trabajo Fin de Grado permite integrar y aplicar conocimientos teóricos y prácticos de la titulación en el desarrollo de un proyecto de ingeniería real. En particular, el TFG contribuye a la adquisición de: conocimientos sobre los fundamentos de diseño de máquinas de ensayo, instrumentación, ensayos mecánicos, uso de normativa y representación de resultados, habilidades para el diseño completo de un sistema mecánico (desde la definición

de requisitos hasta la selección de componentes, la elaboración de modelos y la evaluación del funcionamiento del equipo).

Además, desarrolla competencias relacionadas con el trabajo autónomo, la resolución de problemas técnicos, la toma de decisiones fundamentadas, el análisis crítico de resultados y la comunicación en el ámbito de un proyecto de ingeniería.

1.2 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

Esta memoria está elaborada siguiendo un doble criterio: ir desde lo general hasta lo específico, y respetar el orden natural y cronológico de cada hito en el proceso de diseño. Así, la memoria está estructurada de la siguiente manera:

- Estado del Arte: Introduce los ensayos de torsión en el ámbito de la caracterización mecánica de materiales y su actualidad.
- Definición de Alcance del Proyecto: Identifica la problemática a solucionar con este diseño y define la metodología de trabajo para este.
- Diseño del equipo: Recoge y justifica las decisiones de diseño. Consta de tres partes, a saber, diseño del equipo, control y captación de datos, y diseño final.
- Presupuesto.
- Conclusiones y trabajos futuros.
- Anexos: catálogos, informe de alineación con los ODS y planos.

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

Para afrontar el diseño de una máquina de ensayos de torsión resulta fundamental introducir en qué consisten estos ensayos mecánicos y cuál es su razón de ser. Este capítulo pretende avanzar desde la definición más genérica de *ensayo mecánico* hasta la realidad concreta de los ensayos de torsión en ICAI y la industria.

2.1 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES

La mecánica de materiales es la rama de la ingeniería dedicada a estudiar el comportamiento físico de un cuerpo deformable ante cargas (Wang, X. et al., 2010). El proceso experimental de determinar este comportamiento se denomina ensayo mecánico.

Los ensayos mecánicos se pueden dividir en dos grandes grupos, ensayos destructivos y ensayos no destructivos (END).

2.1.1 ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Como bien indica su nombre, los ensayos destructivos implican la ruptura o deformación permanente de la probeta utilizada. Por esta razón, los ensayos destructivos quedan limitados a procesos de I+D, ya que provocarían daños permanentes en los equipos en caso de usarse *in situ*. El uso extendido de este tipo de ensayos responde a su precisión y la gran cantidad de información que otorgan.

Existe una enorme variedad de ensayos mecánicos destructivos. A continuación, se muestran únicamente algunos de los más genéricos y extendidos en la industria.

2.1.1.1 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción somete la probeta a un esfuerzo de tracción (axil saliente en los extremos libres de la sección). Es el más común de los ensayos de caracterización de materiales.

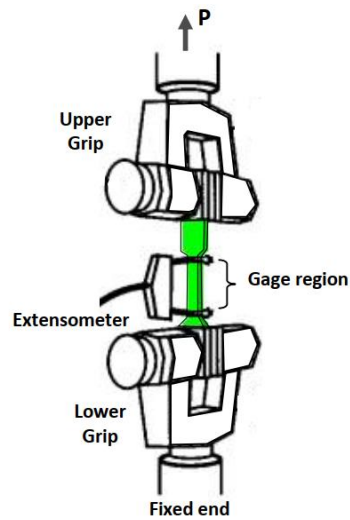


Figura 2 Diagrama de un ensayo de tracción genérico (Wang, X. et al., 2010).

2.1.1.2 Ensayo de compresión

El ensayo de compresión es, en cierto modo, el absoluto opuesto al de tracción. En esta prueba se aplica un esfuerzo de compresión (axil entrante en los extremos libres de la sección).

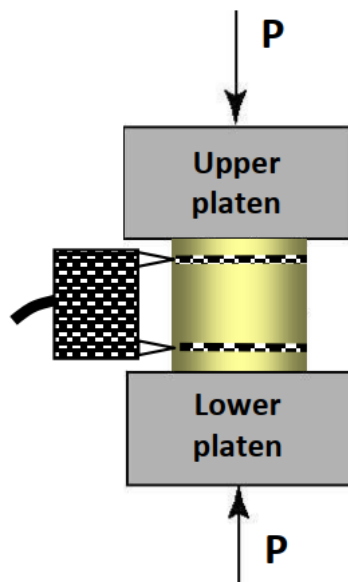


Figura 3 Diagrama de un ensayo de compresión genérico (Wang, X. et al., 2010).

2.1.1.3 Ensayo de flexión

El ensayo de flexión provoca un momento flector en la probeta. Típicamente se realiza a 3 o 4 puntos, según las configuraciones mostradas en la *Figura*

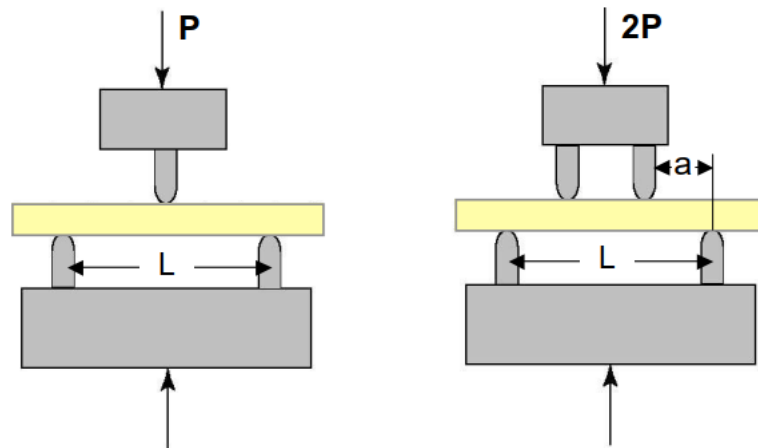


Figura 4 Diagrama de un ensayo de flexión genérico, a 3 y a 4 puntos (Wang, X. et al., 2010).

2.1.1.4 Ensayos de fractura estáticos

Los ensayos de fractura estáticos estudian el comportamiento ante esfuerzos estáticos (no de impacto) de un material cuando este tiene ya una grieta.

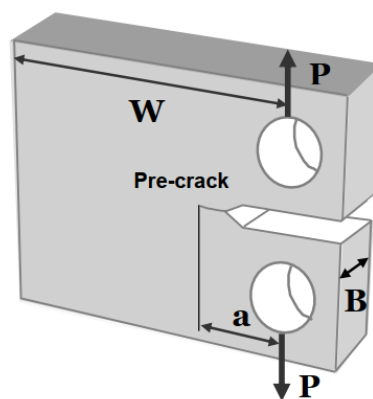


Figura 5 Esquema de una probeta típica para un ensayo de fractura de tipo I y baja velocidad (Wang, X. et al., 2010)..

2.1.1.5 Ensayos de fractura dinámicos (Charpy e Izod)

Los ensayos de fractura dinámicos parten de la misma base que los estáticos, pero someten a la probeta a un impacto en vez de a una aplicación lenta y controlada de la fuerza.

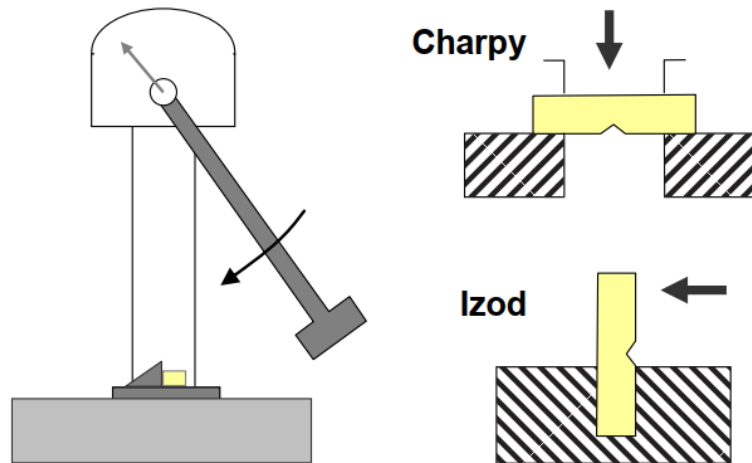


Figura 6 Esquema de los ensayos de impacto Charpy e Izod (Wang, X. et al., 2010).

2.1.1.6 Ensayos de fatiga

Los ensayos de fatiga someten a la probeta a esfuerzos por debajo de su límite elástico de forma cíclica. De este modo, terminado el ensayo, la pieza habrá sufrido miles o millones de ciclos con niveles de esfuerzo relativamente bajos.

Este ensayo no es siempre destructivo en un sentido visible o inmediatamente medible, pero casi siempre altera permanentemente la estructura interna de la probeta.

Los ensayos de fatiga pueden tomar cualquiera de las configuraciones mostradas anteriormente, y otras que no se han incluido en esta memoria.

2.1.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos no destructivos o END, por contraposición a los destructivos, no tienen efectos permanentes en el material ensayado.

Existen multitud de tipos de ensayos no destructivos como la inspección visual, el uso de líquidos penetrantes, el uso de partículas magnéticas, inspección mediante ultrasonidos, inspección mediante rayos-X, etc.

Dado que la máquina que se desarrolla en este trabajo está destinada a un tipo de ensayo destructivo, no se va a entrar en mayor detalle en lo que a los END respecta.

2.2 ENSAYO DE TORSIÓN

El ensayo de torsión es un ensayo mecánico destructivo en que se aplica un par torsor a la probeta, de modo que un extremo de esta gira respecto al otro. A lo largo del ensayo se pueden controlar la magnitud del par torsor y el ángulo de giro.



Figura 7 Esquema de un ensayo de torsión genérico (Martins da Costa, 2015).

A veces se aplica, además, un pequeño esfuerzo de tracción durante el ensayo de torsión. Este es el caso de ensayo de cables metálicos de menos de 10mm de diámetro (ISO 7800:2024), este esfuerzo axial simplemente mantiene extendida la muestra.

El ensayo de torsión no es típico, ya que aporta poca información adicional en materiales isotropos y homogéneos como los metales y muchos polímeros. Sin embargo, para materiales anisotropos, no homogéneos, o de geometrías complejas (como es el caso de los huesos), se convierte en un ensayo muy valioso.

Esto conlleva que la normativa asociada a los ensayos de torsión es muy limitada (véase apartado 4.1.1 Normativa), y a menudo se refiere a ensayos particulares destinados a industrias muy concretas, como es el caso de las uniones adhesivas, en concreto en la caracterización de adhesivos anaeróbicos.

2.2.1 EXPERIENCIAS PREVIAS EN ICAI

En el ICAI, hasta este proyecto, no ha habido un equipo de ensayos de torsión como tal. Sin embargo, sí que se han realizado estos ensayos de forma manual, con una serie de equipos adaptados a este propósito.



Figura 8 Ensayo de torsión manual sobre muestras de hueso de búho y detalle de estas.

Si bien los ensayos de torsión manuales no cuentan con la precisión o repetibilidad de un ensayo a máquina, ofrecen información relativamente precisa sobre el par de rotura y el giro admisible de muestras concretas, además de permitir elaborar de forma orientativa curvas de la zona elástica de estas.

Dicho esto, una máquina de ensayos bien calibrada siempre va a ser más precisa que cualquiera de estos ensayos manuales, en el punto de resistencia última y durante el recorrido del ensayo. De este modo, se permite una caracterización mucho más exhaustiva de cada probeta.

Además, en muestras de geometría compleja (como las muestras óseas de la *Figura 8*), el ensayo manual a menudo exige el encastre de los extremos. Estos encastres implican una

serie de limitaciones importantes, ya que reducen la longitud de la probeta, eliminan la influencia de los extremos y, ante todo, exigen el uso de resinas rígidas que tardan horas o días en prepararse y curar.

2.2.2 EN LA INDUSTRIA

En la industria, y más concretamente en el desarrollo de materiales, se utilizan máquinas de ensayos de torsión para realizar las caracterizaciones ya explicadas. Estas máquinas pueden ser comprobadores de torsión en sí mismos, o complementos para máquinas universales que permitan realizar ensayos de torsión.

Estos equipos comerciales están disponibles en una amplia gama de precios y prestaciones, así como posiciones y capacidad de par y giro. Este trabajo no pretende analizar de forma exhaustiva estas opciones, sino acoger e interpretar las soluciones que ya utiliza la industria para implementarlas, si es oportuno, al diseño de nuestra herramienta.



Figura 9 Ejemplo de un equipo comercial para ensayos de torsión con control de ángulo INSTRON (Instron, 2026).

El ejemplo de la *Figura 9* sería típico de un laboratorio de desarrollo o caracterización de materiales, ya que permite el control del ángulo con gran precisión.



Figura 10 Ejemplo de un equipo comercial para ensayos de torsión con control de vueltas UMI T-300 (Útiles y Máquinas Industriales, S.A., 2026).

El ejemplo de la *Figura 10*, sin embargo, simplemente cuenta las vueltas durante el ensayo. Esto se debe a que la norma UNE – ISO 7800:2024 no exige más precisión que esa. De hecho, este ejemplo no incluye de serie la capacidad de medir el par torsor, ya que está destinado a garantizar un número mínimo de vueltas en cables y perfiles redondos.

2.3 MUESTRAS A ENSAYAR

Como ya se ha mencionado, el ensayo de torsión es de particular interés a la hora de estudiar materiales anisótropos y no homogéneos, o piezas de geometrías muy complejas.

Esto se debe a que los materiales relativamente isótropos y homogéneos (como muchos aceros) tienen un comportamiento tan previsible que, normalmente, este ensayo aportaría poca información adicional. La excepción a esta norma sería el estudio de geometrías

complejas, como el cable trenzado de acero, donde la distribución de tensiones no es fácilmente determinable.

En el Laboratorio de Materiales las muestras a ensayar a torsión suelen responder a una combinación de las 3 categorías que dan sentido a este ensayo: son muestras anisótropas (no se comportan igual en todas las direcciones), heterogéneas (no se comportan igual en todo su volumen), y presentan geometrías complejas (difíciles de definir matemáticamente de forma precisa).

El ejemplo por excelencia de estos materiales son las muestras de tejido biológico, como los huesos, los cartílagos o los tendones. También es habitual usar estos ensayos en materiales compuestos o en piezas fabricadas por procesos poco tradicionales (y, por tanto, menos previsibles) como son muchas tecnologías de impresión 3D.

Por supuesto, este proceso también aplica al ensayo de conjuntos, como el ejemplo de la *Figura 11* que cuenta con una muestra ósea rota, un implante de PLA uniendo las piezas, y una serie de tornillos de Nylon para sujetar a este. En este caso, la información relevante no es tanto la caracterización del material como la comprobación de la capacidad del conjunto para soportar estados de carga torsional y giro concretos.

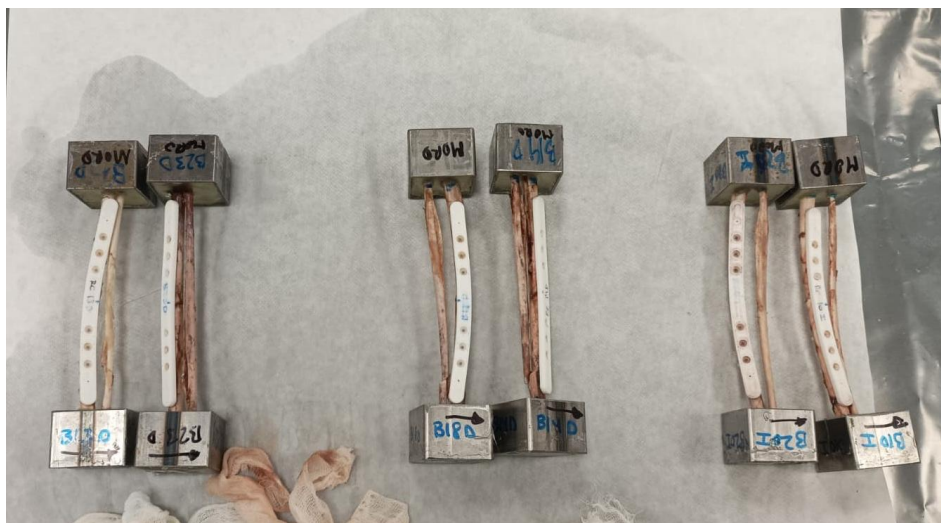


Figura 11 Muestras de huesos de búho con implantes de PLA y Nylon listas para su ensayo a torsión.

Capítulo 3. ALCANCE DEL PROYECTO

Este proyecto pretende, en última instancia, dar lugar a una máquina de ensayos de torsión de bajo par. Por esta razón, esta memoria tratará únicamente aquellos aspectos inmediatamente relevantes al aparato, y no pretende ser un estudio exhaustivo de cada una de las tecnologías implicadas.

3.1 JUSTIFICACIÓN DEL DISEÑO

El diseño de la máquina responde principalmente a dos cuestiones: la necesidad de una mayor precisión en los ensayos de torsión en el laboratorio de materiales de ICAI, y la oportunidad de aprendizaje que supone para el autor este tipo de proyecto.

3.1.1 LÍMITES DE LOS ENSAYOS MANUALES

Los ensayos de torsión manuales presentan una serie de retos a la hora de obtener resultados precisos, a saber:

- El par aplicado y el ángulo girado, así como sus respectivas lecturas, dependen directamente del operario. La precisión de los datos, por tanto, queda limitada por la velocidad a la que el operario anote estos valores.
- Por la misma razón, la repetibilidad del ensayo es débil.
- Al no estar garantizada la coaxialidad el eje de giro de la probeta y el eje de aplicación del par, se pueden provocar estados tensionales complejos sin saberlo.
- Por sujetar el extremo giratorio de la muestra con la mano, se pueden aplicar esfuerzos indeseados sobre la muestra.
- El rango de par de ensayo depende directamente de la fuerza del operario.

