



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y evaluación de eslabones robóticos de rigidez variable basados en jamming granular

Autora:

Tanya Ilieva Timova

Tutor: Juan Manuel Gandarias Palacios

Cotutor: Francisco Pastor Martín

Departamento: Ingeniería de Sistemas y Automática

18 de agosto de 2025

Сърцето ми е тук, но корените ми са там.

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mis padres. Sin ellos, no sería la persona que soy hoy. Gracias por cada sacrificio silencioso, por vuestro esfuerzo, por no rendiros nunca. Gracias a vuestro amor incondicional, porque sé que no es fácil dejar atrás vuestro país, vuestra familia, vuestros orígenes, para construir un futuro mejor para vuestros hijos. También quiero agradecer a mi familia en Bulgaria, cuyo apoyo siento incluso en la distancia. Espero de corazón que estéis orgullosos de mí y de mi hermano, de las personas en las que nos hemos convertido y del camino que seguimos recorriendo gracias a vuestra fuerza.

A mi pareja y a mis amigos, gracias por ser mi refugio durante estos años. Habéis sido mucho más que compañía: habéis sido apoyo, paciencia, risa, consuelo y alegría. Gracias por creer en mí siempre, por empujarme a seguir adelante y por compartir conmigo cada paso. No solo sois parte de mi vida, sois parte de mi hogar.

Y por último, gracias a mi tutor y cotutor de este Trabajo de Fin de Grado. Gracias por vuestra cercanía, por el tiempo dedicado y por compartir vuestros conocimientos. Este proyecto no habría sido posible sin vuestra guía y apoyo constante.

Índice

Agradecimientos	v
Resumen	xvii
Abstract	xix
1 Introducción	1
1.1 Contexto	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Metodología	3
1.4 Estructura del Documento	4
2 Fundamentos Teóricos	5
2.1 Concepto y definición de Jamming	5
2.1.1 Jamming granular	6
2.1.2 Jamming tubular	8
2.1.3 Jamming laminar	8
3 Estado del Arte	9
3.1 Soft Robotics	9
3.2 Jamming	14
3.2.1 Jamming granular	14
3.2.2 Jamming tubular	15
3.2.3 Jamming laminar	15
4 Metodología	17
4.1 Herramientas utilizadas	17
4.1.1 Herramientas de diseño y fabricación	17
4.1.2 Hardware y electrónica	18
4.1.3 Software	18
4.2 Diseño y fabricación de los eslabones robóticos de rigidez variable . .	18
4.2.1 Diseño 3D de los moldes y piezas rígidas para los eslabones .	20
4.2.1.1 Eslabón 100 % blando	24
4.2.1.2 Eslabón 75 % blando	26
4.2.1.3 Eslabón 50 % blando	27
4.2.1.4 Eslabón 25 % blando	29

4.2.1.5	Diseño eslabón completamente sólido	30
4.2.2	Fabricación de los eslabones rígido-blandos	31
4.2.2.1	Primera etapa de fabricación	33
4.2.2.2	Segunda etapa de fabricación	35
4.2.2.3	Tercera etapa de fabricación	38
4.3	Diseño e implementación del circuito electroneumático	42
4.3.1	Componentes neumáticos	43
4.3.2	Componentes electrónicos y control	44
4.3.3	Diseño de placa de prototipado (PCB)	45
4.4	Desarrollo del Software	46
4.4.1	Control del sistema electroneumático	46
4.4.2	Lectura del sensor de fuerza	47
4.4.3	Control del motor Dynamixel	48
4.4.4	Lanzamiento y ejecución del sistema	48
4.4.4.1	Archivo <i>serial_nodes.launch</i>	48
4.4.4.2	Script <i>iniciar_experimento.sh</i>	49
5	Experimentos y Resultados	51
5.1	Experimento 1: Tiempo de transición rígido-blando	52
5.1.1	Objetivo	52
5.1.2	Procedimiento	52
5.1.3	Resultados	53
5.2	Experimento 2: Análisis de la deformación sin vacío	54
5.2.1	Objetivo	54
5.2.2	Procedimiento	54
5.2.3	Resultados	54
5.3	Experimento 3: Estudio de posición y fuerza de eslabones de rigidez variable a distintos niveles de vacío	55
5.3.1	Objetivo	55
5.3.2	Procedimiento	55
5.3.3	Resultados	56
5.3.3.1	Vacio 0 bares	56
5.3.3.2	Vacio -0.4 bares	58
5.3.3.3	Vacio -0.9 bares	61
5.3.3.4	Resumen comparativo de los resultados	63
5.4	Experimento 4: Análisis comparativo de la dinámica de los eslabones de rigidez variable con el eslabón completamente sólido	64
5.4.1	Objetivo	64
5.4.2	Procedimiento	64
5.4.3	Resultados	64
6	Conclusiones y Líneas Futuras	67
6.1	Conclusiones	67
6.2	Líneas Futuras	68

Índice de Figuras

2.1	Transición del estado “unjammed” al estado “jammed” tras superar el Punto J(ϕ_c). (Fuente: ver texto).	6
2.2	Tipos de jamming. (Fuente: ver texto).	6
2.3	“Jamming” de partículas. (Fuente: ver texto).	7
3.1	Grados de libertad robot rígido vs robot blando. (Fuente: ver texto).	10
3.2	Módulo de Young definido como la relación entre la fuerza aplicada F y la elongación δ de una barra prismática con longitud L_0 y sección transversal A_0 . (Fuente: ver texto).	10
3.3	Comparación distintos tipos de robots. (Fuente: ver texto).	11
3.4	Ejemplos de robots blandos bio-inspirados. (a) Robot inspirado en una oruga. (b) Robot inspirado en una estrella de mar. (Fuente: ver texto).	11
3.5	BionicSoftArm de Festo. (Fuente: ver texto).	12
3.6	Ejemplos de Soft Grippers. (a) Gripper de Soft Robotics Inc. (b) Jamming gripper de Creative Machines Lab. (Fuente: ver texto).	13
3.7	Ejemplos de robótica blanda en la medicina. (a) Guante robótico blando para rehabilitación. (b) Actuador blando para corazón. (Fuente: ver texto).	13
3.8	Gripper robótico usando jamming. (Fuente: ver texto).	14
3.9	Prótesis usando jamming. (Fuente: ver texto).	14
3.10	Serpiente elaborada con jamming tubular. (a)–(c) Movimiento libre sin vacío. (d) y (e) Movimiento bajo una restricción externa sin vacío. (f) Estado rígido bajo vacío. (Fuente: ver texto).	15
3.11	Exoesqueleto elaborado con jamming laminar. (a) Componentes del jamming laminar. (b) Aplicación del jamming laminar como mecanismo de bloqueo articular. (c) Para proporcionar soporte lumbar. (d) Para sostener cargas con los brazos. (Fuente: ver texto).	16
4.1	Eslabones de rigidez variable con distintos porcentajes de parte blanda. (a) Eslabón 100 % blando. (b) Eslabón 25 % blando. (c) Eslabón 75 % blando. (d) Eslabón 50 % blando.	20
4.2	Conjunto de piezas para la parte superior de los eslabones rígidos-blandos. (a) Casquillo 20 mm. (b) Parte superior eslabones. (c) Parte superior con un casquillo. (d) Parte superior con los dos casquillos.	21

4.3	Conjunto de piezas para la parte inferior de los eslabones rígidos-blandos. (a) Casquillo parte inferior. (b) Parte inferior eslabones. (c) Parte inferior con un casquillo. (d) Parte inferior con los dos casquillos.	22
4.4	Moldes y componentes para a segunda etapa de fabricación del eslabón. (a) Vista interior de los moldes para acople de las partes inferiores del eslabón. (b) Vista exterior de los moldes para acople de las partes inferiores del eslabón. (c) Insertos para la formación de la cavidad de relleno. (d) Acople de los moldes con la parte inferior y el inserto.	23
4.5	Moldes y componentes para la última etapa de fabricación del eslabón. (a) Vista interior de los moldes para la última etapa de fabricación. (b) Vista exterior de los moldes para la última etapa de fabricación. (c) Acople de los moldes con la parte inferior y la parte superior del eslabón.	24
4.6	Piezas eslabón 100 % blando. (a) Casquillo parte inferior. Altura: 25.76 mm. Modelo en Onshape ⁸ . (b) Parte inferior. Altura: 20 mm. Modelo en Onshape ⁹ . (c) Inserto. Altura: 87.5 mm. Modelo en Onshape ¹⁰ .	25
4.7	Conjunto de ensamblajes para el eslabón 100 % blando (a) Ensamblaje de la segunda etapa de fabricación del eslabón 100 % blando. (b) Ensamblaje de la tercera etapa de fabricación del eslabón 100 % blando.	25
4.8	Piezas eslabón 75 % blando. (a) Casquillo parte inferior. Altura: 48.26 mm. Modelo en Onshape ¹¹ . (b) Parte inferior. Altura: 42.5 mm. Modelo en Onshape ¹² . (c) Inserto. Altura: 65 mm. Modelo en Onshape ¹³ .	26
4.9	Conjunto de ensamblajes para el eslabón 75 % blando. (a) Ensamblaje de la segunda etapa de fabricación del eslabón 75 % blando. (b) Ensamblaje de la tercera etapa de fabricación del eslabón 75 % blando.	27
4.10	Piezas eslabón 50 % blando. (a) Casquillo parte inferior. Altura: 70.76 mm. Modelo en Onshape ¹⁴ . (b) Parte inferior. Altura: 65 mm. Modelo en Onshape ¹⁵ . (c) Inserto. Altura: 42.5 mm. Modelo en Onshape ¹⁶ . .	28
4.11	Conjunto de ensamblajes para el eslabón 50 % blando. (a) Ensamblaje de la segunda etapa de fabricación del eslabón 50 % blando. (b) Ensamblaje de la tercera etapa de fabricación del eslabón 50 % blando.	28
4.12	Piezas eslabón 25 % blando. (a) Casquillo parte inferior. Altura: 93.26 mm. Modelo en Onshape ¹⁷ . (b) Parte inferior. Altura: 87.5 mm. Modelo en Onshape ¹⁸ . (c) Inserto. Altura: 20 mm. Modelo en Onshape ¹⁹ .	29
4.13	Conjunto de ensamblajes para el eslabón 25 % blando. (a) Ensamblaje de la segunda etapa de fabricación del eslabón 25 % blando. (b) Ensamblaje de la tercera etapa de fabricación del eslabón 25 % blando.	30
4.14	Conjunto de piezas del eslabón completamente sólido. (a) Parte inferior y superior del eslabón completamente sólido. (b) Parte intermedia del eslabón completamente sólido. (c) Ensamblaje del eslabón completo.	31

4.15	Preparación de los compuestos A y B para la mezcla de silicona. (a) Compuestos de silicona EcoFlex 00-10 A y B. (b) Vasos para compuestos A y B y para la mezcla vacíos. (c) Vasos de compuestos A y B llenos y depresores de madera.	32
4.16	Proceso de desgasificación de la silicona en la cámara de vacío. (a) Cámara y bomba de vacío. (b) Vaso con la mezcla en la cámara de vacío.	33
4.17	Secciones llenas de silicona listas para su curado. (a) Sección superior del eslabón, con sus correspondientes casquillos atornillados y llena de silicona desgasificada. (b) Sección inferior del eslabón, con sus correspondientes casquillos atornillados y llena de silicona desgasificada.	34
4.18	Secciones superior e inferior del eslabón de rigidez variable desmoldadas. (a) Sección superior desmoldada vista desde arriba. (b) Sección inferior desmoldada vista desde arriba. (c) Sección superior desmoldada. (d) Sección inferior desmoldada.	35
4.19	Piezas necesarias para la segunda etapa de fabricación.	36
4.20	Molde de la segunda etapa atornillado y lleno de silicona en la cámara de vacío.	37
4.21	Eslabón en segunda etapa de fabricación. (a) Molde de la segunda etapa totalmente cerrado, con silicona caliente en las juntas para evitar que se salga la silicona líquida. (b) Pieza desmoldada con la sección inferior del eslabón ensamblada con la “manga” creada para albergar el material granular.	37
4.22	Pegado de filtro rectangular en la sección inferior del eslabón de rigidez variable. (a) “Manga” de silicona enrollada con el rectángulo recortado. (b) Sección inferior con la “manga” enrollada y el filtro de café rectangular pegado.	38
4.23	Relleno de la “manga” de silicona con café. (a) “Manga” rellena de café con los moldes atornillados para contenerlo. (b) Pesaje de café con báscula.	39
4.24	Última etapa de fabricación, colocación del filtro. (a) Filtro redondo para evitar el filtrado de silicona líquida en el café. (b) Filtro redondo situado encima del café molido dentro de la “manga” de silicona.	40
4.25	Final de la fabricación del eslabón de rigidez variable. (a) Molde de la tercera etapa cerrado con la parte superior rígida ensamblada. (b) Eslabón de rigidez variable fabricado.	41
4.26	Los cinco eslabones fabricados, cuatro de rigidez variable y uno completamente sólido.	41
4.27	Circuito electrónico.	42
4.28	Circuito neumático.	43
4.29	Placa de prototipado para el circuito electroneumático.	46
5.1	Deflexión de los eslabones de rigidez variable sobre una hoja milimetrada. (a) Eslabón 25 % blando. (b) Eslabón 50 % blando. (c) Eslabón 75 % blando. (d) Eslabón 100 % blando.	55

5.2	Posición Vs. Tiempo a presión de 0 bares	57
5.3	Fuerza Vs. Tiempo a presión de 0 bares	57
5.4	Fuerza Vs. Posición a presión de 0 bares	58
5.5	Posición Vs. Tiempo a presión de -0.4 bares	59
5.6	Fuerza Vs. Tiempo a presión de -0.4 bares	60
5.7	Fuerza Vs. Posición a presión de -0.4 bares	60
5.8	Posición Vs. Tiempo a presión de -0.9 bares	61
5.9	Fuerza Vs. Tiempo a presión de -0.9 bares	62
5.10	Fuerza Vs. Posición a presión de -0.9 bares	62
5.11	Posición Vs. Tiempo a presión de -0.9 bares	65
5.12	Fuerza Vs. Tiempo a presión de -0.9 bares	65
5.13	Fuerza Vs. Posición a presión de -0.9 bares	66

Índice de Tablas

4.1	Cantidad de café molido utilizada en cada tipo de eslabón sólido-blando	39
5.1	Tiempos de activación y desactivación del vacío según el porcentaje de parte blanda	53
5.2	Fuerza máxima registrada por los eslabones de rigidez variable a distintos niveles de vacío (rango útil definido por la posición máxima del eslabón 25 % blando)	63
5.3	Fuerza relativa de los eslabones de rigidez variable calculada respecto al eslabón completamente sólido	66

Resumen

Palabras Claves: robótica blanda, granular jamming, eslabones robóticos, diseño 3D, control neumático.

En mayoría de robots blandos, la técnica utilizada para el aumento de rigidez es inyectar aire a alta presión. Sin embargo, esta técnica consta de limitaciones significativas: riesgos de seguridad debido a las presiones elevadas en las cámaras neumáticas, tiempos de respuesta lentos y una limitada relación rígido-blanda. Debido a esto, la técnica de “granular jamming” surge como una alternativa eficaz para controlar la rigidez de las estructuras.

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en el diseño, fabricación y evaluación de eslabones robóticos de rigidez variable, con distintas proporciones de parte blanda y sólida, utilizando la técnica de “granular jamming” para modificar su rigidez bajo demanda. La robótica blanda es un campo que ha estado ganando protagonismo en los últimos años debido a su alta capacidad de adaptación en entornos complejos y de colaboración con seres humanos. Teniendo en cuenta esto, se han fabricado varios prototipos de eslabones con distintas proporciones de materiales, empleando impresión 3D y silicona blanda.

Se han desarrollado 5 prototipos de eslabones con configuraciones diferentes, 100 % blando, 75 % blando, 50 % blando, 25 % blando y uno totalmente sólido, con el que poder comparar los resultados. Para la fabricación se ha utilizado impresión 3D para partes sólidas y moldeo con silicona para la zona de rigidez variable. Estas zonas se han llenado con café, que es el material granular utilizado para la aplicación de la técnica de “jamming”. Además, se ha diseñado un circuito electroneumático y se ha implementado un sistema de control y adquisición de datos, capaz de aplicar y quitar vacío a los eslabones y registrar su comportamiento. Para evaluar su capacidad de resistir fuerzas externas se ha utilizado un sensor de fuerza y un motor para desplazar el eslabón contra este. Se han diseñado distintos programas utilizando ROS y Arduino IDE para el control y adquisición de los datos en los experimentos.

Se han realizado cuatro experimentos: medición del tiempo de activación y desactivación del eslabón para cada eslabón, análisis visual de la deformación por gra-

vedad, determinación de la fuerza máxima soportada y comparación de estos valores respecto a un eslabón completamente sólido. Los resultados obtenidos demuestran que el diseño y distintas proporciones de materiales en los eslabones de rigidez variable influyen significativamente en su comportamiento. El prototipo de eslabón 50 % blando, que combina igual parte de material blando y de material sólido, es el que ofreció mejores resultados entre adaptabilidad y resistencia. Este diseño fue capaz de aumentar su rigidez considerablemente al aplicar el vacío, acercándose e incluso superando el comportamiento del eslabón sólido de referencia, pero manteniendo la capacidad de deformarse cuando no se aplica la técnica de “jamming”.

Este proyecto demuestra la viabilidad del uso de estructuras que combinan materiales sólidos y blandos, contribuyendo al estudio de estructuras de rigidez variable que pueden ser aplicadas a manipuladores robóticos, y sienta las bases para futuras mejoras en diseño y control.

Abstract

Key Words: soft robotics, granular jamming, robotic links, 3D design, pneumatic control

In most soft robots, stiffness is typically increased by injecting air at high pressure into internal chambers. However, this method presents several important limitations: safety risks due to high internal pressures, slow response times, and a limited soft-to-rigid ratio. In contrast, the “granular jamming” technique emerges as an effective alternative for controlling the stiffness of robotic structures.

This Bachelor’s Thesis focuses on the design, fabrication, and evaluation of variable stiffness robotic links with different proportions of soft and rigid parts, using the “granular jamming” technique to actively modify their stiffness. Soft robotics is a rapidly growing field due to its high adaptability to complex environments and safe interaction with humans. With this in mind, several link prototypes were developed using 3D printing for the rigid parts and soft silicone molding for the flexible sections.

A total of five prototypes were created, corresponding to different configurations: 100 % soft, 75 % soft, 50 % soft, 25 % soft, and one completely rigid which served as a reference. The soft sections were filled with ground coffee, used as the granular material for jamming. In addition, an electro-pneumatic circuit was designed, along with a control and data acquisition system capable of applying and releasing vacuum pressure on the links, while recording their mechanical behavior. A force sensor and motorized system were used to evaluate each link’s ability to withstand external forces. Control and data logging software was developed using ROS and Arduino IDE.

Four main experiments were conducted: measuring activation and deactivation time for each prototype, visual analysis of deformation under gravity, measurement of the maximum force each link could withstand, and comparison with the fully rigid link. The results show that the internal configuration and material distribution significantly affect the performance of variable stiffness links. The 50 % soft prototype, which balanced soft and rigid materials equally, achieved the best compromise

between adaptability and mechanical strength. It showed a considerable increase in stiffness when vacuum was applied, even matching or surpassing the rigid link's behavior, while maintaining flexibility when the jamming technique was not active.

This project demonstrates the feasibility of combining soft and rigid materials in the design of robotic structures, contributing to the development of variable stiffness elements for use in robotic manipulators, and laying the groundwork for future improvements in both design and control systems.

Capítulo 1

Introducción

Este capítulo introduce y contextualiza el trabajo realizado que se va a desarrollar a lo largo de este Trabajo de Fin de Grado. En él se expone la motivación del estudio de la manipulación robótica mediante el control de rigidez variable basado en la técnica de “jamming”. Se especifican los objetivos que se buscan conseguir con este proyecto, así como la planificación seguida y estructura del documento. Este trabajo toma como punto de partida el Trabajo de Fin de Grado de Estrella Isla Sulimma [1], en el que se estudia el comportamiento de eslabones basados en distintos tipos de “jamming”.

1.1. Contexto

En la actualidad, la robótica tiene cada vez más relevancia en muchos ámbitos de nuestro entorno. Los robots rígidos convencionales se usan para una gran variedad de tareas en manufactura y son altamente eficientes, sin embargo, tienen limitaciones en cuanto a adaptabilidad y colaboración directa con las personas. Debido a esto, está aumentando la investigación en la disciplina de la robótica blanda. Se trata de desarrollar robots cuya constitución es, principalmente, materiales flexibles (por ejemplo, siliconas), lo que también les dota de un número de grados de libertad más alto si se comparan con los tradicionales [2].

Dentro de este campo, han tomado gran relevancia las estructuras de rigidez variable. La posibilidad de modificar la rigidez en tiempo real conlleva grandes ventajas en cuanto a adaptación al entorno y a distintas tareas. La posibilidad de creación de eslabones que modifican su rigidez de forma controlada, da lugar a la creación de brazos robóticos más versátiles y adaptables.

Una de las técnicas con mayor éxito para lograr esta rigidez variable, es el “jam-

ming”. Esta técnica, como se explica en [3], es el mecanismo por el cual un material concreto puede cambiar de un estado fluido y manejable, a un estado rígido. A pesar de existir varias técnicas y tipos de “jamming”, la más común es el llamado “granular jamming”. Esta técnica consiste en confinar en el interior de una fina membrana, de un material flexible, partículas granulares como arenas, polvos o gránulos, y en aplicar presión de vacío para aumentar la rigidez del conjunto [4]. Más información sobre esta técnica en el capítulo 2.

Actualmente, en muchos robots blandos la rigidez se controla con inyección de aire a alta presión dentro de cámaras neumáticas. Aunque esta técnica es efectiva, presenta riesgos y limitaciones relevantes: riesgos en la seguridad asociados a las altas presiones en las cámaras, los tiempos de respuesta son lentos y la diferencia entre estados rígido y blando es escasa. En contraste, la técnica de “granular jamming” ofrece una solución más segura y con mayor capacidad de ajuste en la rigidez y proporciona respuestas más rápidas.

Motivado por el gran potencial de esta tecnología, el presente Trabajo de Fin de Grado, se centra en la investigación y desarrollo de eslabones robóticos de rigidez variable que emplean el principio de “granular jamming”. Se han explorado distintas proporciones entre las partes rígidas y blandas en los eslabones para comprender su influencia en la capacidad del eslabón sólido-blando para resistir fuerzas externas.

Para poder controlar el fenómeno, se ha implementado un circuito electroneumático y se ha desarrollado el software necesario para el correcto funcionamiento del circuito y la adquisición de datos para evaluar los rendimientos de los eslabones.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es diseñar, fabricar y evaluar de manera experimental, eslabones robóticos de rigidez variable basados en “granular jamming”. Se busca comprobar cómo diferentes proporciones de materiales sólidos y blandos afectan al eslabón al someterlo a cargas externas. Para lograr esto se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar y construir los eslabones de rigidez variable funcionales y herméticos para aplicar el vacío de forma efectiva.
- Crear e integrar un circuito con componentes electrónicos y neumáticos, para aplicar la técnica de “jamming” y recoger datos relevantes durante la realización de los experimentos.
- Desarrollar el software necesario para el control del circuito y para la recopilación de datos experimentales.

- Realizar pruebas experimentales que permitan evaluar el rendimiento de los eslabones y representar y discutir los resultados obtenidos.

1.3. Metodología

La metodología seguida en este trabajo se divide en cuatro grandes partes, que se corresponden con los capítulos centrales del documento:

- **Diseño y fabricación de los eslabones robóticos de rigidez variable:** Esta primera fase, se centra en el diseño y fabricación de 5 eslabones distintos, 4 de ellos con diversas proporciones entre partes sólidas y blandas, y uno de ellos completamente sólido para usar de referencia. Se emplean herramientas de diseño CAD (Onshape) para la impresión de las partes sólidas de los eslabones, para los moldes y para el eslabón sólido completo. La fabricación de estas partes se lleva a cabo mediante impresión 3D en PLA. Las partes blandas se realizan con silicona líquida EcoFlex 00-10 para crear la “manga” flexible de silicona que contiene el material granular (café molido). El proceso de fabricación se divide en tres etapas principales detalladas en la sección 4.2 del capítulo 4.
- **Diseño e implementación del circuito electroneumático:** En esta fase, se diseña e implementa un circuito híbrido, que combina componentes neumáticos y electrónicos para controlar la aplicación de vacío. Se diseña una placa de prototipado (PCB) para simplificar el conjunto y asegurar su correcto funcionamiento. Esta parte se detalla en la sección 4.3 del capítulo 4.
- **Desarrollo del Software y adquisición de datos:** Se implementa el código para el control del circuito electroneumático, la lectura de sensores, control del motor de la marca Dynamixel, y la recopilación de datos necesarios. El sistema se integra en una arquitectura basada en ROS, con el objetivo de comunicar los distintos módulos y automatizar las pruebas.
- **Realización de pruebas experimentales y análisis de los resultados:** Se realizan 4 experimentos para evaluar el comportamiento de los eslabones fabricados. Se analizan varios aspectos como la deflexión bajo efectos de la gravedad, tiempos de respuesta al vacío, la fuerza máxima que soporta cada eslabón en condiciones de vacío distintas y se comparan los resultados con un eslabón completamente sólido.

1.4. Estructura del Documento

El resto del documento se estructura de la siguiente forma:

En el capítulo 2, se profundiza en los conceptos clave de “soft robotics” y, sobre todo, de “jamming” y “granular jamming”, incluyendo los principios físicos que los rigen.

En el capítulo 3, se realiza un estudio del estado del arte en los campos de la robótica blanda, las técnicas de “jamming” existentes, repasando las principales investigaciones y avances en estos ámbitos.