- La limitada polivalencia de las sujeciones (el tornillo de banco sólo se ajusta en un eje y el adaptador al medidor de par es rígido) exigen el embebido de los extremos de la muestra, proceso lento y laborioso (*Figura 12*).

Estos retos no invalidan inmediatamente los ensayos manuales, ya que estos permiten determinar con cierta precisión el par último (par torsor de fractura) y arrojan información aproximada sobre la curva de ángulo girado – par. Sin embargo, estos retos evidencian un amplio espacio de mejora.

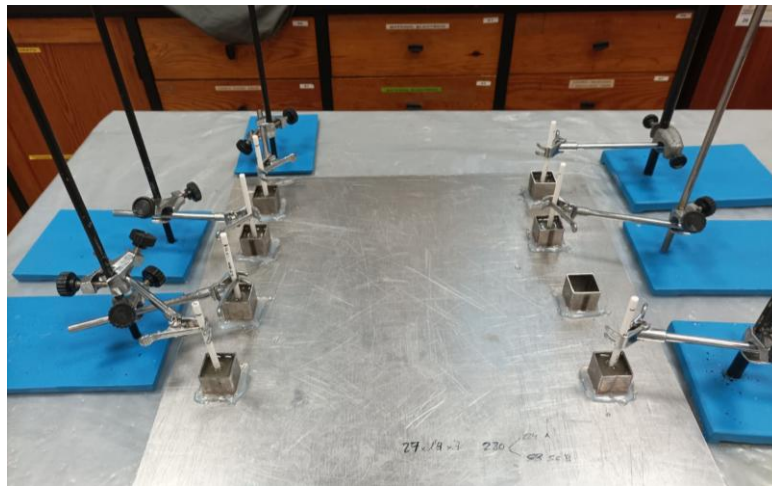


Figura 12 Proceso de embebido en resina de los extremos de muestras de PLA para su posterior ensayo a torsión.

3.1.2 APRENDIZAJE A PARTIR DE LA EXPERIENCIA

El aprendizaje basado en la experiencia, si bien necesita de una base teórica para ser del todo efectivo, permite entender y retener mejor la información que cualquier modelo educativo puramente magistral (Cook & Hanson, 2026).

En lo que a las características concretas de la máquina respecta, esto es del todo irrelevante. Sin embargo, es la motivación más relevante si se tiene en cuenta la naturaleza inherente a un “Trabajo Final de Grado”. Esta memoria es sólo un breve resumen de la experiencia del autor durante los meses de diseño de la máquina, a partir de la base teórica forjada durante años en el Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales.

Llevar a cabo este proyecto ha requerido una importante labor investigativa e interpretativa, la toma crítica de decisiones, la elaboración de modelos CAD complejos y pormenorizados, así como la elaboración de un presupuesto. Todo esto siguiendo un plan de trabajo elaborado por el autor. Cada una de estas cuestiones supone, en sí misma, una experiencia de gran valor formativo.

Además, la memoria de verificación del grado elaborada por la ANECA en 2026 dice, en el primer párrafo del apartado de objetivos formativos, que el egresado de GITI debe ser competente en la redacción y desarrollo de proyectos que tengan por objeto la fabricación de equipos mecánicos (AENECA, 2025). Resulta inmediata, por tanto, la idoneidad de este trabajo como herramienta formativa.

3.2 OBJETIVOS

El presente Trabajo de Fin de Grado consiste en el diseño y fabricación de una máquina para ensayos a torsión de bajo par, como ya se ha introducido en el correspondiente apartado.

Así, los principales objetivos de este proyecto son:

- Identificación de requisitos del equipo a desarrollar.
- Diseño conceptual de la máquina.
- Diseño CAD del ensamblaje y las piezas correspondientes.
- Fabricación o adquisición de las piezas necesarias.
- Montaje de la máquina.
- Programación del equipo para su funcionamiento automático, así como para la obtención sistemática de los resultados de ensayo.

- Validación de la máquina mediante la realización de ensayos.

Esta memoria, sin embargo, se centra en el proceso de diseño. Esto es natural, ya que la fase de diseño es la más amplia tanto en horas de trabajo como en documentación, y todo el resto del proceso de desarrollo depende directamente del diseño.

3.3 METODOLOGÍA

Este proyecto se había programado siguiendo una metodología estandarizada (Jänsch & Birkhofer, 2006), genérica por naturaleza, y paralela a cualquier metodología de diseño. La razón es que el desarrollo de cualquier solución industrial lleva asociados los mismos pasos.

Concretamente, el trabajo se ha desarrollado de la siguiente manera:

1. Identificación de la problemática asociada a los ensayos de torsión en ICAI
2. Estudio del estado de la cuestión e identificación de soluciones posibles
3. Diseño conceptual y toma de decisiones de diseño
4. Diseño CAD del ensamblaje y cada una de sus partes
5. Fabricación / montaje del equipo
6. Programación
7. Validación

En la práctica, cada uno de los pasos descritos exige que se cumpla el paso anterior, por lo que este es el flujo natural del trabajo.

3.4 PLANIFICACIÓN

Antes de comenzar el proceso de diseño es imprescindible tener una idea general de cuál va a ser su coste, tanto temporal como económico. Claro que no es posible adelantar con exactitud lo que conlleva un proyecto de esta envergadura, pero este apartado pretende más bien responder a la pregunta “¿Tendré tiempo y dinero suficiente para llevar a cabo este proyecto?”.

3.4.1 PLANIFICACIÓN TEMPORAL

Al inicio de curso se propuso dividir el trabajo según el siguiente diagrama de Gantt (*Figura 13*).

Este plan pretendía dividir el trabajo de forma que el diseño de la máquina estuviese prácticamente definido a principios del cuatrimestre, dejando tiempo suficiente para el montaje y la programación del aparato.

Sin embargo, debido a una demora en la adquisición de materiales, la fabricación de la máquina no ha podido llevarse a cabo. Esta demora responde a que la célula de carga de torsión no rotativa es un componente de precisión, poco común, y a menudo hecho a medida que, por desgracia, no ha podido adquirirse a tiempo.



Figura 13 Diagrama de Gantt tentativo.

Capítulo 4. DISEÑO DEL EQUIPO

4.1 INTRODUCCIÓN

La máquina de ensayos de torsión está formada por un conjunto de piezas mecánicas y electromecánicas que funcionan de forma coordinada para aplicar un par torsor a la probeta, de forma controlada, midiendo en todo momento la magnitud del giro y del par.

El diseño de la máquina adopta algunas de las soluciones más habituales en el mercado (véase 2.2.2 *En la industria*). Constructivamente, las decisiones de diseño parten de la necesidad de aportar la mayor rigidez y control al sistema sin hacerlo excesivamente pesado o caro, para una zona de ensayo concreta.

4.1.1 NORMATIVA Y ESTÁNDARES

Como ya se ha comentado, la normativa vigente referente a los ensayos de torsión es limitada y, en general, muy específica. El equipo desarrollado debería ser polivalente, de modo que permita realizar ensayos (en su rango de dimensiones y esfuerzos) de acuerdo con cualquiera de las siguientes normas:

1. **UNE – ISO 7800:2024. Materiales metálicos. Alambre. Ensayo de torsión simple.**
 - a. Limitado al ensayo de alambres y perfiles redondos a temperatura ambiente.
 - b. Mide número de vueltas a rotura, pero no el ángulo girado.
 - c. Detalla algunas características generales sobre la máquina de ensayos.
 - d. Incluye la posibilidad de realizar ensayos de tracción – torsión.

2. **UNE – ISO 10964:1997. Adhesivos. Determinación del par de desmontaje en elementos de fijación roscados encolados con adhesivos anaeróbicos.**

- a. Limitado al ensayo de uniones roscadas y encoladas.
3. **ASTM A938. Standard Test Method for Torsion Testing of Wire.**
 - a. Norma estadounidense equivalente al ISO 7800.
 4. **ASTM F543. Standard Specification and Test Methods for Metallic Medical Bone Screws.**
 - a. Específico para tornillería metálica en huesos humanos.
 - b. Sólo estudia la fase última, es decir, la de fractura.
 - c. Si bien considera los rangos de par admisibles antes del fallo, se centra más en el modo de fallo concreto (frágil, dúctil, con o sin fragmentos, etc).
 5. **ASTM F383. Static Bend and Torsion Testing of Intramedullary Rods.**
 - a. Específico para varillas intramedulares.
 - b. Estudia la rigidez torsional estática de las varillas.
 6. **ASTM E2207. Standard Practice for Strain-Controlled Axial-Torsional Fatigue Testing with Thin-Walled Tubular Specimens.**
 - a. Específico al ensayo axial-torsional de fatiga de tubos de pared fina. Supone un estándar tremendamente concreto.
 - b. Por tratarse un ensayo de fatiga, no se contemplará esta norma en el diseño de la máquina.¹

¹ Aunque, para ensayos de fatiga a velocidad baja y par moderado, sólo supondría una adaptación del programa.

7. ASTM D5649-15. Standard Test Method for Torque Strength of Adhesives Used on Threaded Fasteners.

- a. Norma estadounidense equivalente en la práctica a ISO 10964.

Además de estas normas, que tratan explícitamente los ensayos de torsión, existen normas específicas (sobre todo en la industria médica) que pueden implicarlos como parte de procesos de caracterización. Por tratarse de normas incluso más concretas que las mencionadas y que, en general, atienden más a los métodos de ensayo e interpretación de los resultados que al diseño de la máquina, no se tendrán en cuenta.

4.2 SELECCIÓN DE MATERIALES

Cada uno de los componentes del ensamblaje debe estar fabricado de forma que cumpla su función en todo el rango de aplicación de la máquina, y permita el montaje de las piezas entre sí de forma efectiva.

Es imprescindible, por tanto, que todas las piezas sean lo suficientemente rígidas como para garantizar precisión en las medidas. También es necesario que las piezas sean fáciles de limpiar y que resistan de forma efectiva la corrosión, ya que la máquina se utilizará para ensayar muestras biológicas con las que debe mantenerse una higiene adecuada y que pueden contaminar la superficie del conjunto con cloruros.

En cuanto a las piezas comerciales, la selección de materiales ya ha sido hecha por el fabricante. Sin embargo, para las piezas fabricadas se requiere partir de unos materiales en bruto que cumplan con las propiedades mecánicas necesarias.

Además, en el caso de elementos que sufran fricción (conjunto sin fin – corona) debe asegurarse un coeficiente de fricción dinámica lo más bajo posible.

4.2.1 MATERIAL PARA EL BASTIDOR

Para el bastidor se empleará el aluminio 6063, que es el más típicamente utilizado en las extrusiones de aluminio anodizado (ASM International, 1992) como las que lo constituyen (véase 4.4.1 Bastidor).

Esta aleación tiene la siguiente composición química:

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	Va	Ti	Al
%	0,2 – 0,6	0,35	0,1	0,1	0,45 – 0,9	0,1	-	0,1	-	-	0,1	rem.

Tabla 1 Composición química de la aleación Al 6063 (ASM International, 1992).

Lo que le proporciona una excelente resistencia a la corrosión y buena capacidad de deformación en frío. Esta característica resistencia a la corrosión, que es relevante en sí misma para el fabricante del perfil, supone un beneficio importante en cuanto a facilidad de limpieza y desinfección del equipo al finalizar los ensayos.

Las piezas que requieren mecanizado o doblado de chapa (Eje Ø20x200, Placa soporte, y Brida del motor) se realizarán en acero inoxidable AISI 304, que es el inoxidable más utilizado en la fabricación de componentes mecánicos por su polivalencia. Esta aleación tiene buena resistencia, y excelente comportamiento frente a la corrosión.

Aunque la Placa soporte y la Brida del motor podrían fabricarse en aluminio, para piezas *ad hoc* y visto el presupuesto del servicio de mecanizado (PCBWay, 2026), el acero inoxidable ofrece un comportamiento mecánico superior y una mejor longevidad por un sobrecoste mínimo.

Para la corona se utilizará la aleación bronce – fósforo CuSn10P, que es ampliamente utilizada en engranajes por su excelente combinación de resistencia al desgaste, la fatiga y la corrosión, además de su bajo coeficiente de fricción en contacto con acero (Barret, 1990). Muchas de las coronas de bronce comerciales están fabricadas en este metal por su polivalencia. (ASM International, 1992)

4.3 DISEÑO DE LA ZONA DE ENSAYO

Zona de ensayo es el nombre que recibe el conjunto de rangos de par, ángulo y distancia entre platos alcanzable durante los ensayos. Cada uno de estos rangos se ha elegido de acuerdo con la experiencia del autor y la literatura disponible, siempre buscando maximizar las posibilidades de aplicación a la par que minimizando la incertidumbre en las medidas.

4.3.1 PAR MÁXIMO

La elección del par máximo de 10Nm responde directamente a la experiencia del autor como becario en el laboratorio de materiales de ICAI, al que está destinada esta máquina.

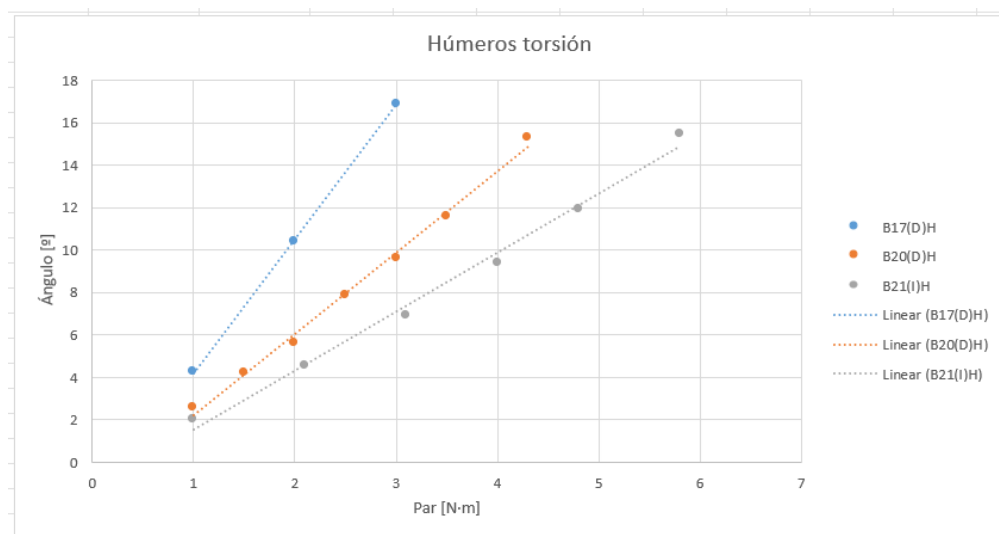


Figura 14 Extracto de un conjunto de resultados de ensayos de torsión manuales sobre muestras de húmeros de búho.

Casi todos los ensayos de torsión realizados durante los cursos 24-25 y 25-26 han sido sobre huesos de búho. De los ensayos de torsión realizados por el autor, destaca el marcado como “B21(I)H” en la *Figura 14* por ser el de mayor par torsor alcanzado, de casi 6Nm.

Además, de ensayos realizados en otras instituciones se obtiene la siguiente tabla:

Muestra	Par torsor de fractura (Nm)
Tibia de mono	3,782
Metacarpo canino	1,25
Fémur humano	183
Tibia humana	101
Húmero humano	45,6

Tabla 2 Par torsor de fractura de distintas muestras óseas (Wang, X. et al., 2010).

De estos datos se observa un salto de 2 órdenes de magnitud entre el par admisible por muestras óseas animales y por muestras óseas humanas. Por esta razón, y puesto que el laboratorio ha trabajado sobre todo con muestras caninas y de búhos, se considera que el rango práctico es de hasta 6Nm.

Para hacer posible el ensayo de muestras humanas sería necesario un equipo que quedaría fuera del criterio de “bajo par”.

Queriendo añadir un margen razonable al rango de funcionamiento de la máquina, se elige 10Nm como valor de rango de diseño.

4.3.2 GIRO ADMISIBLE

El rango de giro admisible determinará en gran medida el diseño estructural de la máquina.

Si bien los ensayos realizados por el autor en muestras óseas de búho muestran giros relativamente pequeños, de hasta unos 25° en el caso más extremo (véase *Figura ...*), la norma UNE – ISO 7800 habla de “número de vueltas”, implicando giros múltiplos de 360°.

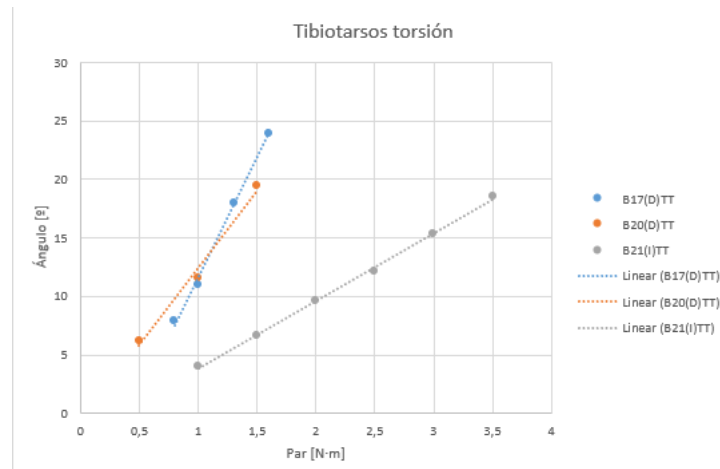


Figura 15 Extracto de un conjunto de resultados de ensayos de torsión manuales sobre muestras de tibiotarsos de búho.

Por esto, queriendo hacer el equipo lo más polivalente posible, se elige un diseño de giro ilimitado.