En el capítulo 4, se menciona con una breve explicación las herramientas principales de las que se hace uso a lo largo de este proyecto. Se detalla el proceso de fabricación de los eslabones, se lleva a cabo mediante técnicas de impresión 3D para la creación de los moldes y partes rígidas de los eslabones, y con el uso de silicona blanda para las partes que contienen el material granular. Se han diseñado y fabricado 5 eslabones en total, cada uno con proporciones distintas, así como un eslabón completamente rígido para tomar como referencia para las pruebas realizadas. Asimismo, se implementa un circuito electroneumático y se crea el software necesario para el control del circuito y adquisición de datos.

En el capítulo 5, se presentan los experimentos realizados para evaluar los eslabones de rigidez variable fabricados. Se analiza el tiempo necesario para alcanzar el vacío de cada eslabón y el tiempo en volver a 0 bares, la deformación producida por la gravedad sobre papel milimetrado, la resistencia de los eslabones a distintos niveles de vacío y, finalmente, una comparación directa con un eslabón completamente sólido. Con los resultados obtenidos se permite comparar el rendimiento de los distintos diseños.

Por último, en el capítulo 6, se resumen las conclusiones generales tras la fase experimental y se plantean posibles líneas futuras que pueden dar continuidad a este Trabajo de Fin de Grado.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

2.1. Concepto y definición de Jamming

El concepto de “jamming” es un proceso físico, propuesto como un nuevo tipo de transición de fase. Inicialmente, un conjunto de partículas desordenadas se comporta como un fluido a bajas densidades. Sin embargo, al aumentar la densidad del sistema y superar una densidad crítica, el sistema experimenta un cambio en el comportamiento, asemejándose a un sólido rígido. Este fenómeno ocurre porque las partículas se aglomeran tanto que dificultan que se puedan reorganizar, produciéndose un “congelamiento” de su movimiento. Actualmente, para realizar “jamming” se dispone de una gran variedad de materiales como vidrios, espumas, polímeros y materiales granulares. [5]

La clave de este fenómeno radica en el estudio detallado de la interacción y “empaquetamiento” de las partículas. El Punto J se define como el umbral crítico a partir del cual un sistema de partículas desordenadas pasa de un estado fluido a uno rígido [6]. En la figura 2.1, tomada de [7], se ilustra de manera simplificada la transición de un estado a otro, señalando el Punto J (ϕ_c). En el estado “unjammed”, las partículas se encuentran dispersas, con una interacción y fricción mínimas entre ellas. En este estado, el material tiene propiedades fluidas, con una presión y módulo de cizallamiento cercanos a 0, lo que denota una falta de rigidez. El paso del estado “unjammed” al estado “jammed” ocurre en torno al llamado punto crítico J (ϕ_c). Este concepto es introducido en el artículo [6]. El punto representa el nivel de “empaquetamiento” mínimo en el que el sistema adquiere rigidez y es capaz de soportar fuerzas y tensiones aplicadas sin que se produzca un colapso estructural. El contacto entre las partículas alcanza un nivel justo para formar una red continua que proporciona rigidez. Una vez se supera este punto crítico, el sistema evoluciona al estado de “jammed”, caracterizado por un “empaquetamiento” más denso de las partículas. En este estado el material presenta una alta resistencia a deformaciones,

con una presión interna y módulo de cizallamiento superiores a 0.

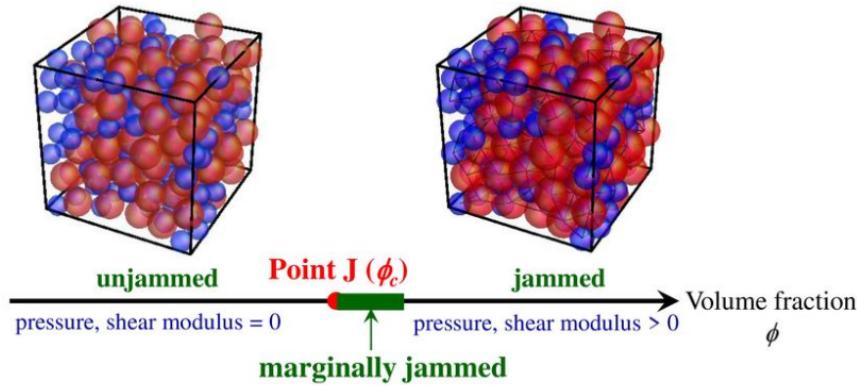


Figura 2.1: Transición del estado “unjammed” al estado “jammed” tras superar el Punto $J(\phi_c)$. (Fuente: ver texto).

Actualmente, se pueden diferenciar distintos tipos de jamming: granular, tubular y laminar. Aunque en este trabajo la técnica utilizada es el jamming granular. En la figura 2.2 (tomada de [8]), se ilustra una representación gráfica de cada tipo.

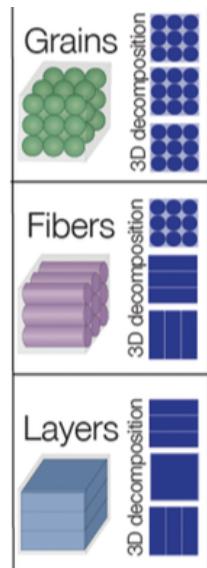


Figura 2.2: Tipos de jamming. (Fuente: ver texto).

2.1.1. Jamming granular

El “Jamming granular” constituye una modalidad de “jamming” muy usado en la actualidad en diversas aplicaciones tecnológicas. Las partículas empleadas suelen ser arenas, polvos o gránulos; en el presente proyecto, por ejemplo, se ha optado por la utilización de café molido. Se ha elegido este material debido a su fácil disponibilidad,

permitiendo que los experimentos sean sencillos de reproducir, y a que sus partículas pequeñas generan una mayor fricción al aplicarse el “jamming”. Una metodología común para inducir la transición del estado “unjammed” hacia el estado “jammed” en materiales granulares es aplicando presión de vacío.

En la figura 2.3, tomada de [4], se observa cómo en una bolsa flexible rellena de partículas macroscópicas, inicialmente conteniendo aire, estas pueden moverse con libertad y se encuentran distribuidas de manera dispersa, simulando un comportamiento fluido. Al evacuar el aire del interior del contenedor flexible, las partículas son comprimidas debido a la acción de la presión atmosférica externa, lo que intensifica las fuerzas de contacto entre ellas. De esta manera, se logra superar el umbral previamente definido como Punto J (ϕ_c) y se efectúa la transición hacia un estado de “jammed”. La bolsa experimenta una transformación hacia un estado rígido y no deformable ante la aplicación de fuerzas externas. Una vez que se restituye el aire al interior de la bolsa, esta retorna a su estado blando original. [4]

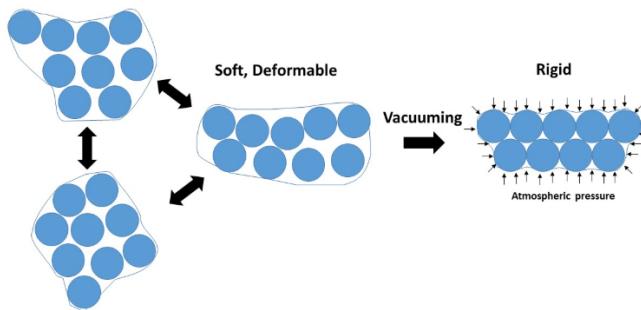


Figura 2.3: “Jamming” de partículas. (Fuente: ver texto).

Una de las características más significativas de este tipo de “jamming” reside en su capacidad de volver al estado inicial, como se ha expuesto anteriormente; al disminuir la presión aplicada mediante el vacío, las partículas se separan nuevamente y fluyen con libertad. Asimismo, mediante un control preciso del nivel de vacío, se regula el nivel de “empaquetamiento” de las partículas y, por consiguiente, de la rigidez del sistema. Ofreciendo así una solución que se distingue por su simplicidad, robustez y bajo costo. Sin embargo, este control de vacío no es trivial: consta de una dinámica complicada de modelar, con un alto componente no lineal. Por este motivo, su modelado preciso que fuera del alcance de los objetivos establecidos en este Trabajo de Fin de Grado.

Esta capacidad de variación rápida y de gran relación rígido-blando, ha llevado a numerosos avances y aplicaciones dentro del campo de la robótica blanda, dando lugar al desarrollo de pinzas adaptables para el agarre de objetos con geometrías irregulares, como el Jamming Gripper desarrollado por Creative Machines Lab [9], así como diseños de eslabones robóticos destinados a la adaptación en diversos entornos y a la absorción de impactos, como el BionicSoftArm desarrollado por Festo

[10].

2.1.2. Jamming tubular

El jamming tubular se basa en el impedimento del movimiento de estructuras en forma de tubo aplicando vacío o presión. Mediante esta técnica se modifica la rigidez de estructuras de forma alargada y flexible.

2.1.3. Jamming laminar

El jamming laminar se basa en el uso de capas delgadas de materiales flexibles que deslizan entre sí, pero se bloquean al aplicar presión o vacío. Destaca su aplicación en la medicina.

Se pueden observar ejemplos de aplicaciones de los distintos tipos de “jamming” en la sección dedicada al Estado del Arte en el Capítulo 3 de este documento.

Capítulo 3

Estado del Arte

En este capítulo se presentan los avances y tecnologías más destacadas actualmente en los ámbitos de Soft Robotics y Jamming.

3.1. Soft Robotics

La robótica blanda surge como una estrategia para imitar la flexibilidad y adaptabilidad de los seres vivos mediante materiales flexibles. Esto permite una interacción más segura en el entorno y con los seres humanos. Al ser un campo relativamente reciente, no hay una definición clara sobre qué es exactamente un robot blando. Actualmente, se dispone de diferentes definiciones teniendo en consideración distintos aspectos.

Un robot blando puede definirse como uno con infinitos grados de libertad [11], como se observa en la figura 3.1, tomada de [12] en la que se muestra la diferencia entre los grados de libertad de un robot rígido y uno blando.

Otra manera de definir un robot blando es a través del módulo de Young [13], que mide la rigidez de un material determinando, estableciendo la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación que resulta debido a este. Según el artículo [2], un Soft Robot es “un sistema autónomo compuesto principalmente por materiales cuyo módulo se encuentra en el rango de los materiales biológicos blandos”. Los materiales rígidos tradicionalmente utilizados en robótica constan de un módulo de Young del orden de 10^9 – 10^{12} Pa, mientras que los organismos vivos están constituidos por materiales con un módulo menor, del orden de 10^4 – 10^9 Pa.

El módulo de Young (E) se define como:

$$E = \frac{FL_0}{A_0\delta} \quad (3.1)$$

donde F es la fuerza aplicada, L_0 es la longitud inicial del objeto, A_0 es el área de la sección transversal y δ es la elongación del material debido a la fuerza aplicada.

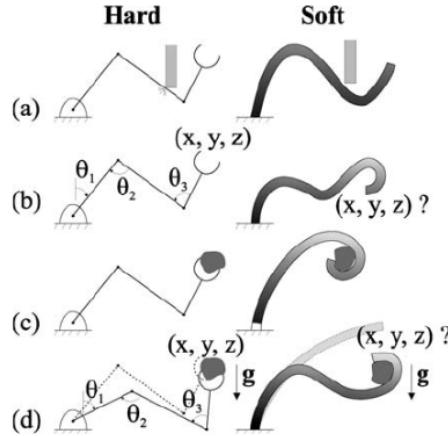


Figura 3.1: Grados de libertad robot rígido vs robot blando. (Fuente: ver texto).

En la figura 3.2, tomada de [14], se ilustra cómo se aplica esta fórmula a un cilindro sometido a tracción:

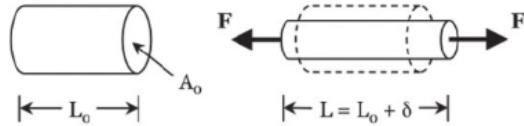


Figura 3.2: Módulo de Young definido como la relación entre la fuerza aplicada F y la elongación δ de una barra prismática con longitud L_0 y sección transversal A_0 . (Fuente: ver texto).

En otro artículo [15], se propone que un robot blando no se puede definir únicamente dependiendo de la deformación de los materiales que lo componen, sino también por su adaptabilidad en el entorno y su comportamiento seguro en presencia de personas. Se destaca que un robot blando incluye componentes rígidos en su diseño, resultando más viable que un robot totalmente constituido con materiales de módulo de Young bajo.

Finalmente, en la tesis [12] se expone una clasificación que tiene en consideración distintas características y parámetros para clasificar los tipos de robots en función de su dureza, se puede ver en la figura 3.3 (tomada de [12]):

Quedan definidos como:

- **Soft:** constituido completamente por materiales con módulo de Young del orden de $10^4 - 10^8$ Pa, con infinitos grados de libertad.