4.3.3 LONGITUD ADMISIBLE

Entre los ya mencionados ensayos sobre huesos de búho se observan muestras con longitudes desde los 50mm hasta los 150mm, aproximadamente. Dada esta gran variabilidad de longitudes en muestras biológicas y biomodelos, para dar margen de aplicación sin afectar excesivamente a la rigidez del bastidor, se toma 200mm como valor de longitud admisible.

4.4 DISEÑO 3D

El equipo electro – mecánico consta de tres partes diferenciadas, a saber, el bastidor, el bloque motor y el bloque de medición. A este aparato va asociado un sistema analógico – digital de control y captación de datos, que se estudia en profundidad en el *Capítulo 5*.

Este diseño modular permite hacer uso de materiales y piezas fácilmente adquiribles en el mercado, y hace posible el ajuste de la máquina a nuevos rangos de carga mediante el cambio de la corona y la célula, si esto fuese necesario. De igual forma, si se deseara ensayar

muestras más largas, bastaría con cambiar las guías del bastidor por otras de una longitud apropiada.

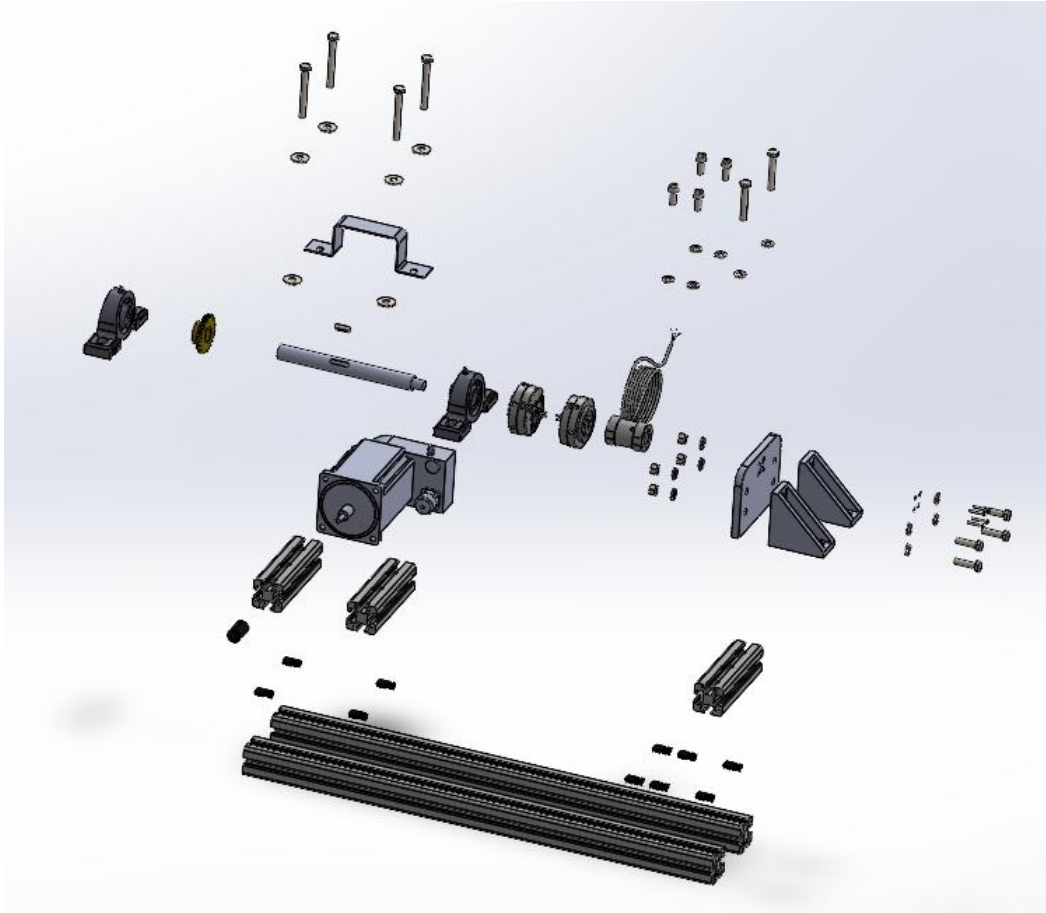


Figura 16 Explosión del modelo CAD mostrando los distintos componentes.

4.4.1 BASTIDOR

El bastidor o bancada consta de dos perfiles paralelos de extrusión de aluminio de 40mm de perfil y 8mm de ranura, de 650mm de longitud y unidos con tres traviesas del mismo tipo de extrusión. Estos perfiles ofrecen una gran rigidez con un peso mínimo, se cortan fácilmente con una sierra para aluminio, y admiten elementos de unión en toda su longitud sin necesidad de mecanizado.

La longitud de las traviesas es de 135mm, ya que esta es la longitud apropiada para sujetar los soportes – rodamiento de forma que su eje de giro quede centrado en el bastidor.

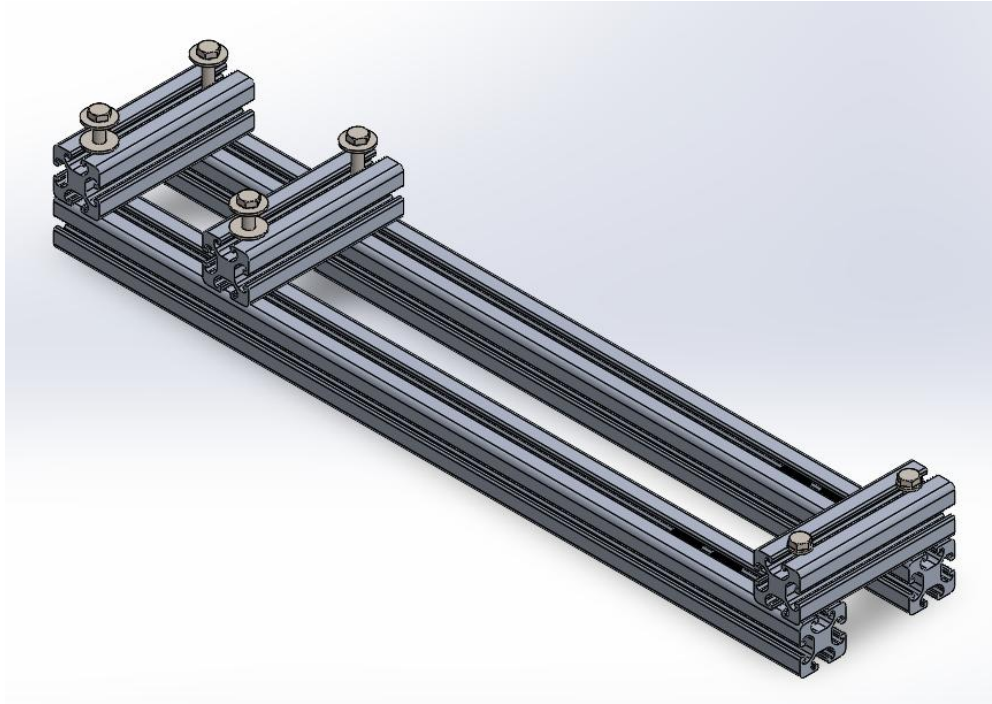


Figura 17 Vista general del bastidor con sus componentes de conexión.

La función del bastidor es la de sujetar las otras dos partes de la máquina. Su principal característica es la rigidez, ya que sirve como referencia para la posición angular de un extremo de la muestra frente al otro.

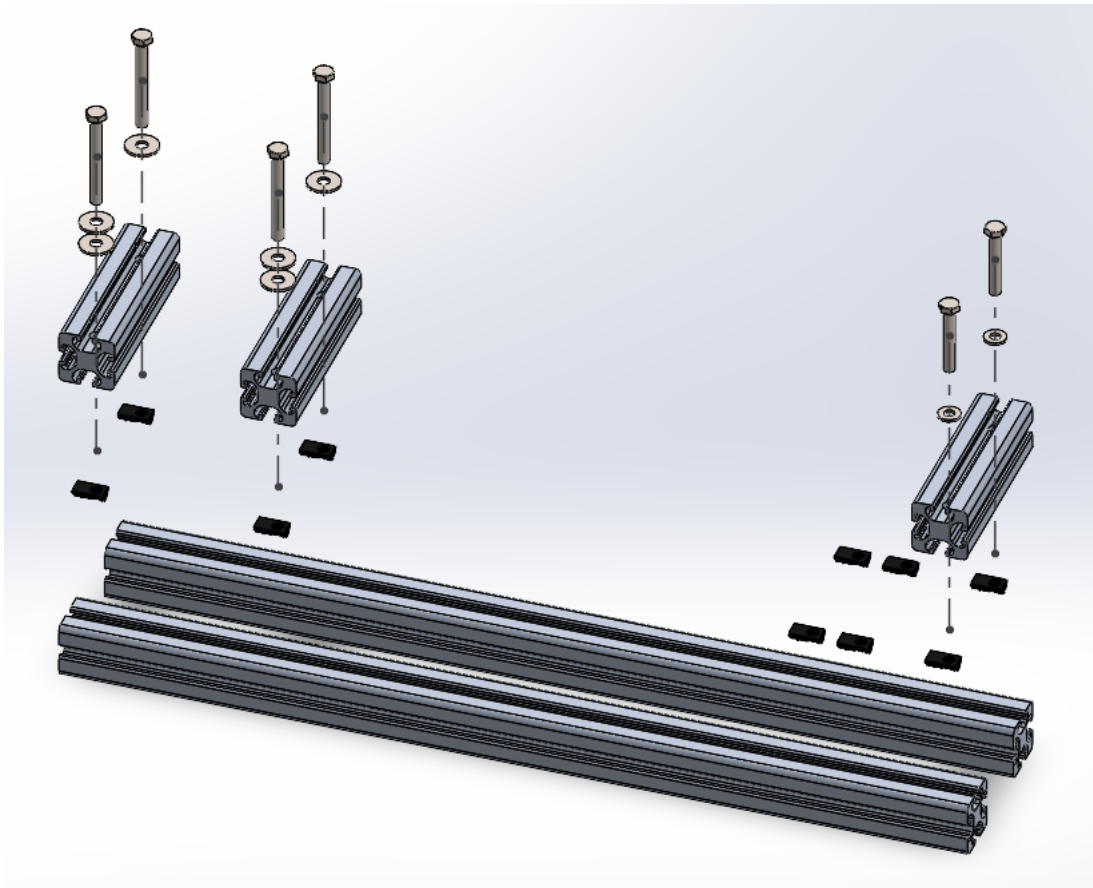


Figura 18 Explosionado del bastidor.

Para el montaje del bastidor se utilizarán tuercas de ranura M8 (de acuerdo con el espacio de ranura de 8'2mm) y tornillos de cabeza hexagonal del mismo diámetro y longitud apropiada. En la *Figura 16* se puede observar que un lado del bastidor cuenta con más arandelas que el otro, estas sirven de espaciador para compensar el ancho de la brida de sujeción del motor y así mantener horizontal el pie de los soportes – rodamiento.

4.4.2 BLOQUE MOTOR

La mordaza giratoria o bloque motor está formada por el motor, la reductora, el eje rígido, sus cojinetes y el mandril giratorio, además de los elementos de unión correspondientes. Tiene la función de hacer girar de forma controlada el extremo de la probeta que está introducido en ella.

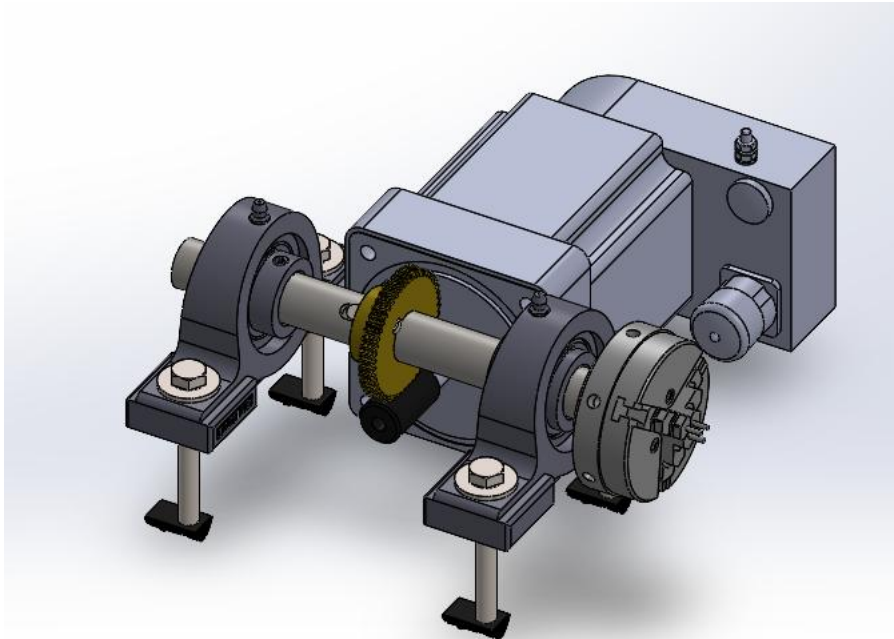


Figura 19 Vista general del conjunto motor, mostrando la disposición final de los elementos de unión.

Este conjunto es el de entrada, de modo que el controlador del motor hace girar a este, el tornillo sin fin gira sobre el eje del motor, la corona es empujada por el sin fin, y corona, eje y mandril giran en conjunto gracias al uso de una chaveta.

4.4.2.1 Motor

Un motor paso a paso realiza desplazamientos angulares discretos y precisos, permitiendo un posicionamiento preciso del eje y, por tanto, de la cabeza giratoria de la muestra.

Se toma un motor de 1 Nm y $1^{\circ}8'$ por paso por su disponibilidad comercial, facilidad de control y bajo coste. Este va sujeto al bastidor mediante una brida de chapa de 2mm situada en sus extremos entre el pie de cada soporte – rodamiento y su correspondiente traviesa (de aquí la necesidad de añadir el juego de arandelas de 2mm mencionado al final de 4.4.1).

El motor va conectado en su lado eléctrico al variador o controlador, que se explica en detalle en la sección 5.1 *Control del motor*.

4.4.2.2 Reductora

La relación de transformación del conjunto, siendo que el gusano y la rueda tienen igual módulo y ángulo de presión (de lo contrario, no funcionarían juntos) queda definida como el cociente entre el número de dientes de la corona y el número de entradas del sinfín. Así, se eligen un sinfín de 2 entradas y una corona de 50 dientes, dando una transformación de 25:1, que es más que suficiente reducción de par para un motor de 1Nm (que es el par nominal del motor finalmente elegido) y da una precisión extraordinariamente alta.

	Motor	Reductora	Mandril (ideal)	Mandril ($\eta = 70\%$)
Par máximo	1 Nm	25:1	25 Nm	17'5 Nm
Ángulo por paso	1'8°		0'072°	0'072°

Tabla 3 Parámetros teóricos del bloque motor.

El valor de 70% de rendimiento es una suposición exagerada que, sin embargo, hace ver que el par máximo deseado de 10Nm es alcanzable con margen. Puesto que la máquina sólo gira en una dirección durante los ensayos, manteniendo el contacto entre dientes, el juego (*backlash*) sólo afecta al inicio del ensayo (Tullu, Cha, & Ko, 2025) y, por tanto, no se tendrá en cuenta.

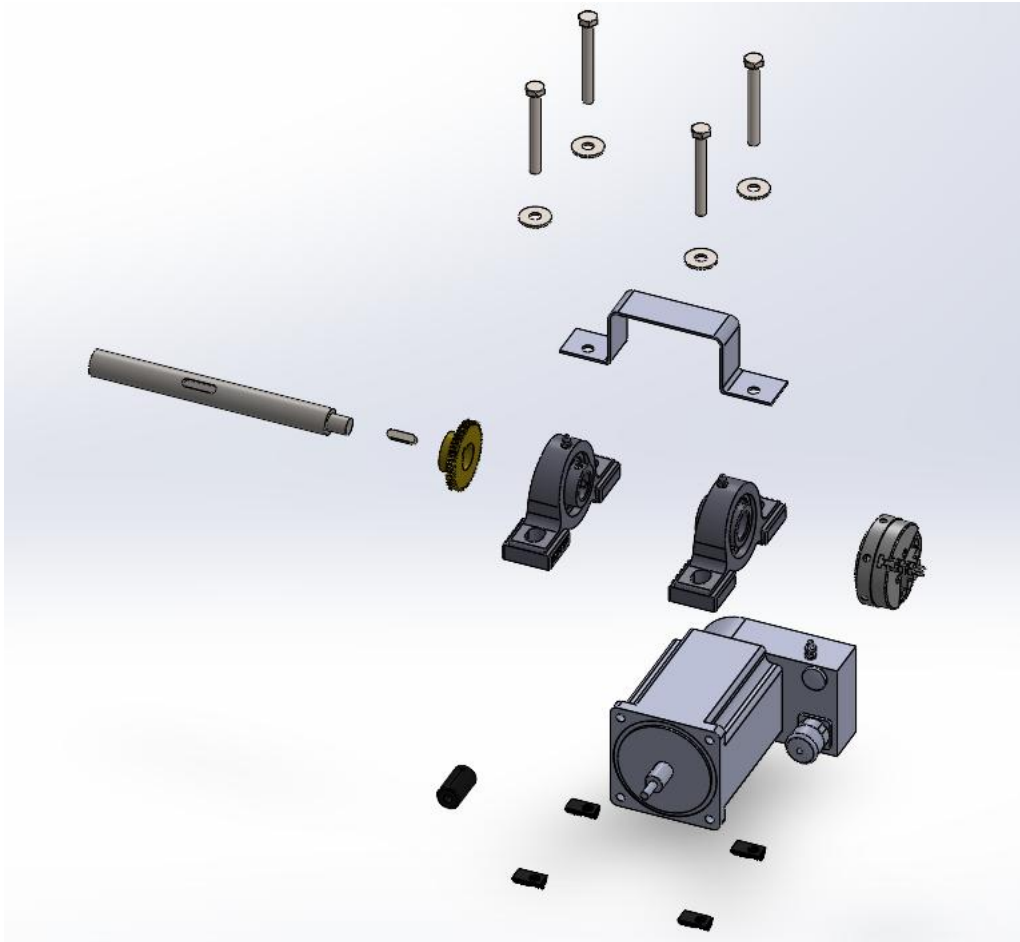


Figura 20 Explosionado del bloque motor.

4.4.2.3 Eje y cojinetes (soportes – rodamiento)

La elección de un eje relativamente largo entre cojinetes, en lugar de una reductora prefabricada, se debe a que esta ofrece una rigidez extremadamente alta frente a esfuerzos de flexión y axiales, permitiendo el giro libre gracias al uso de los rodamientos de soporte. De este modo, se evita que el peso propio de los mandriles provoque esfuerzos adicionales sobre la muestra.

La capacidad de evitar dichos estados tensionales complejos (esto es, la capacidad de provocar esfuerzo torsor y sólo esfuerzo torsor) supone una gran ventaja frente a los ensayos de torsión manuales que, a menudo, debido a la necesidad de sujetar la muestra con la mano, provocan esfuerzos no medibles que pueden tergiversar los resultados.

El eje se mecanizará en acero inoxidable AISI 304, que debería otorgar una rigidez excelente frente a esfuerzos flectores, torsores y axiles.

Los cojinetes vienen montados de fábrica y soportan grandes esfuerzos en todas las direcciones excepto en el giro, al que prácticamente no afectan. De esta forma se reduce el esfuerzo que necesita realizar el motor para provocar el giro del conjunto (reduciendo el gasto energético y, sobre todo, mejorando la precisión).

Como estos cojinetes incluyen tornillos prisioneros, y ya que los axiles deberían ser prácticamente nulos, no es necesario incluir anillos de seguridad (Circlip) para mantener la posición longitudinal del eje.

4.4.2.4 Plato de garras o mandril

Se utilizará un plato de garras como el de un torno pequeño. Estos agarres permiten sujetar con firmeza piezas de una amplia gama de diámetros y de geometrías poco regulares, así como ajustar la presión sobre la probeta.

Salvo en el caso de muestras con cabezas muy frágiles e irregulares, el uso de este elemento evita la necesidad de embeber los extremos antes del ensayo. Esto permite estudiar el efecto de las cabezas de cada probeta, además de suponer un importante ahorro en tiempo y dinero frente a los ensayos manuales.

4.4.3 BLOQUE DE MEDICIÓN

La mordaza fija o bloque de medición está formada por la célula de carga, la placa de montaje, la escuadra y el mandril fijo. Tiene la función de evitar el giro del extremo de la probeta que está introducido en ella, midiendo el par necesario para hacerlo en el proceso.

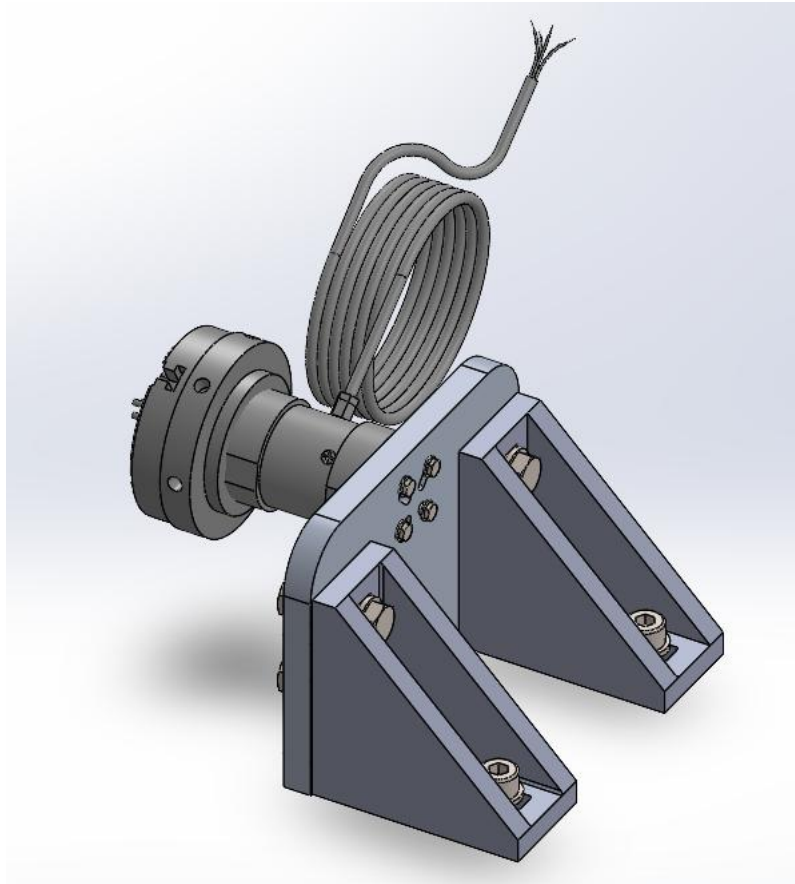


Figura 21 Vista general del bloque de medición.

Al haber garantizado que sólo se provoca esfuerzo torsor mediante el uso del eje largo, el par necesario para hacer girar un extremo de la probeta y el necesario para mantener su opuesto inmóvil son iguales en módulo (pero tienen, por supuesto, sentido contrario). Por esta razón, el par medido por la célula de carga es exactamente el par al que está sometida la muestra en su longitud libre (entre garras).

La célula de carga se verá así sometida al mismo esfuerzo torsor que la probeta, pero este giro es aproximadamente lineal y extremadamente pequeño en el rango de funcionamiento

de la célula (esta ha sido diseñada por el fabricante con esa intención). Por esto, a priori, se considerará irrelevante el giro interno de la célula de carga.²

4.4.3.1 Célula de carga

La célula de carga de torsión estática (o transductor de par) es el corazón del equipo, ya que es el elemento de medida fundamental de esta.

Esta célula consiste en un vástago de acero situado entre dos bridas y con una serie de celdas extensométricas en su superficie, calibradas de tal modo que la tensión a la salida del transductor guarda una relación lineal con el par torsor al que se somete.

Al no poder adquirir a tiempo una célula de carga apropiada, y siendo que muchos de los elementos del bloque de medición derivan sus dimensiones de las de esta, se ha tomado un modelo CAD comercial de una célula de carga que podría haber servido en este caso.

4.4.3.2 Escuadras

La elección de escuadras de doble altura (dos tornillos por lado en el plano vertical y otros dos tornillos por lado en el plano horizontal) se debe a que estas garantizan que el bloque de medición se traslade en paralelo a las ranuras longitudinales del bastidor, imposibilitando el giro de guiñada del bloque y garantizando la coaxialidad de uno y otro mandril.

Estas escuadras están montadas sobre las ranuras del bastidor mediante tornillos de cabeza hexagonal interior (Allen) y tuercas de ranura M8. Puesto que los mandriles precisan manipulación entre ensayos para introducir y extraer las muestras, y estos cuentan con tornillos Allen, se ha elegido este tipo de cabeza para los tornillos que exijan manipulación durante la operación normal del equipo. Así, todos los tornillos de montaje son hexagonales externos y no deben ser manipulados durante el uso normal de la máquina; y son tornillos

² Si en un futuro se considerase suficientemente relevante esta deformación, por ser lineal y conocer su modo de giro por la ficha técnica del equipo, ajustar la medida de la toma de datos resultaría inmediato.

Allen todos los que permiten los ajustes necesarios para la preparación y realización de los ensayos.³

De acuerdo con la norma UNE – ISO 7800:2024, estos tornillos deberán permanecer aflojados para evitar la aparición de tracciones excesivamente altas durante el ensayo de materiales dúctiles (que tienden a acortarse durante la torsión). Al usar dos tornillos por lado y tuercas de ranura, el desplazamiento paralelo a las ranuras del bastidor sigue quedando garantizado aún sin apretarlos.

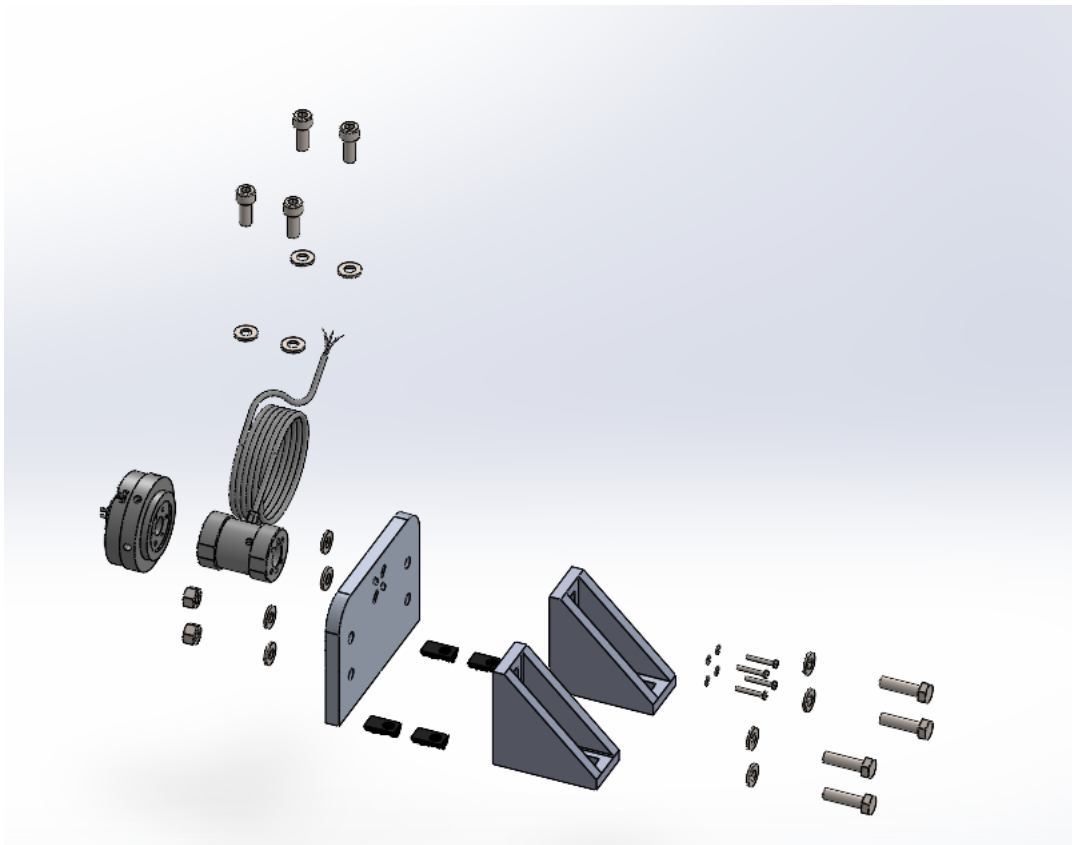


Figura 22 Explosionado del bloque de medición.

³ Quedan excluidos de esta norma los tornillos prisioneros que sujetan el eje y el sin fin, que son tipo Allen pero no deberán ajustarse durante la operación normal de la máquina.

4.4.3.3 Placa – adaptador de la célula de carga

La placa – adaptador consiste en una chapa de acero inoxidable AISI 304 de 10mm de espesor, con una serie de taladros para quedar unida a las escuadras y montar la célula de carga. Es un elemento sumamente sencillo, cuya única función es la de salvar la diferencia de dimensión entre la brida posterior de la célula de carga y el espacio entre las escuadras.

Si bien el espesor puede parecer excesivo, cabe destacar que tanto la célula de carga como el mandril fijo quedan en voladizo sobre esta chapa (esto es necesario para asegurar que la célula de carga y sólo la célula de carga soporta todo el momento torsor). En un afán de reducir la deflexión debida al peso de estos elementos, y siendo que el uso de una chapa más gruesa supone un aumento mínimo en el coste, se ha optado por esta decisión.

Todas las uniones en esta placa deben ser rígidas y permanentes, salvo modificación o reparación de la máquina. Por eso, y atendiendo al criterio de selección de la tornillería ya mencionado (véase 4.4.3.2 *Escuadras*), se utilizan tornillos de cabeza hexagonal externa del diámetro apropiado.

4.5 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

Para asegurar que el bastidor ofrece rigidez suficiente a la torsión como para mantener una precisión aceptable, se ha realizado un análisis de elementos finitos (FEA) de este junto con el soporte de la célula de carga y la carcasa de esta.

El resto de los elementos no han sido incluidos en el análisis por un conjunto de razones:

- Las extrusiones que forman la base del bastidor son un orden de magnitud más esbeltas que cualquier otro elemento de la máquina. El único elemento de una esbeltez comparable (aun siendo mucho menor) es el eje, y este está fabricado en acero macizo. Por esto, cualquier deformación fuera de las inmediatamente asociadas a los elementos del bastidor es despreciable.

- Muchos de estos elementos son conjuntos en sí mismos, de geometrías internas y propiedades materiales que el fabricante no ha hecho públicas (este es el caso de los rodamientos, por ejemplo). Por tanto, incluir estos elementos en el análisis carece de valor real.
- La complejidad de añadir el conjunto completo con sus elementos de unión exigiría, por la limitación técnica de los ordenadores a disposición del autor, un mallado muy poco preciso y con control en las uniones, en vez de en la longitud, que es lo más relevante.

Así, el análisis del conjunto bastidor, soporte y carcasa resulta en la posibilidad más realista y precisa con la información y los medios disponibles.

4.5.1 FIJACIÓN

Se han fijado 3 vértices de la estructura. Los dos vértices inferiores externos del lado del eje y el inferior posterior del lado de medición. Esto permite a la máquina deformarse ante el par torsor, según un giro relativo del lado de medición.

Si bien sería más realista considerar un apoyo de toda la cara inferior, o de 4 o 6 puntos a lo largo de las ranuras inferiores (como si estuviese apoyado sobre patas), la fijación elegida otorgará una deformación más exagerada.

Como es la deformación lo que puede tergiversar las medidas del equipo, se toma la opción de fijación que da la deformada peor.

Además, para obtener el resultado más malo posible, se desplaza hasta casi el final de carrera el bloque de medición. No se lleva hasta el contacto con la traviesa por evitar interacciones entre las escuadras y esta que pudieran tergiversar la medida.

4.5.2 CARGAS

Se ha cargado la carcasa de la célula de carga con 20Nm, que es el doble del par nominal que deberá soportar.

Como la deformación de la célula en sí no afecta al diseño (el fabricante ya la ha diseñado con una rigidez torsional que debería ser mucho mayor que la del bastidor, como se comprueba fácilmente en cualquiera de las entradas de *Anexo II-19*), el par se aplica sobre la carcasa para que tenga una situación realista frente al soporte.

Se utiliza un par de 20Nm, el doble que el nominal de la máquina, simplemente para aportar un margen de seguridad razonable en la medida.

4.5.3 MATERIALES

En la medida de lo posible, es decir, estando limitados a la gama de materiales definida en el software de SolidWorks, se ha utilizado el material más parecido posible al que de hecho constituye cada pieza.

4.5.3.1 Extrusiones de aluminio

Los perfiles extruidos de Al 6063 se simularán como “6063 – O, Extruded Rod (SS)”, disponible en la biblioteca de materiales de SolidWorks, y que tiene las siguientes propiedades mecánicas:

Property	Value	Units
Elastic Modulus	69000.00067	N/mm ²
Poisson's Ratio	0.33	N/A
Tensile Strength	89.99999727	N/mm ²
Yield Strength	41.36854376	N/mm ²
Tangent Modulus		N/mm ²
Thermal Expansion Coefficient	2.3e-05	/K
Mass Density	2700	kg/m ³
Hardening Factor	0.85	N/A

Tabla 4 Propiedades mecánicas del aluminio 6063-O, Extruded Rod (SS) (MATEREALITY, 2026).

4.5.3.2 Placa soporte

La placa soporte de AISI 304 se simulará como “AISI 304”, disponible en la biblioteca de materiales de SolidWorks, y que tiene las siguientes propiedades mecánicas:

Property	Value	Units
Elastic Modulus	190000	N/mm ²
Poisson's Ratio	0.29	N/A
Shear Modulus	75000	N/mm ²
Mass Density	8000	kg/m ³
Tensile Strength	517.017	N/mm ²
Compressive Strength		N/mm ²
Yield Strength	206.807	N/mm ²
Thermal Expansion Coefficient	1.8e-05	/K
Thermal Conductivity	16	W/(m·K)

Tabla 5 Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304 (MATEREALITY, 2026).

4.5.3.3 Escuadras

Las escuadras están fabricadas en una aleación de zinc fundido a presión, pero el fabricante no da información de qué aleación es exactamente. Se ha elegido “Zinc AC41A Alloy, As Cast” para la simulación, ya que estaba disponible en la biblioteca de SolidWorks como aleación de fundición típica. Sus propiedades son las siguientes:

Property	Value	Units
Elastic Modulus	85000	N/mm ²
Poisson's Ratio	0.3	N/A
Shear Modulus		N/mm ²
Mass Density	6700	kg/m ³
Tensile Strength	330	N/mm ²
Compressive Strength	600	N/mm ²
Yield Strength		N/mm ²
Thermal Expansion Coefficient	2.74e-05	/K
Thermal Conductivity	108.9	W/(m·K)

Tabla 6 Propiedades mecánicas de la aleación Zinc AC41A Alloy, As Cast (MATEREALITY, 2026).

4.5.4 MALLADO

Se ha utilizado un mallado sólido automático de calidad “alta”, según el software de mallado de SolidWorks. Ha resultado en un mallado de 2 126 748 elementos.