	Hard Robots	Adaptable Robots	Mixed Soft Robots	Soft Robots
Characteristics				
DOF, n	$n \leq 6$	$n \geq 12$	$n = \infty$	$n = \infty$
Materials [Pa]	$E = 10^{10} - 10^{11}$	$E = 10^8 - 10^{11}$	$E = 10^4 - 10^{10}$	$E = 10^4 - 10^8$
Flexibility	No	Limited	Infinite	Infinite
Stretchability	No	No	Limited	Near Infinite
Capabilities				
Precision	● ● ● ● ●	● ● ● ● ○	● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○
Speed	● ● ● ● ●	● ● ● ○ ○	● ○ ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○
Loading Capacity	● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○
Adaptability	● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○
Safe interaction	● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○
Realization				
Manufacturing	Traditional Machining	Traditional machining and 3D prototyping	Prototyping 3D and 4D	Prototyping 3D and 4D
Design	Easy	From simple to complex	Complex	Complex
Modeling	Easy	From simple to complex	Complex	Complex
Control	Easy	From simple to complex	Complex	Complex
Cost	High	Medium - High	Medium - Low	Low
Applications				
	Industrials	Manipulation	Medical - Manipulation	Medical

Figura 3.3: Comparación distintos tipos de robots. (Fuente: ver texto).

- **Mixed soft:** se componen de estructura rígida y cuerpo blando, módulo de Young del orden de $10^4 - 10^{10}$ Pa, también con infinitos grados de libertad.
- **Adaptable:** son muy versátiles. Se trata de ajustar los componentes software y hardware para conseguir una adaptación a entornos cambiantes. Sus grados de libertad contribuyen a una mayor adaptabilidad.

En conclusión, se puede definir a un robot blando de forma genérica como aquel que incluye partes no rígidas.

Actualmente, se puede hacer la siguiente clasificación en cuanto a robots blandos:

- **Robots bio-inspirados:** es uno de los campos más estudiados en la robótica blanda. Se trata de imitar la estructura y comportamiento de seres vivos, animales, plantas o incluso bacterias, que encontramos en la naturaleza. En la figura 3.4 (tomadas de [16] y de [17]) se puede ver un robot inspirado en una oruga y en una estrella de mar.



Figura 3.4: Ejemplos de robots blandos bio-inspirados. (a) Robot inspirado en una oruga. (b) Robot inspirado en una estrella de mar. (Fuente: ver texto).

- **Robots manipuladores:** son brazos flexibles, proporcionando una interacción segura con las personas y el entorno. Tienen la capacidad de adaptarse a la forma y tamaño de los objetos. Un ejemplo es el BionicSoftArm de Festo en la figura 3.5 (tomada de [10]), un brazo modular compuesto por elementos flexibles impresos en 3D, accionados neumáticamente. Gracias a su diseño adaptable facilita el trabajo en entornos colaborativos, sin necesidad de una jaula como en los tradicionales robots manipuladores rígidos.



Figura 3.5: BionicSoftArm de Festo. (Fuente: ver texto).

- **Soft Grippers:** se trata de efectores finales diseñados con materiales blandos y flexibles para la manipulación de objetos de distintas formas y tamaños sin que estos se dañen. El agarre se produce mediante mecanismos de neumática o vacío. Son muy utilizados en la industria de la alimentación. Ejemplos de estos son el gripper de Soft Robotics Inc., que emplea actuadores neumáticos flexibles, y el jamming gripper de Creative Machines Lab, que usa el jamming ajustándose a la forma del objeto a sujetar. Se ven en la figura 3.6 (tomada de [18] y de [9]).

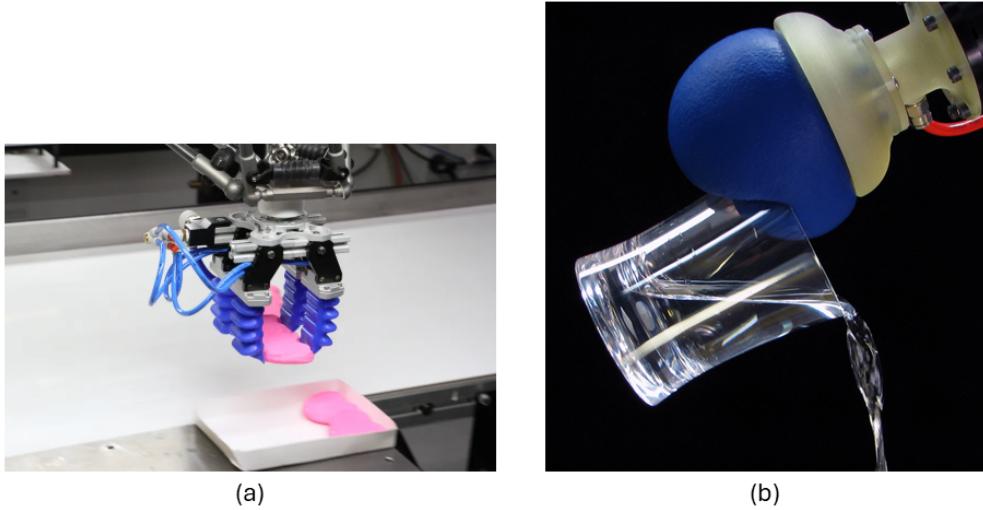


Figura 3.6: Ejemplos de Soft Grippers. (a) Gripper de Soft Robotics Inc. (b) Jamming gripper de Creative Machines Lab. (Fuente: ver texto).

■ **Robótica médica:** el uso de robótica blanda en el ámbito de la medicina aporta grandes beneficios, permitiendo desarrollar dispositivos flexibles y adaptables para rehabilitación y apoyo en cirugías. Ejemplos de ello son, en la figura 3.7 (tomada de [19] y de [20]), el guante robótico que ayuda a recuperar la movilidad a personas con movilidad reducida, y un dispositivo flexible diseñado para recubrir el corazón y asistir a pacientes con insuficiencia cardíaca.

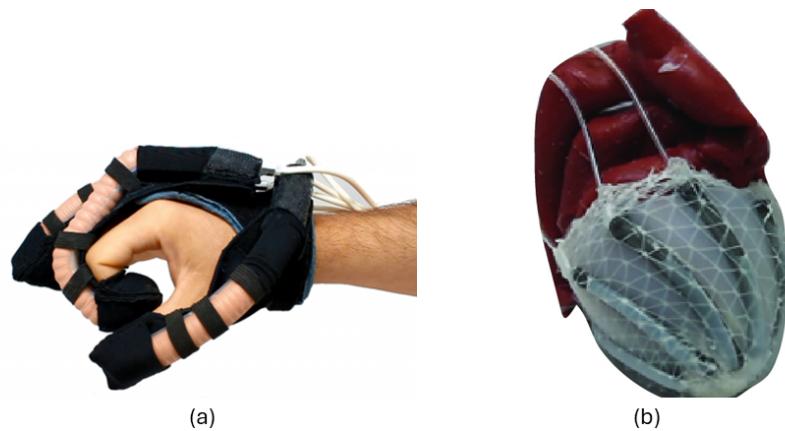


Figura 3.7: Ejemplos de robótica blanda en la medicina. (a) Guante robótico blando para rehabilitación. (b) Actuador blando para corazón. (Fuente: ver texto).

3.2. Jamming

En esta sección se presentan aplicaciones recientes de las distintas técnicas de jamming descritas previamente en el Capítulo 2.

3.2.1. Jamming granular

En el artículo [21] se muestra un gripper robótico usando jamming granular, compuesto por una membrana flexible cuyo agarre se adapta a objetos de diversas formas y tamaños, figura 3.8 (tomada de [21]).

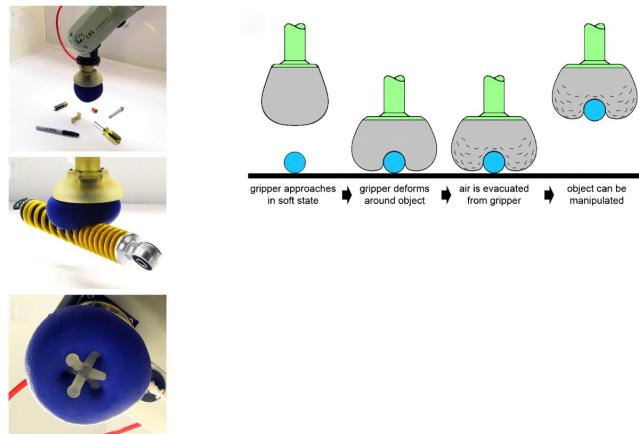


Figura 3.8: Gripper robótico usando jamming. (Fuente: ver texto).

En otro artículo [22] se expone el diseño de una prótesis para rehabilitación y asistencia en casos de discapacidades motrices, figura 3.9 (tomada de [22]).



Figura 3.9: Prótesis usando jamming. (Fuente: ver texto).

3.2.2. Jamming tubular

En el artículo [23], sobre jamming tubular se muestra el diseño de un manipulador con forma de serpiente, con capacidad de modificar su rigidez gracias a capas tubulares, figura 3.10 (tomada de [23]).

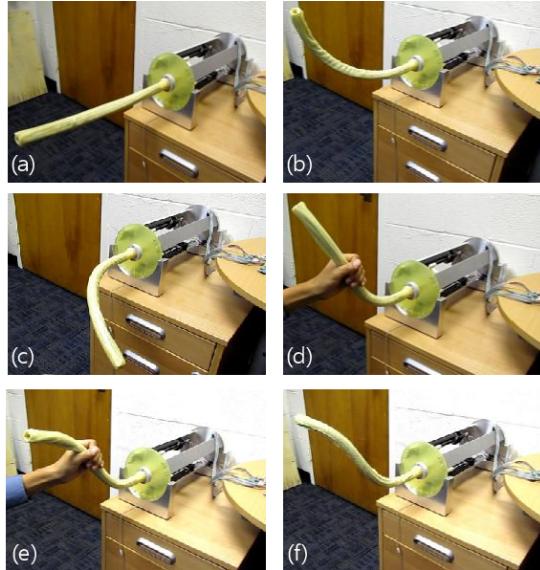


Figura 3.10: Serpiente elaborada con jamming tubular. (a)–(c) Movimiento libre sin vacío. (d) y (e) Movimiento bajo una restricción externa sin vacío. (f) Estado rígido bajo vacío. (Fuente: ver texto).

3.2.3. Jamming laminar

Un ejemplo reciente de jamming laminar se puede ver en el artículo [24], en el cual se desarrolla un exoesqueleto ligero basado en jamming laminar, simulando musculatura humana, buena solución para aplicaciones de rehabilitación, figura 3.11 (tomada de [24]).

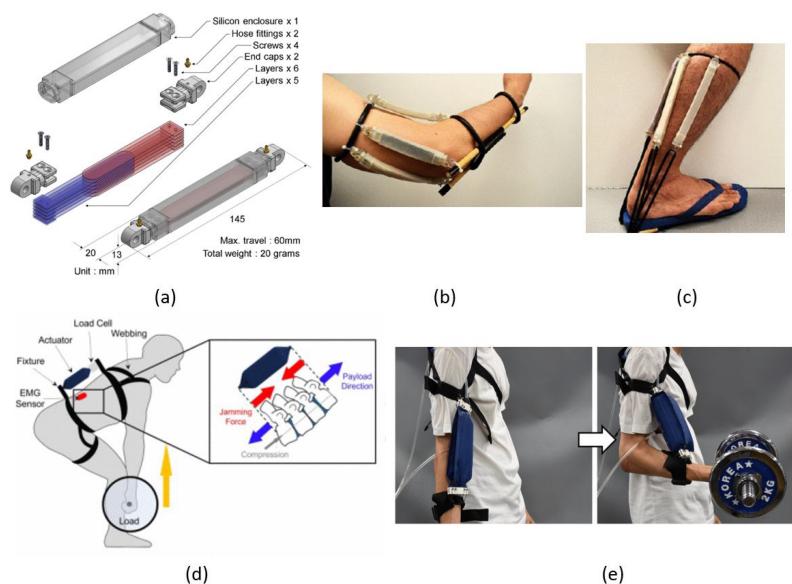


Figura 3.11: Exoesqueleto elaborado con jamming laminar. (a) Componentes del jamming laminar. (b) Aplicación del jamming laminar como mecanismo de bloqueo articular. (c) Para proporcionar soporte lumbar. (d) Para sostener cargas con los brazos. (Fuente: ver texto).

Capítulo 4

Metodología

En este capítulo se describen los pasos seguidos para cumplir los objetivos planteados de este Trabajo de Fin de Grado. La metodología se estructura en 3 partes, cada una correspondiente a una etapa del proyecto: el diseño y fabricación del eslabón robótico de rigidez variable, el diseño e implementación del circuito electroneumático para el control del fenómeno granular “jamming”, y el desarrollo del software necesario para la operación del sistema y la adquisición de datos para su evaluación.

Esta división en tres partes facilita la exposición del trabajo realizado, planteando los procedimientos llevados a cabo en cada fase del proyecto.

4.1. Herramientas utilizadas

Se exponen las herramientas utilizadas para cumplir con los objetivos de este trabajo.

4.1.1. Herramientas de diseño y fabricación

- **Onshape:** sistema de diseño asistido por computador (CAD) ofrecido a través de Internet. Su principal ventaja se trata de la posibilidad de colaboración de en un único diseño compartido. [25]
- **Impresora 3D Prusa MK3 y Prusa Slicer:** para poder imprimir, en material PLA (ácido poliláctico), los diseños realizados en Onshape.