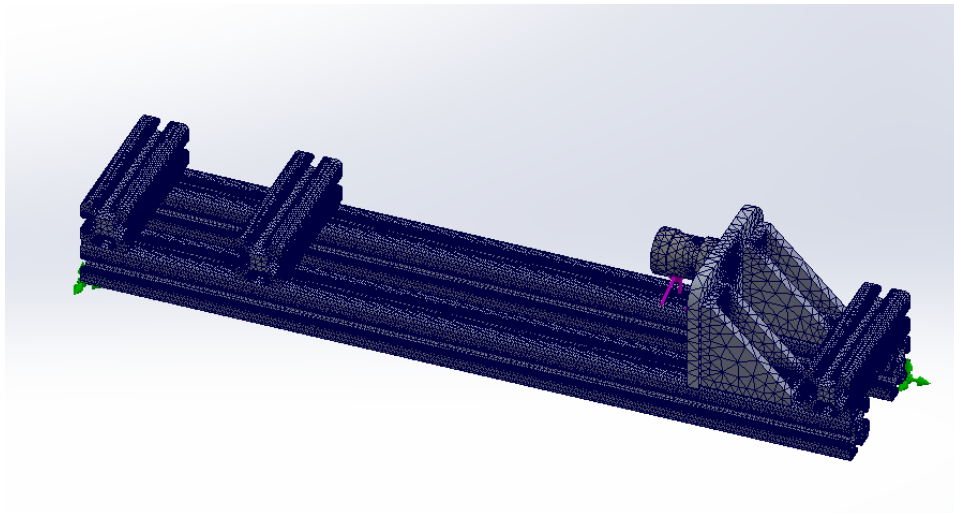


Figura 23 Representación gráfica del mallado.

Debido a la sección compuesta de las extrusiones de aluminio, estas tienen un mallado de un tamaño mucho menor. Esto no es un problema, ya que estamos comprobando la rigidez torsional, y estos elementos son los más esbeltos del conjunto.

Study name	bastidor2* (-bastidor-)
DetailsMesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Blended curvature-based mesh
Jacobian points for High quality mesh	16 points
Max Element Size	26.0212 mm
Min Element Size	1.30106 mm
Mesh quality	High
Total nodes	2126748
Total elements	1309900
Maximum Aspect Ratio	37.643
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	98.2
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0.361
Percentage of distorted elements	0
Number of distorted elements	0
Remesh failed parts independently	Off
Reuse mesh for identical bodies	Off
Number of bodies that have reused mesh	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:01:47
Computer name	

Tabla 7 Características del mallado.

4.5.5 RESULTADOS

Una vez determinadas las sujeciones, cargas, propiedades mecánicas, y mallado; se ha resuelto el Análisis de Elementos Finitos. Primero se analizarán las tensiones (que se prevén mínimas) y, a continuación, las deformaciones.

4.5.5.1 Tensiones

Del análisis de tensiones se obtiene el siguiente resultado (deformación a escala 100:1):

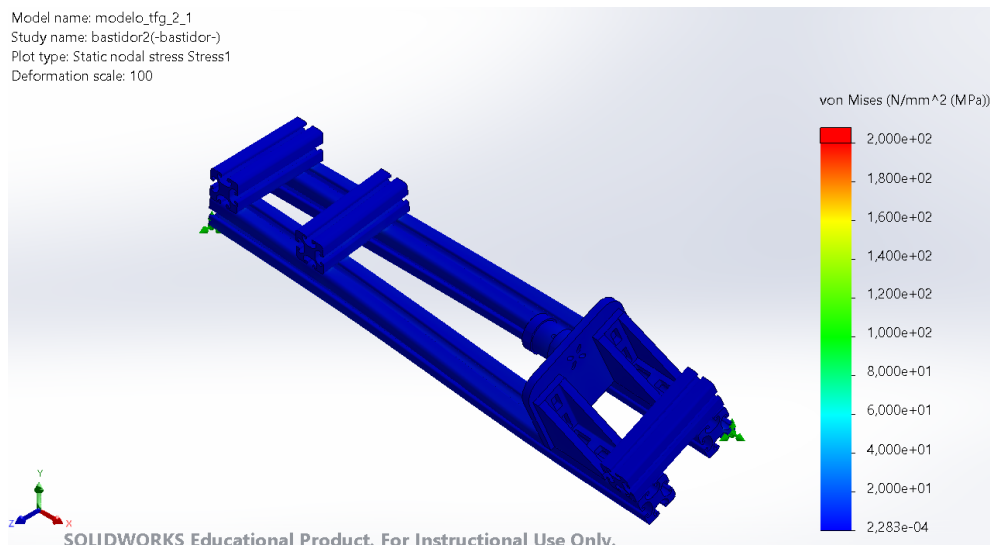


Figura 24 Tensiones en MPa según elementos finitos (20Nm).

Como se puede observar (si se ignoran los 3 puntos matemáticamente fijados para el cálculo) las tensiones a las que se ven sometidos el bastidor y el soporte son extremadamente bajas. Esto era de esperar, ya que la estructura está diseñada siguiendo un criterio de mínima deformación, lo que implica secciones sobredimensionadas en cuanto a resistencia.

4.5.5.2 Deformaciones

Las deformaciones son el factor relevante en este caso ya que, a mayor deformación, mayor es el error de medida. Se obtiene la siguiente figura representando los desplazamientos en mm (factor de escala 100:1):

Model name: modelo_tfg_2_1
Study name: bastidor2(-bastidor-)
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 100

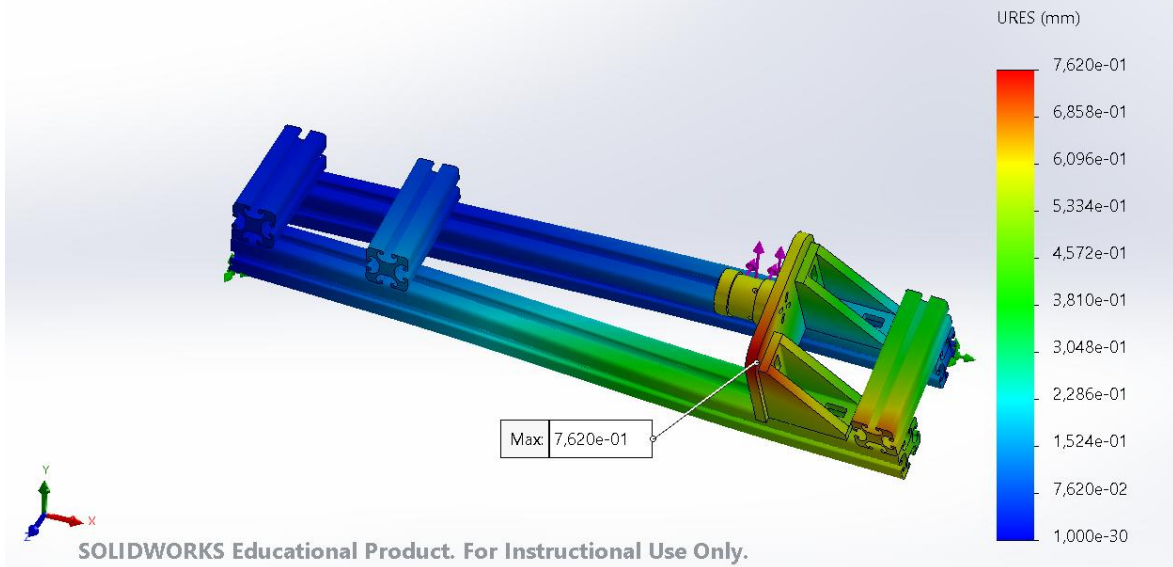


Figura 25 Desplazamientos en mm según elementos finitos (20Nm).

Como la deformación más relevante es el ángulo girado respecto a la posición de referencia (que es la original), se va a calcular el ángulo extremo visto desde el eje.

Por tratarse de un giro muy pequeño y, por tanto, un ángulo muy pequeño, se estima a partir de la distancia máxima entre uno de los puntos fijos y el punto de máximo desplazamiento. El valor de la distancia máxima antes de la deformación es de algo menos de 554mm según el modelo:

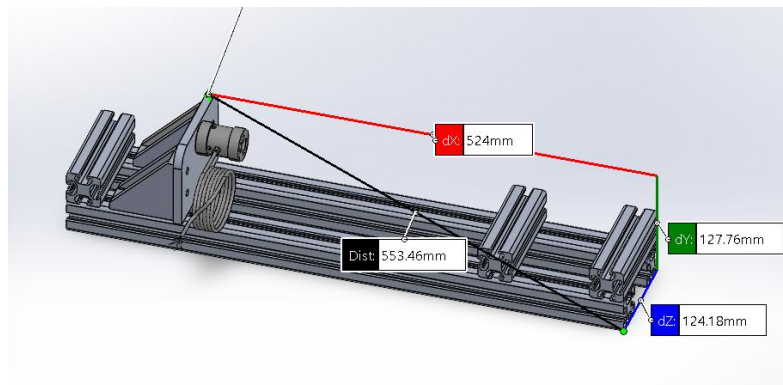


Figura 26 Medida de la distancia máxima entre uno de los puntos fijos y el punto de mayor desplazamiento.

Como el desplazamiento máximo es de 0,762mm (véase *Figura 25*), el giro es aproximadamente:

$$\theta_{max} \approx \tan^{-1} \left(\frac{0,762}{554} \right) \approx 0,0788^\circ$$

4.5.6 CONCLUSIONES DEL FEA

A la luz de los resultados del Análisis por Elementos Finitos se tiene un giro extremo de algo menos de 0,08°. Y teniendo en cuenta que el ensayo de más corto recorrido del cual se tiene constancia es de poco más de 15° (a menos de 4,5Nm, no a 20Nm).

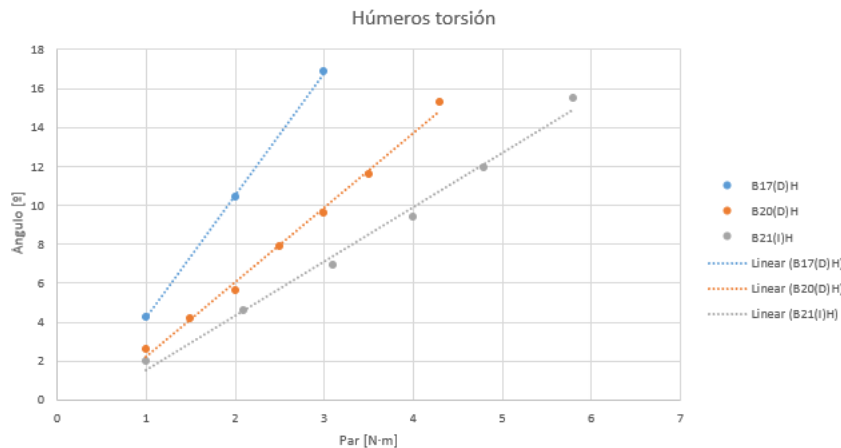


Figura 27 Resultados de ensayos de torsión manuales sobre muestras de búho. B20(D)H es el ensayo de torsión de más corto recorrido entre los realizados por el autor.

Teniendo en cuenta que, incluso en condiciones extremadamente desfavorables de medida y con muestras extremadamente frágiles, la desviación de medida debida a la deformación del bastidor sería de aproximadamente un 0,5%, este diseño se considera suficientemente rígido para el rango de cargas y el tipo de muestras que se espera ensayar.

Capítulo 5. CONTROL Y CAPTACIÓN DE DATOS

Una vez definidos los aspectos mecánicos del conjunto, se hace necesario estudiar la electrónica de este. Se podrían distinguir dos funciones generales del control electrónico, a saber, provocar el giro del motor a la velocidad angular especificada y transmitir los datos necesarios al ordenador para elaborar la curva de esfuerzo – carrera.

5.1 CONTROL DEL MOTOR

El control del motor paso a paso lo realiza, como indica su nombre, el controlador. Aquí es importante distinguir la función del programa digital (que no se estudia en esta memoria) y la del controlador.

El primero interpreta las especificaciones de ensayo introducidas en lenguaje humano por el operario y las traduce a una serie de pulsos binarios (digitales) que el controlador pueda recibir.

El segundo, recibiendo instrucciones del programa, manda pulsos eléctricos a frecuencias concretas al motor para hacerlo girar.

De aquí se deduce algo verdaderamente importante, este diseño sólo es capaz de controlar directamente (sin realimentación) la velocidad de giro, no el par aplicado.

Aunque no se definirá la forma concreta de hacer esto hasta la programación de la máquina, parece razonable utilizar un módulo Raspberry Pi a modo de convertidor analógico – digital para establecer los parámetros de giro y relacionar estos con las lecturas de par y ángulo.

5.2 CAPTACIÓN DE DATOS

Durante la realización del ensayo, el programa debe ir recibiendo unas parejas de datos para poder elaborar las gráficas esfuerzo (par) – carrera (ángulo girado). De los datos de estas gráficas se obtendrá la información necesaria para la caracterización mecánica de la muestra.

Para esto se utilizará el sistema QuantumX MX8408 y el software catmanAP asociado (*Anexo II – 22*), por estar previamente disponibles en el laboratorio y permitir la lectura de la señal de la célula de carga elegida (véase 7.2 *Célula de carga*).

A continuación, se muestran los resultados de 3 ensayos de torsión manuales sobre fémures de búho, como parejas de datos y como las gráficas resultantes.

	θ [°]	M[N·m]		θ [°]	M[N·m]		θ [°]	M[N·m]
B21(I)F	2,8	1	B17(D)F	5,5	1	B20(D)F	3,15	1
	4,1	1,7		12,7	2		5,9	1,6
	6,9	2,5		19,4	2,5		7,55	2,1
	9,3	3,3		-	-		11,3	2,8
	11,9	4,1		-	-		15,35	3,5
	13,6	4,5		-	-		21	4
	16,2	5		-	-		-	-
	-	6,3		27,5	3		-	4

Tabla 8 Extracto de un conjunto de resultados de ensayos de torsión manuales sobre muestras de fémur de búho, como parejas de datos.

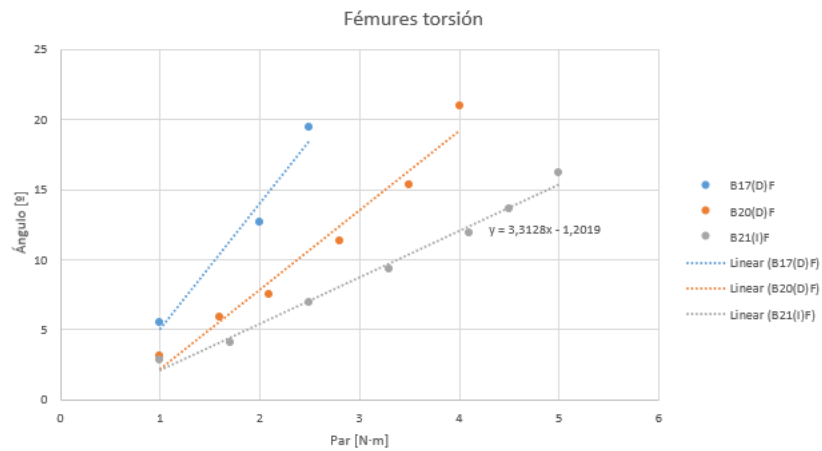


Figura 28 Extracto de un conjunto de resultados de ensayos de torsión manuales sobre muestras de fémur de búho, como gráfica.

En esencia, el software de captación hará este mismo proceso de grabar una posición de ángulo y una lectura de par. La diferencia con el ensayo manual es que esta grabación se realizará de forma automática cientos de veces por segundo, en lugar de una vez cada pocos segundos.

5.2.1 PAR TORSOR

El par torsor se obtiene de la tensión de salida de la célula de carga. Este aparato funciona en su rango de operación como un transductor, es decir, hay una relación lineal y directa entre la diferencia de tensión a la salida y la magnitud del par torsor.

El sistema de captación QuantumX MX8408 permite leer esta diferencia de tensión y, mediante el software catmanAP, interpretarla y pasarla al programa informático.

5.2.2 ÁNGULO GIRADO

Al usar un motor paso a paso, que gira “pasos” discretos de ángulo, el cabezal giratorio hace lo mismo. Por cada paso de 1’8° del eje del motor, el conjunto corona – eje – cabezal gira 0’072° gracias a la relación de transformación 25:1 en el conjunto reductor. Esto significa que el ángulo girado ya se conoce, pues se utiliza como entrada, es un dato.

5.2.3 LA POSIBILIDAD DE CONTROL EN PAR

De los subapartados anteriores se deduce correctamente que el único control directo posible es en ángulo. Es decir: el programa le dice a la máquina que gire $0'072^\circ$, la máquina gira ese ángulo y le comunica al programa que, para hacerlo, ha hecho falta un par de $T \text{ N}\cdot\text{mm}$; y esto pasa varias veces cada $0'072^\circ$ girados (cuántas veces exactamente dependerá de la frecuencia de captación y de la velocidad de giro programadas).

Sin embargo, se puede aprovechar la retroalimentación digital en el programa para establecer un control en par. Es decir: el programa le dice a la máquina que vaya girando hasta que detecte un par de $T \text{ N}\cdot\text{mm}$, cuando alcanza ese valor T , guarda el ángulo girado (que será necesariamente un múltiplo de $0'072^\circ$) como un valor θ ; y esto sigue ocurriendo hasta que se alcanza el máximo valor T o falle mecánicamente la muestra.

5.3 INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

Una vez recopilados los datos resultantes del ensayo, surge la necesidad de interpretar el significado físico de estos haciendo uso de la teoría de resistencia de materiales y de una serie de simplificaciones que dependerán de la geometría y características materiales de cada muestra particular.

5.3.1 EXTRAPOLACIÓN DE LA CURVA ESFUERZO – CARRERA

De las señales analógicas de la máquina; a través del controlador a la entrada del motor, y el conversor analógico – digital a la salida de la célula de carga, se obtienen las curvas esfuerzo – carrera ya mencionadas. Estas curvas presentan la limitación de ser únicamente aplicables a la muestra concreta (con sus dimensiones y material concretos), por lo que no resultan inmediatamente extrapolables.