4.1.2. Hardware y electrónica

- **ESP32-WROOM-32:** microcontrolador desarrollado por Espressif Systems. Cuenta con conectividad Wi-Fi, Bluetooth y múltiples interfaces de comunicación. Consta de gran versatilidad en aplicaciones de IoT (Internet of Things), robótica y automatización.[26]
- **PC con sistema operativo Ubuntu 20.04:** se empleó como plataforma de desarrollo y comunicación entre los distintos componentes del sistema.

4.1.3. Software

- **Visual Studio Code:** editor de código abierto desarrollado por Microsoft y es compatible con múltiples lenguajes de programación.[27]
- **Arduino IDE:** entorno de desarrollo multiplataforma que utiliza lenguaje de programación C/C++, usado para cargar el firmware a distintas placas. En este caso se ha utilizado para cargar los códigos a las ESP32.[28]
- **ROS (Robot Operating System) Noetic:** framework de software para desarrollo de aplicaciones robóticas. Su arquitectura, basada en nodos, facilita una comunicación eficiente entre procesos.[29]. Se ha optado por el uso de ROS 1 (Noetic) en lugar de ROS 2, debido a que la librería para el control del servomotor Dynamixel, de momento, es compatible únicamente con esa versión.

4.2. Diseño y fabricación de los eslabones robóticos de rigidez variable

Con el objetivo de analizar cómo influyen las distintas proporciones entre partes sólidas y blandas de un eslabón sometido a la técnica de “jamming”, se han diseñado 5 prototipos, 4 de ellos sólido-blandos y uno completamente sólido. Con esto se pretende comparar el comportamiento de los diseños al aplicar el vacío, evaluando su capacidad de resistencia a fuerzas externas y su respuesta ante distintos niveles de rigidez.

Todos los eslabones constan de una altura total de 130 mm y un diámetro de 55 mm. Se ha tratado de tomar unas proporciones comunes en eslabones de brazos rígidos comerciales. La estructura de cada uno de los eslabones comparte algunos elementos comunes, como la presencia de dos secciones de material rígido (representadas en color azul en la figura 4.1). Estas partes rígidas están ubicadas en los

extremos superior e inferior de la estructura. La parte rígida superior presenta una altura constante de 20 mm para todos los eslabones, independientemente del porcentaje de parte blanda. La parte rígida inferior variará su altura en función del porcentaje de parte blanda deseada para el eslabón. Ambas secciones rígidas han sido diseñadas y colocadas en los extremos con la finalidad de facilitar una integración modular con otros eslabones. Esta característica del diseño es fundamental para la posibilidad de una posible futura construcción de un brazo robótico completo, donde una interconexión estable entre los eslabones es necesaria. La región intermedia que se extiende entre estas dos secciones sólidas es la parte deformable del eslabón (representada en color blanco en la figura 4.1). Ésta es la zona diseñada para contener el material granular y es la parte que modula su rigidez en función a la aplicación de vacío.

Para estudiar las diferencias con las distintas proporciones rígido-blando, se decrementa el porcentaje de la parte blanda desde la base del eslabón. Para ello, se han diseñado 4 eslabones, cada uno con distinta altura de parte blanda, tal y como se ilustra en la figura 4.1:

- **Eslabón 100 % blando:** este eslabón se compone de una parte rígida superior e inferior de 20 mm de altura cada una. La sección intermedia deformable, que corresponde a la parte blanda y contiene el material granular es de 90 mm.
- **Eslabón 75 % blando:** este eslabón sigue manteniendo la parte rígida superior con altura de 20 mm, mientras que la parte rígida inferior ha aumentado su altura a 42.5 mm. La sección intermedia deformable es de 67.5 mm.
- **Eslabón 50 % blando:** este eslabón se distribuye de forma equitativa en cuanto a partes sólidas y deformables. Como en todos los eslabones, se compone de una parte rígida de 20 mm de altura en la parte superior, mientras que la parte inferior rígida mide 65 mm. La sección intermedia deformable es de 45 mm.
- **Eslabón 25 % blando:** se mantiene la parte superior de 20 mm, y la parte rígida inferior mide 87.5 mm. La sección intermedia deformable es de 22.5 mm.

Asimismo, con el objetivo de establecer un punto de referencia rígido y poder evaluar de manera pertinente los eslabones de rigidez variable, se fabrica un eslabón completamente sólido. Este eslabón está compuesto íntegramente del material que constituye las partes rígidas de los otros eslabones. Los resultados experimentales obtenidos al someter este eslabón a las mismas pruebas que los eslabones sólido-blandos, permitirán cuantificar el nivel de eficacia con el que los eslabones de rigidez variable modifican sus propiedades al realizar el fenómeno de “jamming”.

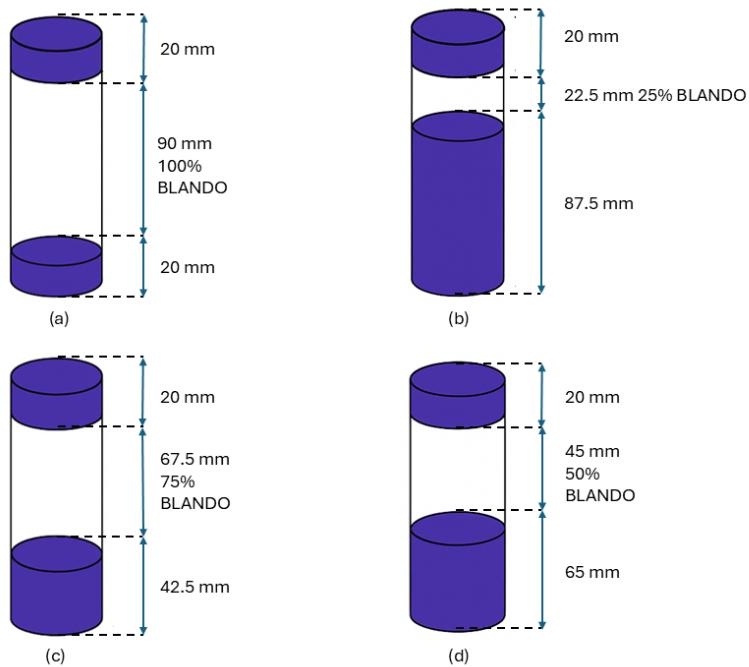


Figura 4.1: Eslabones de rigidez variable con distintos porcentajes de parte blanda. (a) Eslabón 100 % blando. (b) Eslabón 25 % blando. (c) Eslabón 75 % blando. (d) Eslabón 50 % blando.

4.2.1. Diseño 3D de los moldes y piezas rígidas para los eslabones

En esta fase del proyecto, se llevó a cabo el diseño los moldes necesarios para fabricar los eslabones, así como el de las propias partes que conforman sus extremos. Para esto se empleó la herramienta de diseño CAD Onshape. Este software permitió un diseño preciso para su posterior fabricación mediante técnicas de impresión 3D.

A continuación, se describen los diseños realizados.

En la figura 4.2 se muestran los diseños de la parte superior de los eslabones (4.2(b), modelo en Onshape¹) y del casquillo correspondiente (4.2(a), modelo en Onshape²). Las piezas superior e inferior de los eslabones comparten algunos elementos comunes en su diseño: los 4 orificios para poder ser atornillados a otros elementos y las ranuras. Las ranuras están diseñadas para, en la primera parte del proceso de fabricación, facilitar que la silicona líquida penetre y se adhiera bien a la superficie sólida.

El casquillo se diseñó para contener la silicona durante el vertido y el curado. Presenta una ligera inclinación en la parte superior, pensada para evitar derrames.

¹<https://bit.ly/441f6eJ>

²<https://bit.ly/407frv9>

Se requieren dos casquillos, los cuales también constan de orificios para su sujeción. La figura 4.2(d) muestra el ensamblaje de los dos casquillos con la pieza superior del eslabón. El casquillo tiene una altura de 25.76 mm y la parte superior de 20 mm.

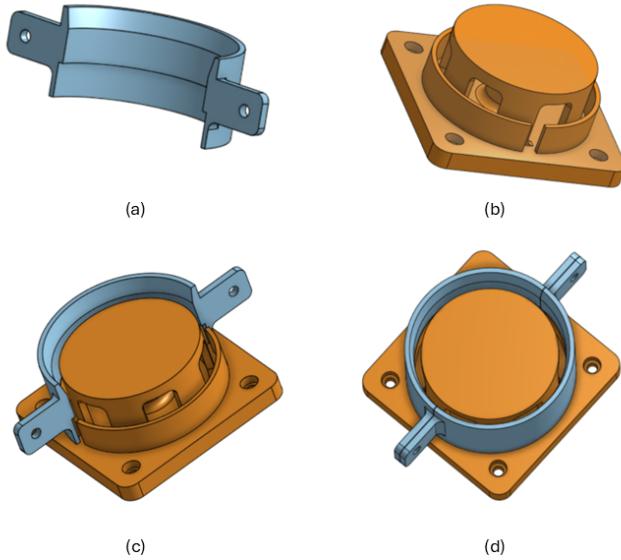


Figura 4.2: Conjunto de piezas para la parte superior de los eslabones rígidos-blandos. (a) Casquillo 20 mm. (b) Parte superior eslabones. (c) Parte superior con un casquillo. (d) Parte superior con los dos casquillos.

En la figura 4.3 se presentan los modelos de la parte inferior de un eslabón, incluyendo el casquillo (4.3(a), modelo en Onshape ³) y la parte inferior (4.3(b), modelo en Onshape ⁴). Al igual que ocurre con las piezas superiores, las inferiores siguen las mismas directrices de diseño, como los orificios para el atornillado y las ranuras para la mejor adhesión de la silicona. Se utilizan dos casquillos por sección inferior (4.3(d)). A diferencia de las piezas superiores, las inferiores presentan un orificio cilíndrico central. Este orificio está diseñado para introducir el tubo procedente del circuito electroneumático, para realizar el vacío y controlar la rigidez del eslabón.

Las dimensiones de las piezas inferiores varían en función de la proporción entre material sólido y blando de cada eslabón. Esta variación es clave para poder realizar posteriormente pruebas comparativas y estudiar las diferencias. Las figuras siguientes detallan estas variaciones dimensionales, cada una corresponde a un tipo de eslabón, proporcionando sus dimensiones acompañadas de las imágenes de los diseños correspondientes.

La figura 4.4 muestra los componentes utilizados para la segunda etapa de fa-

³<https://bit.ly/3SOY7an>

⁴<https://bit.ly/4kJMqy0>

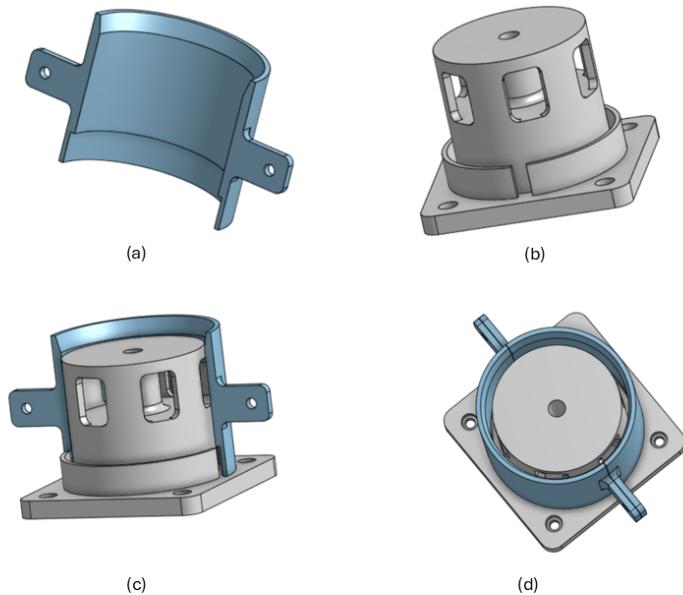


Figura 4.3: Conjunto de piezas para la parte inferior de los eslabones rígidos-blandos. (a) Casquillo parte inferior. (b) Parte inferior eslabones. (c) Parte inferior con un casquillo. (d) Parte inferior con los dos casquillos.

bricación del eslabón. Tras haber recubierto con silicona las partes inferiores y superiores. Esta segunda etapa se centra en la creación de la cavidad interna, donde se introduce el material granular, corresponde con la parte blanda del eslabón, y la incorporación de la parte inferior.

En las figuras 4.4(a) y 4.4(b) (modelo en Onshape⁵) se ilustran las vistas interior y exterior de los moldes utilizados para la segunda etapa. Estos moldes son utilizados para dar forma y contener la silicona para formar la cavidad y a la vez incorporar la parte rígida inferior del eslabón. Estos moldes también son de dimensión fija para todos los eslabones, tienen una altura de 110 mm y un diámetro interior de 56 mm. En la vista interior (4.4(a)) se observan unos rebajes, diseñados para acoplarse con la base del inserto con el objetivo de prevenir fugas de silicona durante el vertido. Constan también de unas aletas laterales que facilitan su unión y cierre durante el ensamblaje.

La figura 4.4(c) (modelo en Onshape⁶) presenta el inserto utilizado para definir el volumen de la cavidad que contiene el material granular. La altura de éste varía en función del porcentaje rígido-blando, se muestra también en las figuras con sus respectivas dimensiones. En su base consta de una sección más fina y de menor altura, diseñada para encajar con los rebajes de los moldes. Además, el inserto

⁵<https://bit.ly/4mTKV1A>

⁶<https://bit.ly/4n1j9Ak>

presenta en su parte superior central un saliente cilíndrico, cuya función es proteger de una posible obstrucción de silicona el orificio de la parte inferior del eslabón.

Finalmente, en la figura 4.4(d) muestra el ensamblaje de los moldes, el inserto y la parte inferior del eslabón.

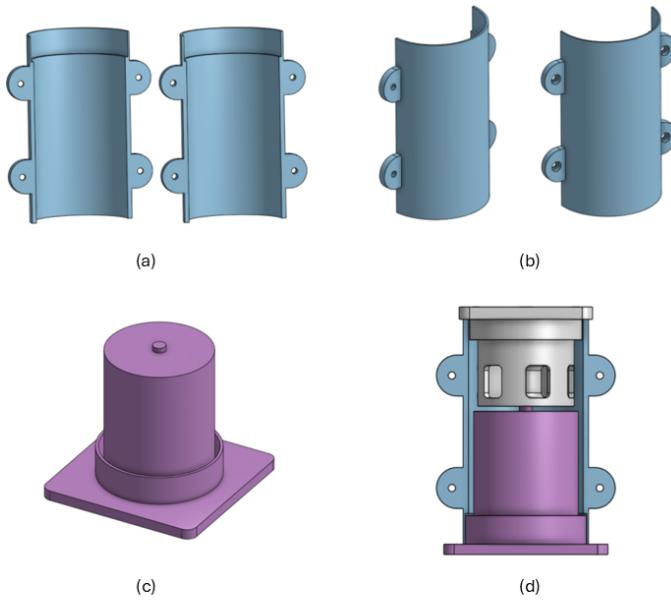


Figura 4.4: Moldes y componentes para la segunda etapa de fabricación del eslabón. (a) Vista interior de los moldes para acople de las partes inferiores del eslabón. (b) Vista exterior de los moldes para acople de las partes inferiores del eslabón. (c) Insertos para la formación de la cavidad de relleno. (d) Acople de los moldes con la parte inferior y el inserto.

La figura 4.5 muestra los elementos necesarios para la última etapa de fabricación del eslabón. En esta etapa se lleva a cabo el ensamblaje de la sección inferior rellena con el material granular y la sección superior, utilizando un molde diseñado para ello.

Las figuras 4.5(a) y 4.5(b) (modelo en Onshape⁷) muestran las vistas interior y exterior de los moldes, respectivamente. Estos moldes cilíndricos son utilizados para la fabricación de todos los eslabones sólido-blandos, independientemente de su proporción, constan de una altura de 130 mm y un diámetro interior de 56 mm. Además, incluyen unas aletas laterales para atornillar ambas mitades, asegurando un correcto cierre durante el proceso de fabricación.

Finalmente, la figura 4.5(c) muestra el ensamblaje final. El molde actúa como una guía y soporte para alinear correctamente las secciones inferior y superior del eslabón, concluyendo así con el proceso de fabricación.

⁷<https://bit.ly/3SODg77>

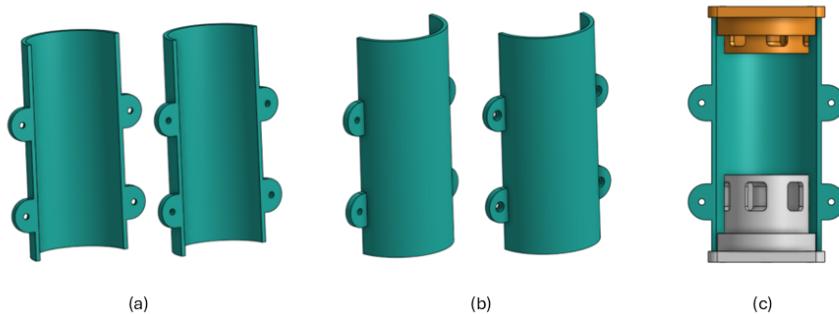


Figura 4.5: Moldes y componentes para la última etapa de fabricación del eslabón. (a) Vista interior de los moldes para la última etapa de fabricación. (b) Vista exterior de los moldes para la última etapa de fabricación. (c) Acople de los moldes con la parte inferior y la parte superior del eslabón.

A continuación, se presentan las piezas, únicamente las que varían sus dimensiones según el tipo de eslabón, de los componentes que conforman los eslabones rígidos-blandos junto con su altura, complementando las representaciones visuales mostradas en las figuras anteriores.

4.2.1.1. Eslabón 100 % blando

La figura 4.6 representa, para el eslabón 100 % blando, las alturas de la parte inferior del eslabón y su correspondiente casquillo, y del inserto que crea la parte “manga” blanda.

Se ilustran (4.7) los ensamblajes de la segunda y tercera etapa de fabricación para visualizar las proporciones sólido-blandas del eslabón y las alturas de cada pieza que lo componen. Los moldes, como se ha indicado anteriormente, no varían nunca sus dimensiones y son los mismos para todos los eslabones.

⁸<https://bit.ly/3HI8nyT>

⁹<https://bit.ly/4ls84XF>

¹⁰<https://bit.ly/4n46lct>

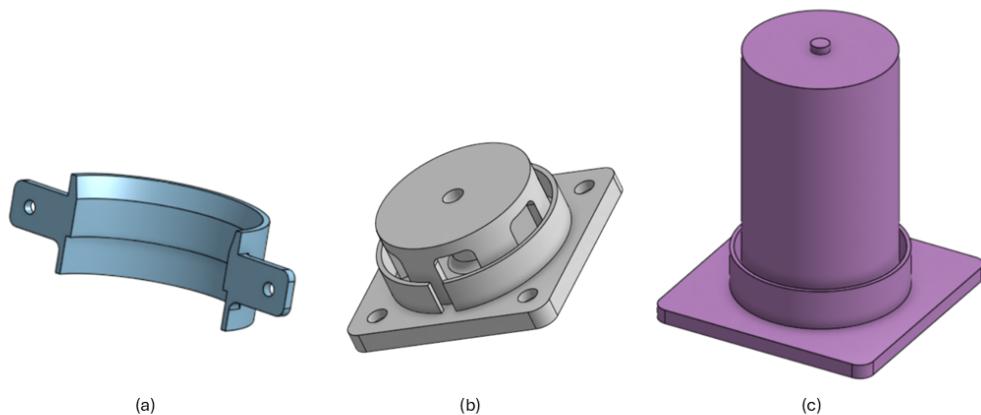


Figura 4.6: Piezas eslabón 100 % blando. (a) Casquillo parte inferior. Altura: 25.76 mm. Modelo en Onshape⁸. (b) Parte inferior. Altura: 20 mm. Modelo en Onshape⁹. (c) Inserto. Altura: 87.5 mm. Modelo en Onshape¹⁰.

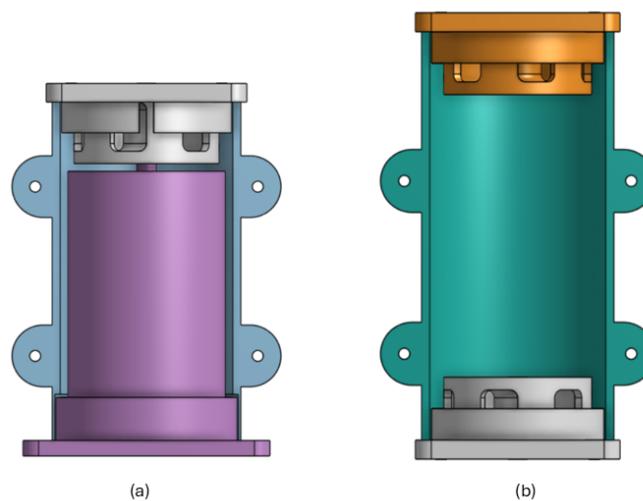


Figura 4.7: Conjunto de ensamblajes para el eslabón 100 % blando (a) Ensamblaje de la segunda etapa de fabricación del eslabón 100 % blando. (b) Ensamblaje de la tercera etapa de fabricación del eslabón 100 % blando.

4.2.1.2. Eslabón 75 % blando

La figura 4.8 representa para el eslabón 75 % blando, las alturas de la parte inferior del eslabón y su correspondiente casquillo, y del inserto que crea la parte “manga” blanda.

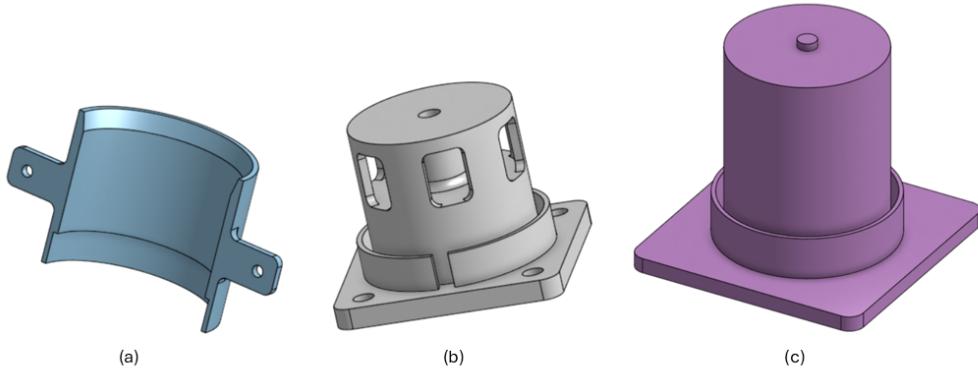


Figura 4.8: Piezas eslabón 75 % blando. (a) Casquillo parte inferior. Altura: 48.26 mm. Modelo en Onshape¹¹. (b) Parte inferior. Altura: 42.5 mm. Modelo en Onshape¹². (c) Inserto. Altura: 65 mm. Modelo en Onshape¹³.

Se ilustran (4.9) los ensamblajes de la segunda y tercera etapa de fabricación para visualizar las proporciones sólido-blandas del eslabón y las alturas de cada pieza que lo componen. Los moldes, como se ha indicado anteriormente, no varían nunca sus dimensiones y son los mismos para todos los eslabones.

¹¹<https://bit.ly/4laGA8B>

¹²<https://bit.ly/4l0WCBS>

¹³<https://bit.ly/45lw1uR>

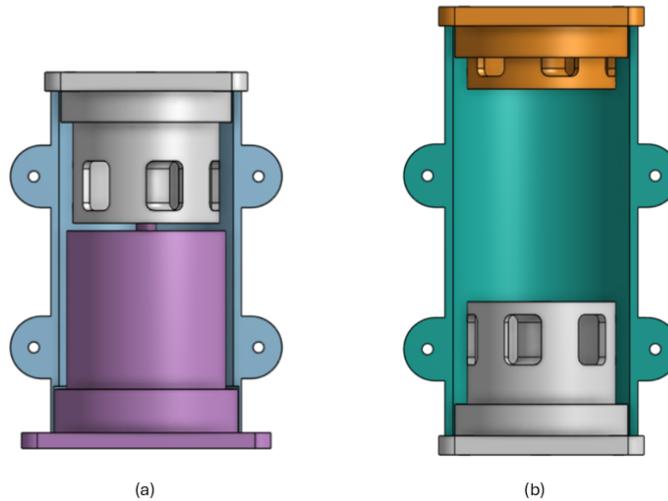


Figura 4.9: Conjunto de ensamblajes para el eslabón 75 % blando. (a) Ensamblaje de la segunda etapa de fabricación del eslabón 75 % blando. (b) Ensamblaje de la tercera etapa de fabricación del eslabón 75 % blando.

4.2.1.3. Eslabón 50 % blando

La figura 4.10 representa para el eslabón 50 % blando, las alturas de la parte inferior del eslabón y su correspondiente casquillo, y del inserto que crea la parte “manga” blanda.

Se ilustran (4.11) los ensamblajes de la segunda y tercera etapa de fabricación, para visualizar las proporciones sólido-blandas del eslabón y las alturas de cada pieza que lo componen. Los moldes, como se ha indicado anteriormente, no varían nunca sus dimensiones y son los mismos para todos los eslabones.

¹⁴<https://bit.ly/4l7Om39>

¹⁵<https://bit.ly/3HIcXwR>

¹⁶<https://bit.ly/3TnqDQv>

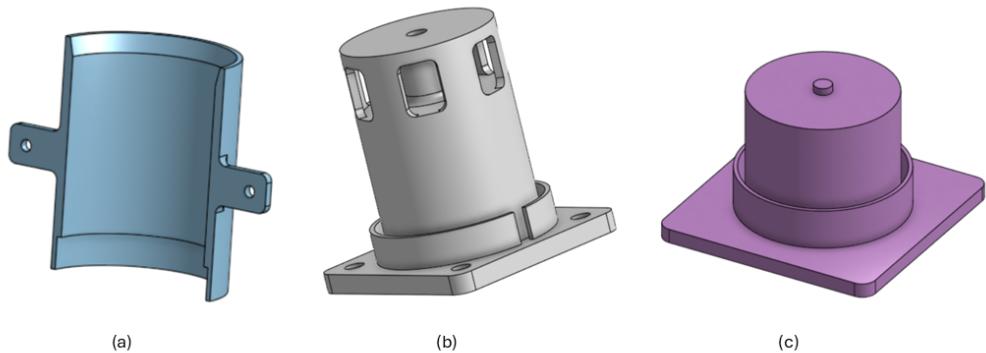


Figura 4.10: Piezas eslabón 50 % blando. (a) Casquillo parte inferior. Altura: 70.76 mm. Modelo en Onshape¹⁴. (b) Parte inferior. Altura: 65 mm. Modelo en Onshape¹⁵. (c) Inserto. Altura: 42.5 mm. Modelo en Onshape¹⁶.