Para extrapolar los resultados concretos de un ensayo es necesario pasar de la curva esfuerzo – carrera a una curva tensión cortante – deformación angular (cuya pendiente es la rigidez torsional).

Si se asume que la muestra presenta sección constante en su longitud, que esta se encuentra centrada en el eje de giro durante el ensayo, y que el comportamiento mecánico es isótropo y uniforme; entonces se cumplen las siguientes relaciones (Wang, X. et al., 2010):

5.3.1.1 Cortante máximo τ

La tensión cortante máxima viene dada por:

$$\tau = \frac{T * r}{Ip}$$

Siendo:

- τ la máxima tensión cortante
- T la magnitud del par torsor
- r el radio máximo
- Ip el momento de inercia polar alrededor del eje de giro

5.3.1.2 Deformación angular γ

La deformación angular viene dada por:

$$\gamma = \frac{\theta * r}{L}$$

Siendo:

- γ la deformación angular
- θ el ángulo de giro

- r el radio máximo
- L la longitud de la muestra

5.3.1.3 Módulo de elasticidad torsional G

El módulo de elasticidad torsional viene dado por:

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma}$$

Estos presupuestos son rara vez reales en el caso de los materiales que se han propuesto para las muestras⁴, pero si se toman con un acorde a la norma (o estandarizado, cuando no exista una normativa vigente) permiten caracterizarlos de forma precisa.

⁴ Véase 2.3 Muestras a ensayar.

Capítulo 6. DISEÑO FINAL

En este apartado se observa el diseño de la máquina en su conjunto, como combinación de todos los elementos electrónicos y mecánicos. Exige, por tanto, una advertencia introductoria: al no disponer de una célula de carga funcional, y haber ideado el diseño a partir de unas medidas que no coincidirán con las reales, este diseño “final” exigirá la adaptación de algunas dimensiones a la realidad.

Esto es particularmente cierto para la placa soporte. Los taladros para pasar los pernos de sujeción de la célula de carga deberán estar dispuestos de modo que coincidan con los de la brida fija del transductor, y ser del tamaño apropiado.

En cualquier caso, se tiene ahora un modelo muy bien definido de cómo debería ser la máquina con algunas garantías importantes:

- Existen elementos comerciales que pueden trabajar en conjunto tal y cómo han sido ensamblados en el CAD, ya que este ensamblaje no ha dado lugar a ningún conflicto espacial entre piezas.
- El análisis de elementos finitos anticipa resultados precisos en los ensayos gracias a la rigidez del bastidor, que minimiza la deflexión de este bajo carga. Así, la brida de referencia de la célula de carga permanecerá prácticamente estática durante el ensayo.
- La rigidez del equipo, además, ayudará a evitar estados tensionales complejos que puedan denigrar los resultados de las pruebas.

A continuación, se presentan las principales vistas del conjunto:

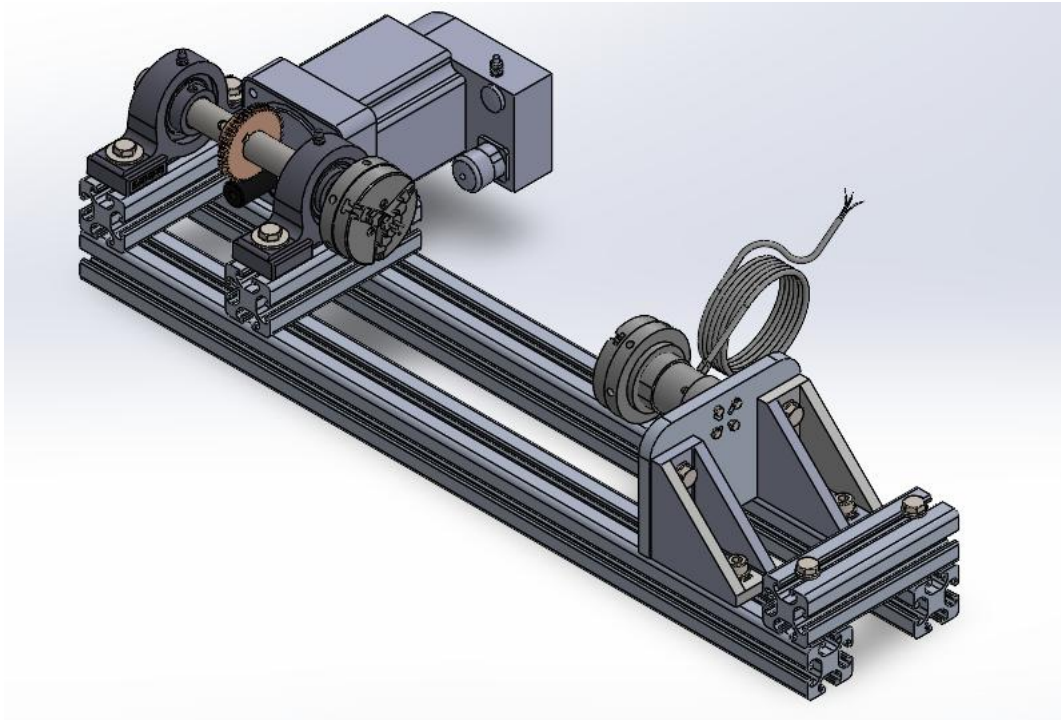


Figura 29 Vista isométrica del modelo CAD del conjunto.

Esta es la vista general ya presentada anteriormente, aquí se distinguen claramente los conjuntos del bastidor, el bloque motor (superior izquierda) y el bloque de medición (nótese el cable de la célula de carga).

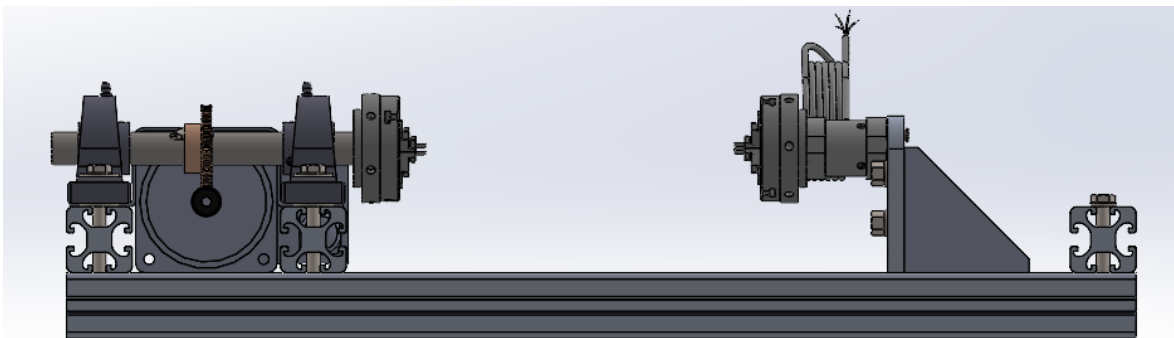


Figura 30 Vista frontal del modelo CAD del conjunto.

La vista frontal permite notar la disposición coaxial de los platos de garras, así como la posición de los pernos de montaje atravesando las traviesas.

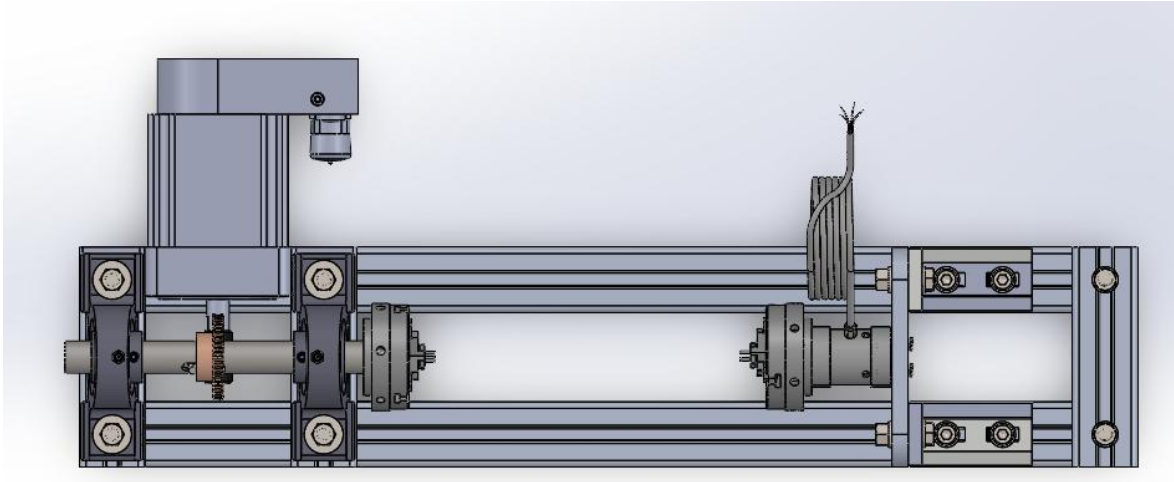


Figura 31 Vista superior del modelo CAD del conjunto.

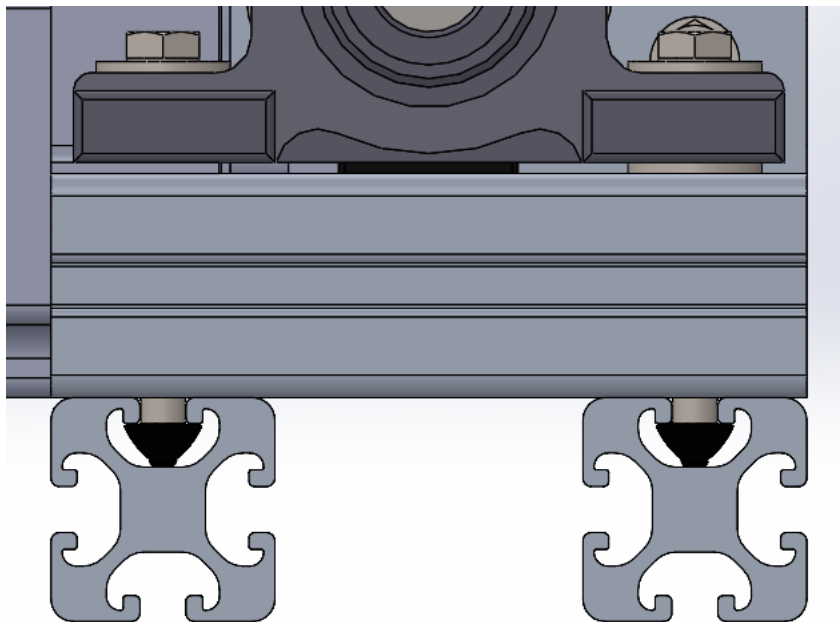


Figura 32 Detalle de la vista lateral del modelo CAD del conjunto.

Esta vista de detalle permite ver el ajuste de las tuercas de ranura dentro de las mismas. También se puede observar la función del juego de arandelas extra mencionado anteriormente (visible en el lado derecho de la figura, sobre la traviesa), que compensa el espesor de la brida del motor (visible en el lado izquierdo de la figura, también sobre la traviesa).

Capítulo 7. PRESUPUESTO

Una vez terminado el diseño se hace necesario un análisis pormenorizado de lo que supondría económicamente la fabricación de esta máquina.

Como ya se adelantó en la estimación económica, se va a considerar nulo el coste de la mano de obra. Así, el coste total es igual al coste de adquisición de los elementos del conjunto, que se determinará a partir de la lista de materiales.

7.1 COSTE DE DESPIECE

Todos los costes por unidad que aparecen en la *Tabla 8* se han extraído de los proveedores del *Anexo II: Catálogo de piezas comerciales*, a excepción del “Eje Ø20x200”, la “Placa soporte” y la “Brida del motor”, cuyo coste se calculará con un servicio online de mecanizado CNC y doblado de chapa (PCBWay, 2026). De mecanizar estas piezas en los talleres de ICAI se reduciría el coste de estas piezas notablemente.

En el caso de los perfiles 40x40 de aluminio, que se comercializan en longitudes de 1 metro, su coste total se computará a “tfg001_01: Extrusión 40x40x650”, ya que con 2 medidas de 1 metro se podrán fabricar los 5 componentes de este material. No tendría sentido calcular un coste por milímetro y computar únicamente los milímetros utilizados, ya que el proveedor vende las longitudes de 1 metro enteras.

La tornillería normalizada se ha considerado en el presupuesto a partir de elementos comercialmente disponibles. No se ha hecho distinción entre elementos cuando estos son funcionalmente idénticos, por ejemplo, un tornillo DIN 933 es como un DIN 24014 pero roscado en toda su longitud, para esta aplicación uno y otro son exactamente igual de válidos, incluso si su diseño es distinto. Así, para la elaboración del presupuesto, se ha tomado el más disponible independientemente de si coincide exactamente o no con la norma de la lista de materiales (véase *Anexo IV: Planos*).

Toda la tornillería excepto las tuercas de ranura, de acuerdo con el criterio de priorizar la facilidad de limpieza y la resistencia a la corrosión, se ha elegido en acero inoxidable AISI 304.

Como no se ha adquirido la célula de carga, su precio se considerará por separado.

Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	NORMA	Ct.	€ p.u.	€ total
tfg001_1	Extrusión 40x40x650	-	2	30,33	60,66
tfg001_2	Soporte - rodamiento Ø20	-	2	16,09	32,18
tfg001_3	Eje Ø20x200	-	1	51,72	51,72
tfg001_4	Corona m=1, n=50, $\alpha=20^\circ$	DIN 867	1	79,20	79,20
tfg001_5	Mandril 3 mordazas	-	2	51,99	103,98
tfg001_6	Chaveta 6x6x22	DIN 6885	1	0,75	0,75
tfg001_7	Célula de carga (torsión)	-	1	-	-
tfg001_8	Motor paso a paso 1Nm, 1'8º	-	1	65,69	65,69
tfg001_9	Sin fin m=1, e=2, $\alpha=20^\circ$	-	1	17,22	17,22
tfg001_10	Escuadra 38x76x76	-	2	17,19	34,38
tfg001_11	Placa soporte	-	1	35,90	35,90
tfg001_12	Extrusión 40x40x135 (traviesa)	-	1	-	-
tfg001_13	Arandela plana M8	DIN 6902-A	14	0,116	1,624
tfg001_14	Tornillo c. Allen M8x20	ISO 4762	4	1,288	5,152
tfg001_15	Tornillo c. hexagonal M8x50	DIN 24014	2	0,999	1,998
tfg001_16	Tornillo c. hexagonal M8x30	DIN 24015	4	0,777	3,106
tfg001_17	Tuerca hexagonal M8	ISO 4034	4	0,375	1,498
tfg001_18	Arandela plana M3	DIN 6902-A	4	0,065	0,26
tfg001_19	Tornillo c. hexagonal M3x20	DIN 24014	4	0,088	0,352
tfg001_20	Brida del motor	-	1	10,91	10,91
tfg001_21	Arandela plana grande M8	DIN 9021	6	0,161	0,966
tfg001_22	Tornillo c. hexagonal M8x70	DIN 24014	4	0,876	3,504
tfg001_23	Tuerca ranura T M8 (Rexroth)	-	10	0,906	9,06
	Total (sin la célula de carga)	-	-	-	520,11

Tabla 9 Costes de adquisición del despiece.

7.2 CÉLULA DE CARGA

Puesto que, como ya se ha mencionado, la célula de carga no se pudo adquirir antes de la entrega de este TFG, el modelo exacto queda sin determinar. En este caso, a diferencia de los elementos estructurales, existe una enorme variedad de sistemas operativos y precios;

por esto, se ha elaborado la siguiente tabla con modelos de distintos fabricantes indicando su rango operativo, precisión nominal y precio⁵:

Marca	Modelo	Par	Precisión	Precio
HBK	TB1A/100	100Nm	0'05%	6544'55€ (software ya disponible en el laboratorio)
Burster (Insatec)	8631	20Nm	0'1%	1769€ (inc. software) ⁶
Transducer Techniques	TRT-200	22'5Nm	0'1%	868'67€ (inc. software)
Transducer Techniques	TRS-500	56'5Nm	0'1%	1482'88€ (inc. software)
Himmelstein	RTM 2202M(2-2)	22'6Nm	0'1%	4166'48€ (inc. software)
DwyerOmega	TQ 301-45N	45Nm	0'2%	892'90€
HITEC Sensor Dev.	01166-022-C0000	22'6Nm	0'1%	1967,27€

Tabla 10 Comparativa de precios de distintos proveedores de transductores de par estático.

Para elaborar este presupuesto, y considerando los datos reflejados en la tabla, se ha elegido la HBK TB1A/100. Este transductor de par se acopla de forma inmediata al software catmanAP disponible en el Laboratorio de Materiales mediante el sistema de captación QuantumX. Además, permite una precisión excelente en un rango de par muy amplio; por lo que seguiría siendo apropiada en caso de adaptar la máquina de ensayos para trabajar con rangos de par mayores.

⁵ El precio se ha obtenido a partir de consultas a distintos proveedores a lo largo de la elaboración de este presupuesto, por lo que pueden variar en el futuro.

⁶ La nota *inc. software* indica la inclusión tanto de las licencias de software correspondientes como de los sistemas de adquisición de datos necesarios. Las células de carga así marcadas serían por tanto *plug & play*.

Esto sólo aplica a la elaboración del presupuesto. La posición y el tamaño de las ranuras mecanizadas en la placa soporte deberán ajustarse a la geometría concreta de la brida fija de la célula de carga una vez sea definitiva la elección.

7.3 *COSTE DEL EQUIPO*

De los apartados anteriores, sumando el precio de adquisición del despiece, la célula de carga, y los elementos electromecánicos queda:

Concepto	Precio
Coste de despiece	520,11€
C.C. HBK TB1A/100	6544'55€
Controlador motor paso a paso	70'49€
Sistema de captación de datos	0€ ⁷
Módulo de desarrollo (Raspberry Pi 3 1GB B+ BCM2837B0) ⁸	42'99€
Total	7178'14€

Tabla 11 Coste del equipo.