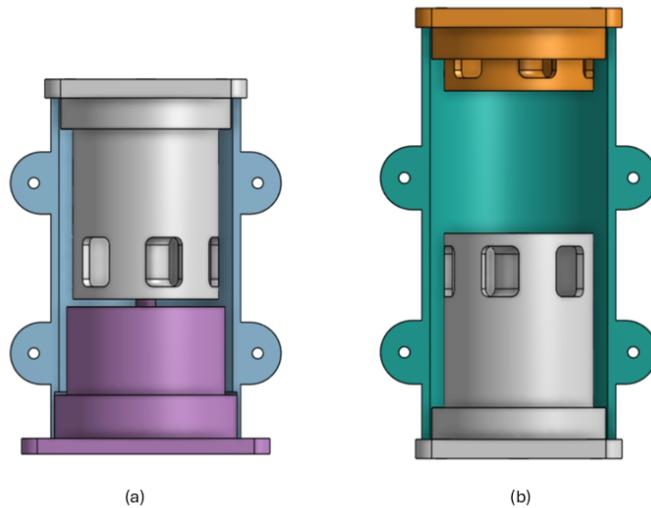


Figura 4.11: Conjunto de ensamblajes para el eslabón 50 % blando. (a) Ensamblaje de la segunda etapa de fabricación del eslabón 50 % blando. (b) Ensamblaje de la tercera etapa de fabricación del eslabón 50 % blando.

4.2.1.4. Eslabón 25 % blando

La figura 4.12 representa para el eslabón 25 % blando, las alturas de la parte inferior del eslabón y su correspondiente casquillo, y del inserto que crea la parte “manga” blanda.

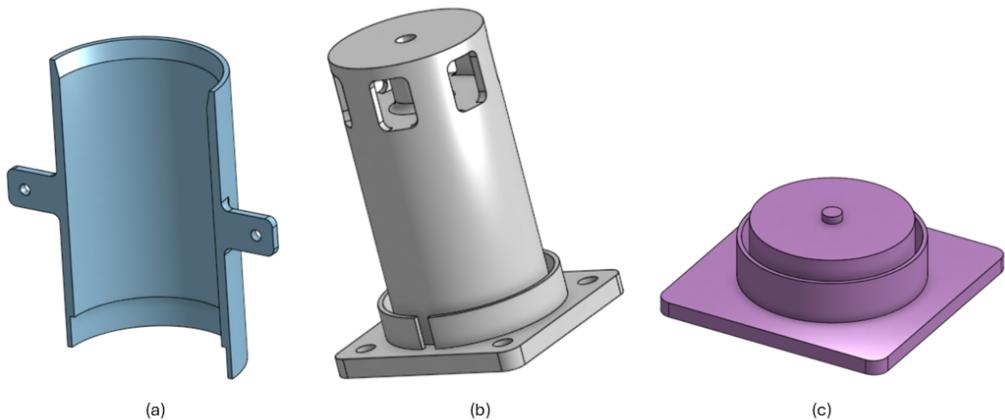


Figura 4.12: Piezas eslabón 25 % blando. (a) Casquillo parte inferior. Altura: 93.26 mm. Modelo en Onshape¹⁷. (b) Parte inferior. Altura: 87.5 mm. Modelo en Onshape¹⁸. (c) Inserto. Altura: 20 mm. Modelo en Onshape¹⁹.

Se ilustran (4.13) los ensamblajes de la segunda y tercera etapa de fabricación para visualizar las proporciones sólido-blandas del eslabón y las alturas de cada pieza que lo componen. Los moldes, como se ha indicado anteriormente, no varían nunca sus dimensiones y son los mismos para todos los eslabones.

¹⁷<https://bit.ly/440GjxV>

¹⁸<https://bit.ly/3HG5YVm>

¹⁹<https://bit.ly/45rkzhm>

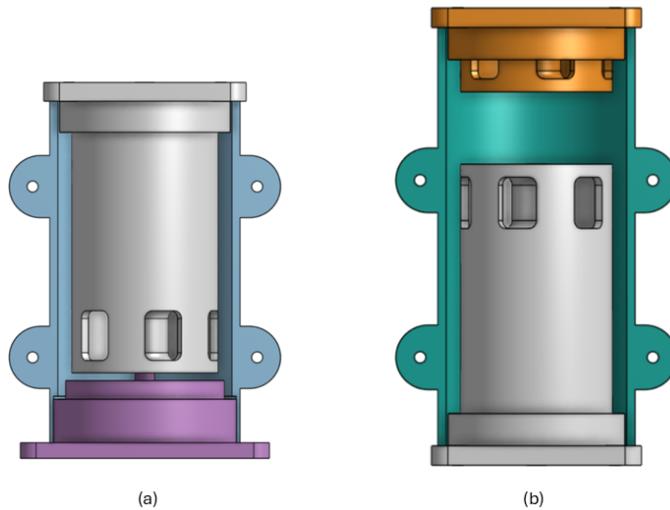


Figura 4.13: Conjunto de ensamblajes para el eslabón 25 % blando. (a) Ensamblaje de la segunda etapa de fabricación del eslabón 25 % blando. (b) Ensamblaje de la tercera etapa de fabricación del eslabón 25 % blando.

4.2.1.5. Diseño eslabón completamente sólido

El diseño del eslabón completamente sólido se abarcó en tres piezas separadas con el objetivo de facilitar su fabricación mediante impresión 3D.

La figura 4.14(a) (Modelo en Onshape²⁰) muestra la parte inferior y superior del eslabón sólido, ambas idénticas. Consta de una base igual a la utilizada en los eslabones sólidos-blandos, que permite su atornillado a más eslabones. Estas piezas constan de orificios para su unión y atornillado a la parte intermedia del eslabón sólido 4.14(b) (Modelo en Onshape²¹).

Finalmente, la figura 4.14(c) ilustra el ensamblaje completo del eslabón sólido, mostrando cómo se unen las tres piezas para formar una estructura completamente rígida y continua. Este eslabón se utilizará como base de comparación del rendimiento mecánico para los eslabones de rigidez variable. La altura total de este eslabón es de 142 mm, la misma que de los modelos sólido-blandos.

²⁰<https://bit.ly/3HVEiM6>

²¹<https://bit.ly/4jUsTcZ>

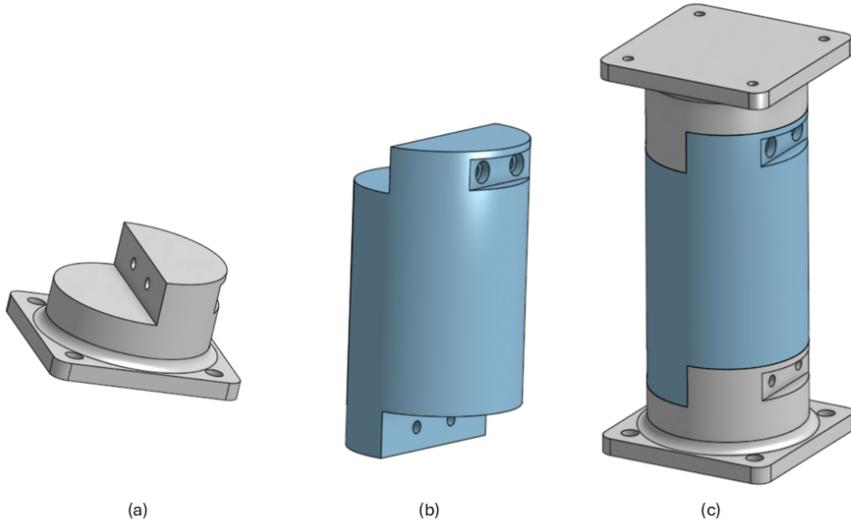


Figura 4.14: Conjunto de piezas del eslabón completamente sólido. (a) Parte inferior y superior del eslabón completamente sólido. (b) Parte intermedia del eslabón completamente sólido. (c) Ensamblaje del eslabón completo.

4.2.2. Fabricación de los eslabones rígido-blandos

La fabricación de los eslabones sólido-blandos se llevará a cabo con las piezas, anteriormente descritas, impresas en PLA con una impresora 3D y mediante el moldeo de silicona líquida Smooth-On EcoFlex 00-10. Se trata de siliconas catalizadas con platino, destacan por su suavidad con una dureza Shore 00-10 y su alta elongación al romperse (800 %) [30]. La dureza de Shore, que mide la flexibilidad de los materiales elásticos, se clasifica en diferentes escalas [31], siendo la del material utilizado la escala 00. Tras realizar la mezcla la silicona tiene una vida útil de 30 minutos, y su tiempo de curado es de 4 horas, alcanzando la curación máxima en 24 horas a una temperatura ambiente de 23ºC. El color de la silicona curada es translúcido.

La mezcla de la silicona se realiza combinando dos componentes: el compuesto A y el compuesto B (figura 4.15(a)). La proporción de mezcla necesaria es de 1A:1B en volumen según las instrucciones. Se vierten cantidades iguales de cada componente en vasos separados (4.15(b)), utilizando depresores de madera (figura 4.15(c)) dedicados a cada componente, con el fin de evitar contaminar la mezcla. Posteriormente, ambos componentes se vierten en un vaso y se mezclan cuidadosamente con el depresor correspondiente hasta obtener una mezcla homogénea.

Una vez se completa la mezcla de silicona en el recipiente correspondiente, se



Figura 4.15: Preparación de los compuestos A y B para la mezcla de silicona. (a) Compuestos de silicona EcoFlex 00-10 A y B. (b) Vasos para compuestos A y B y para la mezcla vacíos. (c) Vasos de compuestos A y B llenos y depresores de madera.

introduce en una cámara de vacío (figura 4.16) para eliminar las burbujas de aire atrapadas durante la mezcla. Este paso resulta muy importante para obtener una mezcla libre de imperfecciones y posibles puntos de ruptura de la silicona.

Para evitar que la silicona se adhiera a los moldes y facilitar su extracción, se aplica antes de verter la silicona un agente desmoldeante en aerosol, Ease Release 200 [32] en la superficie interior de todos los moldes.

El material granular utilizado para producir el fenómeno de “jamming” en los eslabones de rigidez variable es el café molido. Se trata de un material común, se ha seleccionado por su excelente compactación al aplicar vacío. Su tamaño de partícula es relativamente uniforme y tiene gran capacidad de “empaquetamiento”.

Con los materiales y procedimientos de mezcla de la silicona descritos, se procede a la fabricación del eslabón, dividiéndose en 3 etapas.

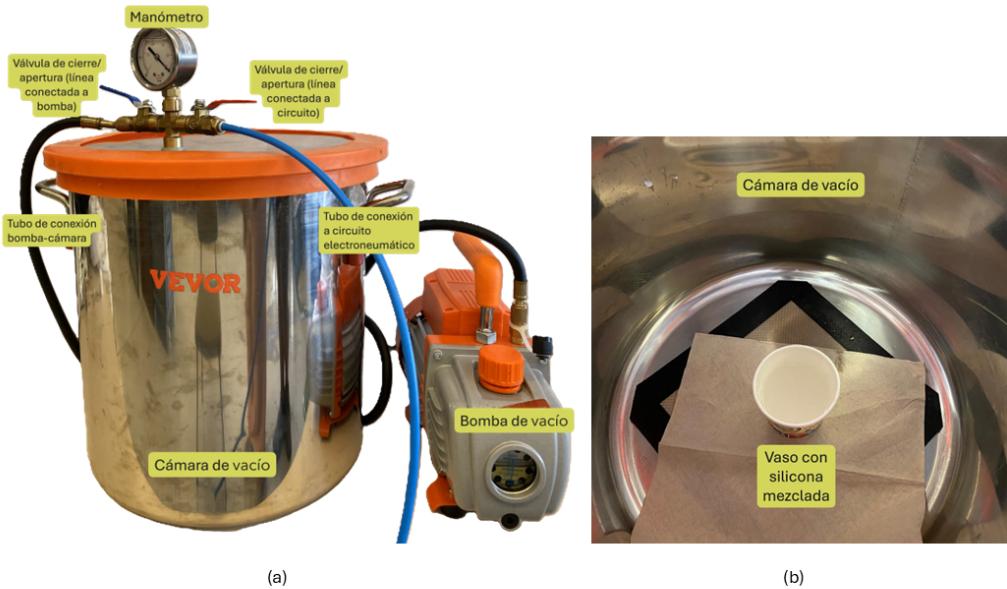


Figura 4.16: Proceso de desgasificación de la silicona en la cámara de vacío. (a) Cámara y bomba de vacío. (b) Vaso con la mezcla en la cámara de vacío.