⁷ Este sistema está ya disponible en el Laboratorio de Materiales, por lo que no supone ningún coste adicional.

⁸ En realidad, el módulo de desarrollo a utilizar quedará determinado por el programa que se pretenda usar. Se ha elegido este por ser un módulo común para programas sencillos.

7.4 COSTE FINAL

Habiendo calculado el coste material de la máquina queda añadir el coste de contingencias. Aunque pueda parecer excesivo para un diseño ya tan desarrollado, se toma un fondo de contingencias del 15%, ya que sigue tratándose de una máquina única y que no deja de ser un prototipo.

Así, aplicando la siguiente fórmula⁹:

$$CT = 100 * (CE + CMO) / (100 - RCon\%)$$

El Coste Total de la máquina será de **8444'88€**.

⁹ CT: Coste Total; CE: Coste del Equipo; CMO: Coste de Mano de Obra; RCon%: Reserva de Contingencias en tanto por ciento

Capítulo 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En conclusión, se ha diseñado una máquina de ensayos de torsión de bajo par, especialmente apta para ensayar material biológico y biomodelos según las necesidades del Laboratorio de Materiales de ICAI, y de acuerdo con la normativa vigente.

Aún así, no se han cumplido todos los objetivos planteados, ya que la máquina no se ha fabricado ni programado por no poder adquirir a tiempo las piezas necesarias. Esto hace evidente una realidad que no lo era durante el proceso de diseño: existen factores limitantes ajenos al control del ingeniero y que deben tenerse en cuenta.

En cualquier caso, el proceso de diseño ha resultado fructífero ya que ha dado lugar a toda la información necesaria para afrontar con seguridad el próximo paso: la fabricación. Esto debería resultar medianamente sencillo, ya que esta memoria recoge datos de proveedores de las piezas necesarias, así como información del ensamblaje.

Los pasos menos definidos a estas alturas son los de programación e implementación, que no tiene sentido desarrollar más allá de un nivel muy básico sin antes disponer del equipo en sí, para probar el correcto funcionamiento del sistema.

Este diseño, además, es adaptable. Para realizar ensayos de torsión de mayor par bastaría con cambiar la reductora y reforzar el bastidor, y para añadir carga axial bastaría con fabricar un dispositivo de resorte ajustable o de tracción mediante pesas y polea.

Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- AENECA. (2025). *IMPRESO SOLICITUD PARA VERIFICACIÓN DE TÍTULOS OFICIALES (id. 2503205)*. Gobierno de España. Ministerio de ciencia, innovación y universidades.
- ASM International. (1992). *ASM Handbook Volume 2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*.
- Barret, R. (1990). *Fastener Design Manual (NASA Reference Publication 1228)*. NASA.
- Cook, M., & Hanson, J. (2026). *What is Experimental Learning and Why Is It Important?*. American College of Education.
- Instron. (2026). *Torsion Add-On 3.0*. Obtenido de INSTRON: <https://www.instron.com/es/products/testing-systems/torsion-systems/torsion-add-on/>
- Jänsch, J., & Birkhofer, H. (2006). THE DEVELOPMENT OF THE GUIDELINE VDI 2221 - THE CHANGE OF DIRECTION. *International Design Conference*, (pág. 49). Dubrovnik.
- Martins da Costa, M. (2015). *Torsion Testing: A Comprehensive Guide to Engineering Analysis*. Obtenido de biopdi.com: <https://biopdi.com/torsion-testing/>
- MATEREALITY. (2026). Obtenido de SOLIDWORKS Materials Web Portal: <https://my.matereality.com/SolidWorks/LocateMaterialsToModel>
- Organización Internacional de Normalización. (2024). *Materiales metálicos. Alambre. Ensayo de torsión simple (Norma ISO 7800:2024)*.
- PCBWay. (2026). *Rapid Prototyping*. Obtenido de PCB Way: <https://www.pcbway.com/rapid-prototyping/>
-

- Tullu, A., Cha, J., & Ko, S. (2025). *Modeling and Symulation of Backlash Dynamics of Worm - Wheel System and Its Gap Size Estimation Using Kalman Filters*. IEEE.
- Útiles y Máquinas Industriales, S.A. (2026). *Máquina para ensayos de torsión modelo T-300*. Obtenido de umi.es: <https://www.umi.es/productos/maquina-ensayos-torsion/>
- Wang, X. et al. (2010). *Fundamental Biomechanics in Bone Tissue Engineering*. Morgan & Claypool.

ANEXO I: DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y USO DE IA

Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título **Diseño y fabricación de una máquina de ensayos de torsión** de la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2025 – 2026 es de mi autoría y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.


Uso de Inteligencia Artificial¹⁰

Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

- No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.
- He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la [Escala de Evaluación de Perkins et al. \(2024\)](#): “La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente”. En concreto, las Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

(indicar aquí el uso concreto que se ha hecho de la Inteligencia Artificial)

¹⁰ Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos...)



Firmado (alumno): Gonzalo Aguirre Estalella
Fecha: 06/07/2026

Autorización para la entrega del Proyecto

El Director del Proyecto	El co-Director del Proyecto (si aplica)
Fdo: D. Juan Carlos del Real Romero	Fdo: -
Fecha: 06/07/2026	Fecha: -

ANEXO II: CATÁLOGO DE PIEZAS COMERCIALES

- [1] Perfil estructural RS Pro, 40x40mm, ranura de 8mm, 1m. <https://es.rs-online.com/web/p/tubos-y-perfiles/7613319>
- [2] Motor paso a paso RS Pro, 1 Nm, 1'8°, 2'3V. <https://es.rs-online.com/web/p/motores-paso-a-paso/5350423>
- [3] Rodamiento de soporte Ø20mm con tornillo prisionero. <https://es.rs-online.com/web/p/soportes-de-ejes-con-rodamientos/7508946>
- [4] Tornillo sin fin m=1, e=2, $\alpha=20^\circ$ (EN8/AISI 1040). <https://es.rs-online.com/web/p/engranajes-de-tornillo-sinfin-y-pinon/5216907>
- [5] Corona para sin fin m=1, n=50, $\alpha=20^\circ$ (PB1/CuSn10P). <https://es.rs-online.com/web/p/engranajes-de-tornillo-sinfin-y-pinon/5216979?gb=a>
- [6] Escuadra 38x76x76 para perfil 40x40. <https://es.rs-online.com/web/p/componentes-de-conexion/7675698>
- [7] Tuerca ranura T M8. <https://es.rs-online.com/web/p/componentes-de-conexion/7675667>
- [8] Mandril de torno VEVOR de 3 mordazas 80mm. https://www.amazon.es/VEVOR-80-Autocentrante-Tornillos-Reversibles/dp/B0F2DQ4B55/ref=sr_1_8?_mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=2V11QP8VIZMYO&dib=eyJ2IjoiMSJ9.l8o1-PCswe3SIXyAD5FVmODtVC69IY43FLEaCwom1-vu7-llKj7HHmlgDiOW6QXRHBgenRioHL_ipHE2eKkeZoZ-cpNjvFHfpyhA4Bc6GAhDjl3j8hlibatLdZ6WEQmNGdrIKUMVcWI0Mn5GMwQK5hj9FUSfddvqvPJhkk6xKv6DaNY-C3FzPIJsoCOH5e6bo2jNanF-FxKX9buBJPr8sJ3MmLXR3eMc6X7oZkqDQsL10lgEjcM8LDlZxuiRUj4tPCvKMqgPwEUhLBqG-l09uwirJXydAzWzYrg1D-eJ7sg.Ea8ppxyXMvyLMvv-

[GrUHULv6AXU0QFWzuL1FWxa6mk4&dib_tag=se&keywords=mandril%2Btorno&qid=1771249564&sprefix=mandril%2Btorno%2Caps%2C252&sr=8-8&th=1](https://www.comillas.edu/GrUHULv6AXU0QFWzuL1FWxa6mk4&dib_tag=se&keywords=mandril%2Btorno&qid=1771249564&sprefix=mandril%2Btorno%2Caps%2C252&sr=8-8&th=1)

- [9] Kit de chavetas acero inoxidable. <https://es.rs-online.com/web/p/juegos-de-chavetas/3029161>
- [10] Arandela plana grande M8 Inox. DIN 9021. <https://es.rs-online.com/web/p/arandelas/7976250>
- [11] Arandela plana M8 Inox. DIN 125-A. <https://es.rs-online.com/web/p/arandelas/7976389>
- [12] Tornillo cabeza Allen M8x20 Inox. DIN 912. <https://es.rs-online.com/web/p/tornillos-allen/0281158>
- [13] Perno hexagonal M8x30 Inox. DIN 931. <https://es.rs-online.com/web/p/pernos-hexagonales/7976288>
- [14] Tuerca hexagonal M8 Inox. DIN 934. <https://es.rs-online.com/web/p/tuercas-hexagonales/0189608>
- [15] Arandela plana M3 Inox. DIN 125-A. <https://es.rs-online.com/web/p/tuercas-hexagonales/0189608>
- [16] Perno hexagonal M8x50 Inox. DIN 933. <https://es.rs-online.com/web/p/pernos-hexagonales/0190327>
- [17] Perno hexagonal M3x20 Inox, DIN 933. <https://es.rs-online.com/web/p/pernos-hexagonales/2873866>
- [18] Perno hexagonal M8x70 Inox. DIN 933. <https://es.rs-online.com/web/p/pernos-hexagonales/0289045>
- [19] Transductor estático de par:

- a. HBK, TB1A/100.
[https://b2bstore.hbm.com/myHBM/app/displayApp/\(cpgnum=1&layout=7.01-16_153_6_9_70_34_65_73_134_6&uiarea=6&cittem=B6A70A4E2ED9CD18E1000000AC109934D644494869EF3C62E1000000AC10A039&careas=B6A70A4E2ED9CD18E1000000AC109934&xcm=hbm_b2boccasionalcrm&rdb=0&pgsize=0\)/.do?rf=y](https://b2bstore.hbm.com/myHBM/app/displayApp/(cpgnum=1&layout=7.01-16_153_6_9_70_34_65_73_134_6&uiarea=6&cittem=B6A70A4E2ED9CD18E1000000AC109934D644494869EF3C62E1000000AC10A039&careas=B6A70A4E2ED9CD18E1000000AC109934&xcm=hbm_b2boccasionalcrm&rdb=0&pgsize=0)/.do?rf=y)
- b. Burster (Insatec), 8631 (20Nm). https://www.insatec.es/sensor_par_8631.htm
- c. Transducer Techniques, TRT-200. <https://www.transducertechniques.com/trt-torque-sensor.aspx>
- d. Transducer Techniques, TRS-500. <https://www.transducertechniques.com/trs-torque-sensor.aspx>
- e. Himmelstein, RTM 2202M(2-2). <https://www.himmelstein.com/torque-transducers/reaction-torque-transducers/solid-flange-reaction-torque-transducers/rtm-2200m>
- f. DwyerOmega, TQ 301-45N. <https://www.dwyeromega.com/es-es/flange-to-flange-mount-low-torque-sensors/TQ301/p/TQM301-45N>
- g. HITEC Sensor Developments, Inc., 01166-022-C0000.
<https://hitec.humaneticsgroup.com/products/torque-sensors/reaction-torque-sensors>
- [20] Controlador de motor paso a paso, 4 fases. <https://es.rs-online.com/web/p/controladores-de-motores/0206411>
- [21] Raspberry Pi 3 1 GB B+ BCM2837B0. <https://es.rs-online.com/web/p/raspberry-pi/1373331>

[22] QuantumX paquete: MX840B + catmanAP.

<https://www.hbkworld.com/es/products/instruments/mechanical-structural-daq/quantumx/measurement/p-1-MX840-PAKAP?unit=metric&page=3>

ANEXO III: ALINEACIÓN CON LOS ODS

El presente Trabajo de Fin de Grado responde a varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas.

- ODS 9: Industria, innovación e infraestructura

La alineación con este Objetivo de Desarrollo Sostenible es inmediata, ya que se trata de un trabajo de I+D que, además, tiene su aplicación directa en el mundo de la caracterización de materiales. Esto supone que este TFG es en sí mismo una forma de innovación y que servirá previsiblemente para seguir innovando.

- ODS 4: Educación de calidad

El desarrollado para este TFG pasará a manos del Laboratorio de Materiales de ICAI y, previsiblemente, se podrá usar en un futuro para laboratorios, demostraciones o investigaciones en las que participen alumnos de ingeniería.

Además, el TFG es en sí mismo un proceso académico, por lo que se alinea con este objetivo desde el inicio.

- ODS 3: Salud y bienestar

La industria médica sirve de contexto a la mayor parte de los ensayos de torsión. Es previsible que este equipo se utilice en proyectos de investigación de carácter médico.

- ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres

De forma más indirecta, este proyecto responde también al ODS 15 porque su principal uso de los ensayos de torsión en el Laboratorio de Materiales de ICAI ha sido el de caracterizar huesos de animales terrestres (búhos durante la estancia del autor en este, y perros antes de esto) para el diseño de implantes óseos.

Sin lugar a duda, dependiendo de la aplicación que de hecho se de en el futuro a esta máquina, esta puede ayudar a avanzar hacia otros Objetivos de Desarrollo Sostenible que no se contemplan en este anexo.

ANEXO IV: PLANOS

En este anexo se recoge la lista de materiales, los planos de despiece de aquellos elementos que han sido mecanizados o modificados de cualquier otro modo, y planos de conjunto. No se incluyen planos de aquellos elementos que quedarán montados tal y como salen de fábrica, ya que no aportarían información adicional.

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

C

B

B

A

A

Nº	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	NORMA	CANT.	MATERIAL
1	tfg001_1	Extrusión 40x40x650	-	2	Al 6063
2	tfg001_2	Soporte - rodamiento Ø20	-	2	-
3	tfg001_3	Eje Ø20x200	-	1	AISI 304
4	tfg001_4	Corona m=1, n=50, $\alpha=20^\circ$	DIN 867	1	CuSn10P
5	tfg001_5	Mandril 3 mordazas	-	2	-
6	tfg001_6	Chaveta 6x6x22	DIN 6885	1	AISI 304
7	tfg001_7	Célula de carga (torsión)	-	1	-
8	tfg001_8	Motor paso a paso 1Nm, 1'8°	-	1	-
9	tfg001_9	Sin fin m=1, e=2, $\alpha=20^\circ$	-	1	AISI 1040
10	tfg001_10	Escuadra 38x76x76	-	2	Al 6063
11	tfg001_11	Placa soporte	-	1	AISI 304
12	tfg001_12	Extrusión 40x40x135 (traviesa)	-	3	Al 6063
13	tfg001_13	Arandela plana M8	DIN 6902-A	14	AISI 304
14	tfg001_14	Tornillo c. Allen M8x20	ISO 4762	4	AISI 304
15	tfg001_15	Tornillo c. hexagonal M8x50	DIN 24014	2	AISI 304
16	tfg001_16	Tornillo c. hexagonal M8x30	DIN 24015	4	AISI 304
17	tfg001_17	Tuerca hexagonal M8	ISO 4034	4	AISI 304
18	tfg001_18	Arandela plana M3	DIN 6902-A	4	AISI 304
19	tfg001_19	Tornillo c. hexagonal M3x20	DIN 24014	4	AISI 304
20	tfg001_20	Brida del motor	-	1	AISI 304
21	tfg001_21	Arandela plana grande M8	DIN 9021	6	AISI 304
22	tfg001_22	Tornillo c. hexagonal M8x70	DIN 24014	4	AISI 304
23	tfg001_23	Tuerca ranura T M8 (Rexroth)	-	10	AISI 304
<p>La tornillería podrá adquirirse en otros materiales, según disponibilidad del mercado. Siempre priorizando la resistencia a la corrosión.</p>					
		NOMBRE	FECHA	MAQUINA DE TORSION	
DIBUJADO		Aguirre, G.	27/06/2026	LISTA DE MATERIALES	
COMPROBADO					
ESCALA:		FIRMA:		I.C.A.I	Nº DE LAMINA:
					BOM

2

1

4

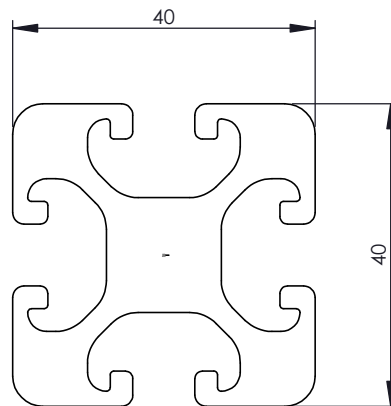
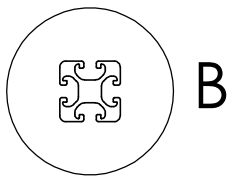
3

2

1

F

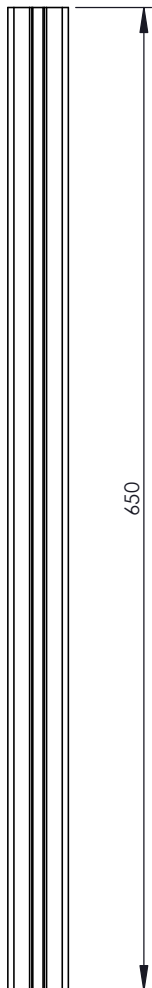
F



B
1 : 1

E

E



D

D

C

C

B

B

La sección viene extruida de fábrica, sólomente precisa el corte a longitud.
La ranura en T de 8.2mm acoge tornillos M8.

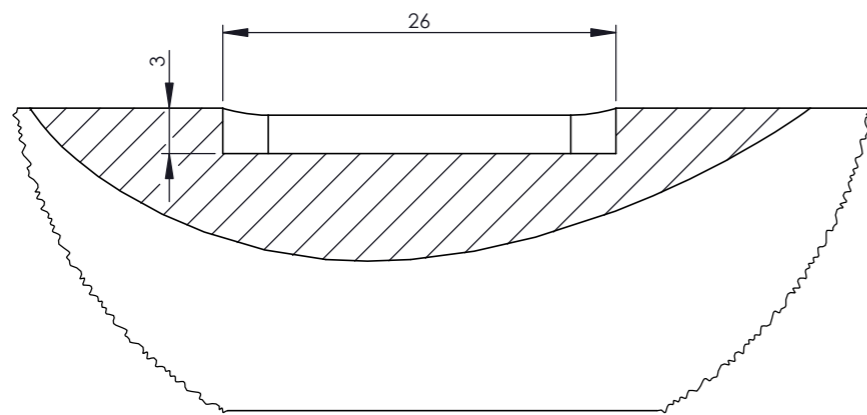
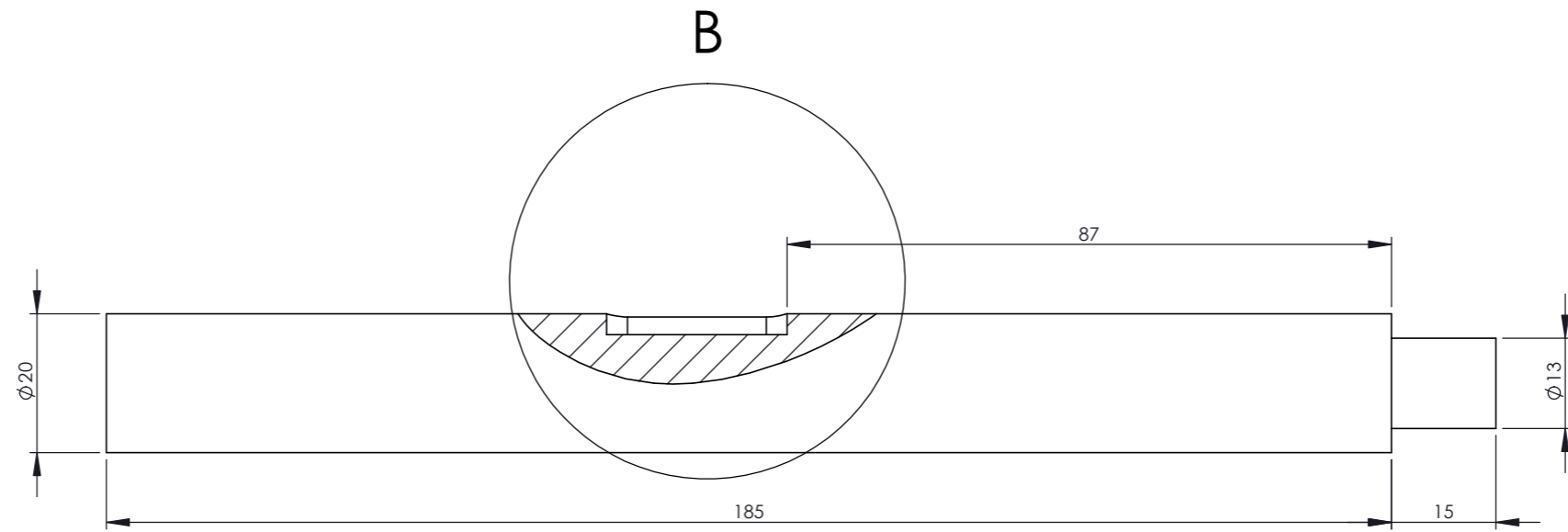
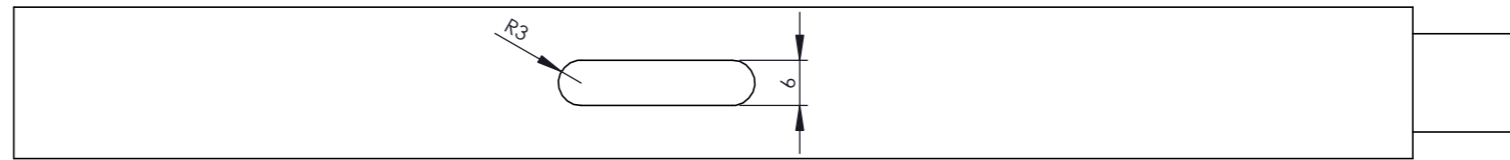
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: ISO 2768 LINEAL: m ANGULAR: K		ACABADO: Anodizado	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN 1
				2 unidades	
NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:		
DIBUJ. Aguirre, G.		30 06 2026	Extrusión 40x40x650		
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.		MATERIAL:	N.º DE DIBUJO		A4
		Al 6063 - O	tfg001_1		
		PESO: 1479,69 g	ESCALA: 1:5		HOJA 1 DE 1

A

A

2

1



B
2:1

32

ISO 2768 m,K

MATERIAL	AISI 304	FORMAT		SUBJECT	MAQUINA DE TORSION	REV.	1
WEIGHT (g)	477.50	A3		TITLE	tfg001_3		
DRAWN	Aguirre, G. / 202211267	DATE	05/07/2026				
CHECKED							
SCALE:	SIGNATURE					DOCUMENT	
1:1						SHEET 1 OF 1	

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

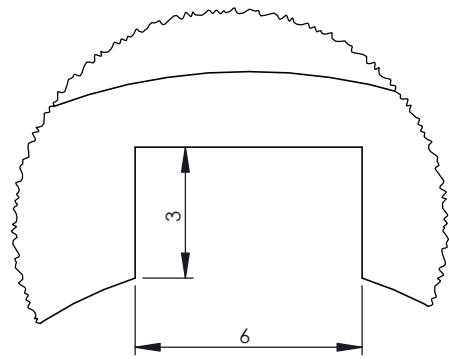
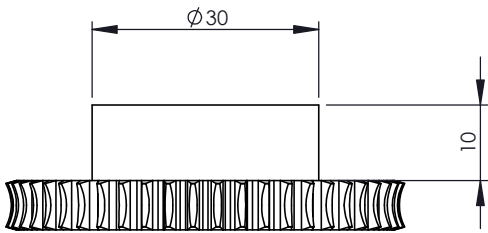
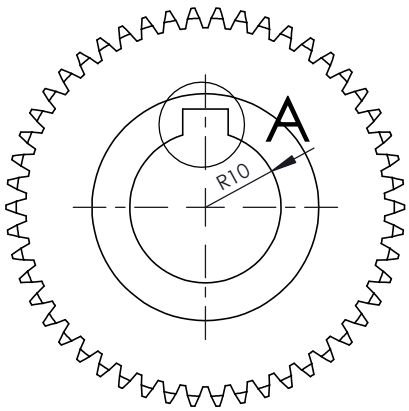
C

B

B

A

A



A
5 : 1

Módulo 1
50 dientes

$\alpha=20^\circ$

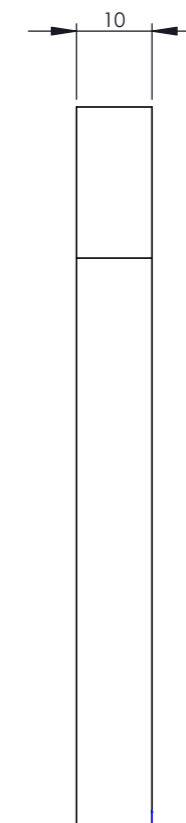
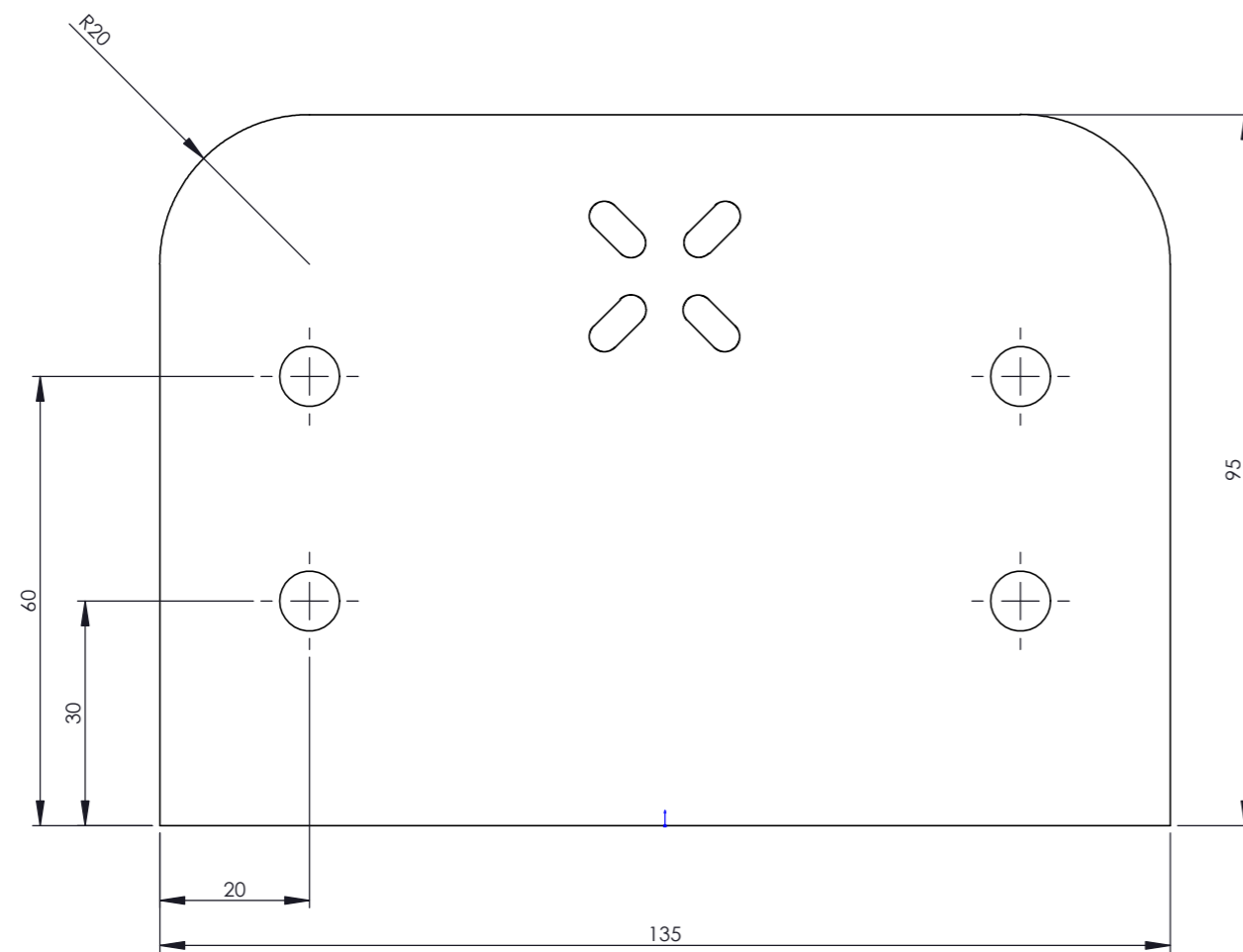
Para uso con sin fin de 2 entradas

La corona viene mecanizada de fábrica,
sólo es necesario mecanizar el alojamiento para la chaveta.

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: ISO 2768 LINEAL: m ANGULAR: K		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN 1	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ. Aguirre, G.				30 06 2026		Corona $m=1, n=50, \alpha=20^\circ$			
VERIF.									
APROB.						N.º DE DIBUJO			
FABR.									
CALID.				MATERIAL:		tfg001_4		A4	
				PB1 (CuSn10P)					
				PESO: 124.83		ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1	

2

1



La placa es simétrica.
 La posición y el tamaño de las ranuras a casar con la brida fija de la célula de carga dependerá de la geometría de esta, por eso no quedan indicados.
 Todos los agujeros son pasantes.
 ISO 2768 m, K.

MATERIAL	AISI 304	FORMAT		SUBJECT	MAQUINA DE TORSION	REV.	1
WEIGHT (g)	985.76	A3		TITLE	Placa Soporte		
DRAWN	NAME / STUDENT ID		DATE				
CHECKED	Aguirre, G. / 202211267		05/07/2026				
SCALE:	SIGNATURE		DOCUMENT		SHEET 1 OF 1		
1:1							

4

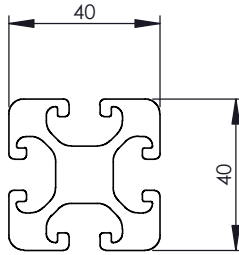
3

2

1

F

F

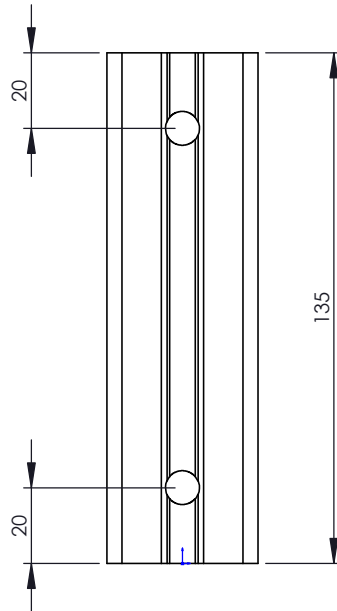


E

E

D

D



C

C

B

B

La sección viene extruida de fábrica, sólomente precisa el corte a longitud y los taladros de 8.2mm.
 La ranura en T de 8.2mm acoge tornillos M8.

A

A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: ISO 2768 LINEAL: m ANGULAR: K		ACABADO: Anodizado	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN 1
				3 unidades	
NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:		
DIBUJ. Aguirre, G.		30 06 2026	Extrusión 40x40x135		
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.		MATERIAL:	N.º DE DIBUJO		A4
		Al 6063 - O	tfg001_12		
		PESO: 302,03 g	ESCALA:1:2		HOJA 1 DE 1

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

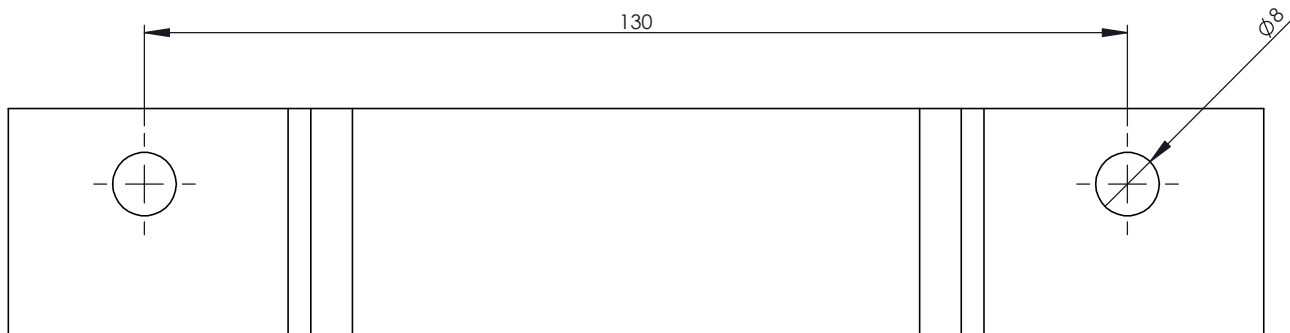
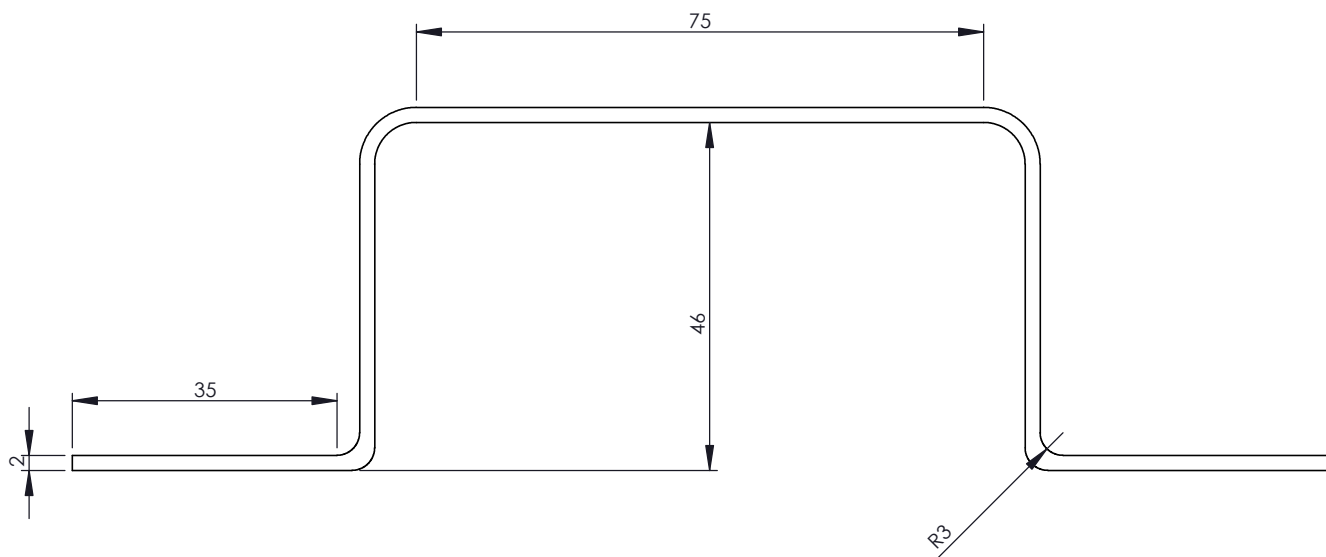
C

B

B

A

A



Es simétrico.

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: ISO 2768 LINEAL: m ANGULAR: K		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN 1	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ. Aguirre, G.				30 06 2026		Brida del motor			
VERIF.									
APROB.						N.º DE DIBUJO			
FABR.									
CALID.				MATERIAL:		tfg001_20		A4	
				AISI 304					
				PESO: 119,39		ESCALA: 1:1		HOJA 1 DE 1	

2

1