4.2.2.1. Primera etapa de fabricación

En la primera etapa del proceso de fabricación, se moldea con silicona las secciones superior e inferior de los eslabones de rigidez variable. Para ello son necesarios los diseños mostrados en las figuras 4.2 para la parte superior y 4.3 para la parte inferior.

El proceso comienza con la aplicación de una capa uniforme del aerosol Ease Release en la parte interna de los casquillos (figura 4.2(a) y figura 4.3(a)). Este paso es muy importante para facilitar la extracción de las piezas tras el curado de la silicona. Posteriormente, los casquillos se atornillan alrededor de las piezas rígidas, asegurando un cierre hermético para contener la silicona líquida.

La silicona EcoFlex 00-10, previamente mezclada y desgasificada, se vierte con cuidado en el interior de los casquillos. Para facilitar el llenado de zonas de geometría compleja, se utiliza una jeringuilla, lo que permite inyectar la silicona de manera precisa. El llenado se realiza de forma gradual hasta que la pieza queda completamente recubierta de silicona.

Una vez rellenados los moldes, nuevamente son introducidos en la cámara de vacío para eliminar las burbujas de aire que se pueden haber formado durante el proceso de vertido de la silicona dentro del molde. Este proceso de desgasificación

requiere de varias repeticiones ya que, a medida que la silicona penetra en los huecos y ranuras, el volumen dentro del molde disminuye al aplicar el vacío, por lo que es necesario llenar los casquillos hasta el nivel adecuado y repetir el ciclo de vacío hasta la ausencia completa de burbujas.

Cuando se han eliminado todas las burbujas y los moldes están llenos de silicona, se dejan reposar a temperatura ambiente durante 24 horas para el curado completo, tal y como especifica el fabricante. En las figuras 4.17 se observan los moldes llenos y sin burbujas, listos para el proceso de curado.



Figura 4.17: Secciones llenas de silicona listas para su curado. (a) Sección superior del eslabón, con sus correspondientes casquillos atornillados y llena de silicona desgasificada. (b) Sección inferior del eslabón, con sus correspondientes casquillos atornillados y llena de silicona desgasificada.

Transcurrido el tiempo necesario, se procede a desmoldar las piezas de silicona, obteniendo así las partes superior e inferior del eslabón de rigidez variable. Las piezas desmoldadas se muestran en la figura 4.18.

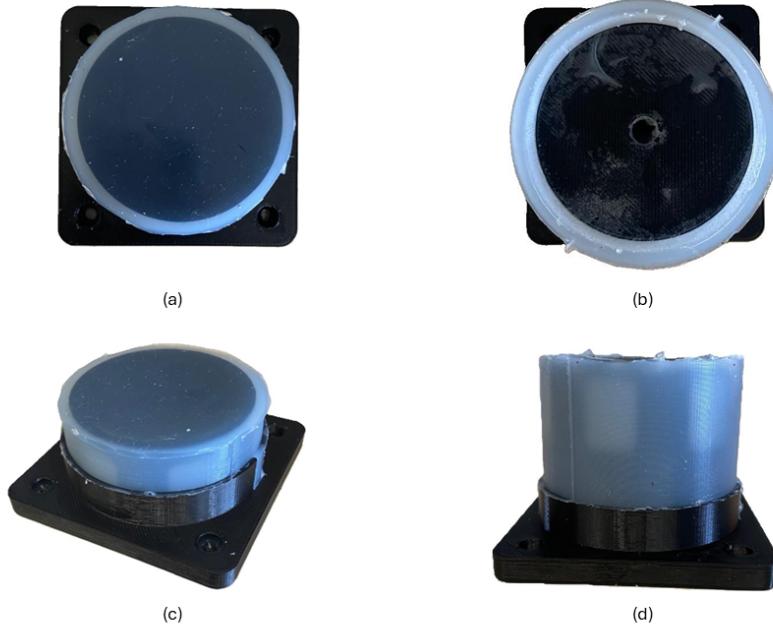


Figura 4.18: Secciones superior e inferior del eslabón de rigidez variable desmoldadas. (a) Sección superior desmoldada vista desde arriba. (b) Sección inferior desmoldada vista desde arriba. (c) Sección superior desmoldada. (d) Sección inferior desmoldada.

4.2.2.2. Segunda etapa de fabricación

En esta segunda etapa, se procede a crear la cavidad de silicona blanda que contiene el café molido. Los diseños utilizados son los presentes en la figura 4.4. El objetivo es realizar un ensamblaje de la sección inferior del eslabón, fabricada en la primera etapa, y formar una “manga” de silicona para el material granular.

La figura 4.19 ilustra los componentes impresos necesarios para esta etapa de fabricación: las dos mitades del molde (figura 4.4(a)), el inserto (figura 4.4(c)) y la sección inferior con la capa de silicona de la primera etapa (figura 4.18(d)).

El proceso comienza, al igual que en la primera etapa, aplicando una capa uniforme del aerosol Ease Release en la parte interna de los moldes. Tras esto, se vierte una cantidad pequeña de silicona EcoFlex (previamente mezclada y desgasificada) en ambas mitades del molde. Se realizan movimientos suaves para extenderla y crear una capa delgada que recubra el interior de los moldes. Tras este recubrimiento inicial, las mitades se cierran y atornillan alrededor del inserto.

Una vez el molde se ha ensamblado alrededor del inserto, se continua rellenando con silicona el espacio entre el inserto y las paredes del molde con ayuda de una jeringuilla. Una vez lleno, se introduce nuevamente en la cámara de vacío para



Figura 4.19: Piezas necesarias para la segunda etapa de fabricación.

eliminar las burbujas de aire (figura 4.20).

A continuación, se vuelve a verter silicona en el molde, sin llenar completamente al borde de éste, y se vuelve a introducir una última vez dentro de la cámara. Seguidamente, se encaja la sección inferior del eslabón y se presiona con firmeza. Esta acción provoca que la silicona, todavía sin curar, que se encuentra en el molde, rebose por fuera de éste. Con esto se asegura una capa de silicona continua y uniforme, que se adhiera a la silicona previamente curada de la sección inferior, evitando puntos débiles en los que la silicona puede romper.

Cuando la sección inferior hace contacto totalmente con el molde y el conjunto está bien cerrado, se aplica silicona caliente con una pistola en las uniones superior e inferior, así como en los laterales, con esto se sella cualquier posible fuga de silicona líquida (figura 4.21(a)).

Finalmente, tras transcurrir el tiempo necesario para el curado de la silicona, se desmolda el conjunto. Se obtiene una sección inferior del eslabón con una “manga” de silicona para albergar el café, véase en la figura 4.21(b). Es importante señalar que, una vez cerrado el molde con la sección inferior y el inserto, se le da la vuelta. Esto es debido a que, la silicona líquida tiende a escurrirse, por lo que conviene que lo haga hacia la parte inferior del eslabón para asegurar una adhesión continua y uniforme en esa zona crítica.

36



Figura 4.20: Molde de la segunda etapa atornillado y lleno de silicona en la cámara de vacío.

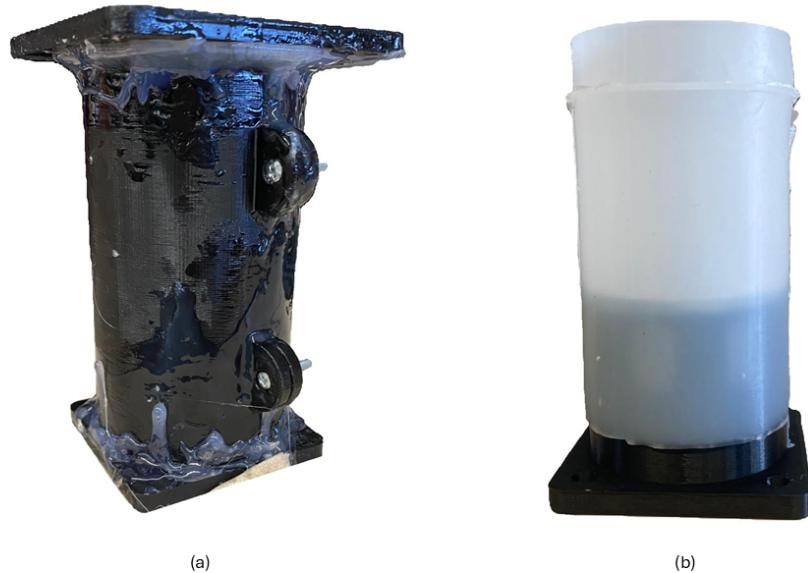


Figura 4.21: Eslabón en segunda etapa de fabricación. (a) Molde de la segunda etapa totalmente cerrado, con silicona caliente en las juntas para evitar que se salga la silicona líquida. (b) Pieza desmoldada con la sección inferior del eslabón ensamblada con la “manga” creada para albergar el material granular.

4.2.2.3. Tercera etapa de fabricación

En esta etapa final, se completa la construcción del eslabón de rigidez variable. Se toma la pieza fabricada en la segunda etapa (figura 4.21(b)), se remanga la silicona hasta el final para dejar expuesta la parte superior de la sección inferior del eslabón. Con el uso de un cíuter, se recorta un pequeño rectángulo de la silicona expuesta (figura 4.22(a)). Sobre éste se pega un rectángulo recortado de un filtro de café con la pistola de silicona caliente (figura 4.22(b)). Este filtro actúa como una barrera, evitando que el tubo de vacío entre en contacto con el café molido y lo succione.

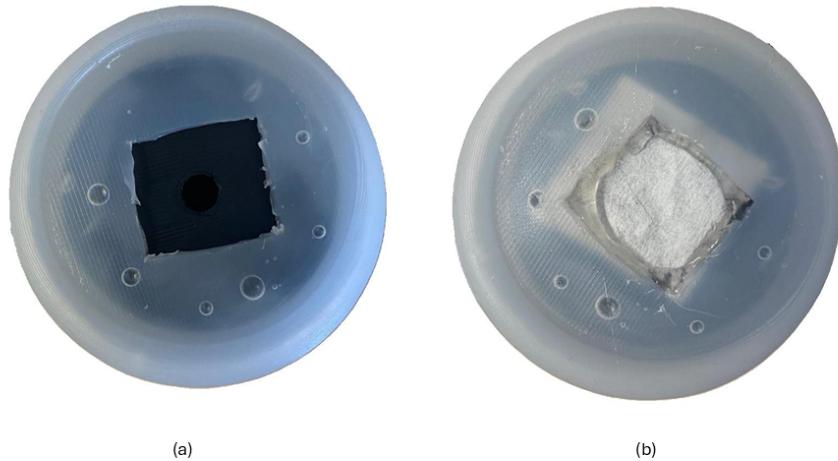


Figura 4.22: Pegado de filtro rectangular en la sección inferior del eslabón de rigidez variable. (a) “Manga” de silicona enrollada con el rectángulo recortado. (b) Sección inferior con la “manga” enrollada y el filtro de café rectangular pegado.

Una vez pegado el filtro, se desdobra la silicona y se procede al llenado de la manga con el café molido, y al ensamblaje de la sección superior del eslabón. Para ello se utilizan los moldes altos diseñados (figura 4.5(a)) y la sección superior recubierta con silicona realizada en la primera etapa de fabricación (figura 4.18(c)).

Inicialmente, como en todas las etapas, se aplica el spray antiadherente en la parte interior de los moldes altos. Una vez hecho esto, se juntan y atornillan las dos mitades alrededor de la pieza fabricada en la segunda etapa. El molde ayuda a contener la manga y facilita el llenado con café, evita que la silicona se doble y derrame, y también controla la cantidad de café introducida (figura 4.23(a)).

La cantidad de café molido utilizado en cada eslabón se mide con una báscula



Figura 4.23: Relleno de la “manga” de silicona con café. (a) “Manga” rellena de café con los moldes atornillados para contenerlo. (b) Pesaje de café con báscula.

de cocina SINBO SKS 4520/4521 [33] (figura 4.23(b)). La cantidad específica para cada tipo de eslabón (según su proporción sólido-blanda) se detalla en la tabla 4.1.

Eslabón Rígido-Blando	Cantidad de Café (g)
Eslabón 100 % Blando	60
Eslabón 75 % Blando	47
Eslabón 50 % Blando	32
Eslabón 25 % Blando	17

Tabla 4.1: Cantidad de café molido utilizada en cada tipo de eslabón sólido-blando

Para evitar que la silicona líquida se filtre entre el café, se utilizan círculos recortados del filtro de café. Estos círculos se pegan entre sí con una capa fina de silicona caliente (figura 4.24(a)). Tras esto, se sitúa cuidadosamente entre la superficie del café y la silicona líquida que se verterá a continuación (figura 4.24(b)) .

Se vierte la silicona líquida EcoFlex 00-10 sin llenar completamente los moldes altos, y se introduce el conjunto en la máquina de vacío para eliminar las burbujas. Seguidamente, se toma la sección superior fabricada en la primera etapa (figura 4.18(c)) y se presiona con cuidado sobre la silicona líquida, provocando que ésta rebose ligeramente. Cuando se coloca la parte superior del eslabón, se le da la vuelta al conjunto para el curado. De esta manera, la sección superior queda en la parte inferior y se asegura que la silicona líquida se deslice hacia esa zona y se ensamble de manera continua, igual que se buscaba en la segunda etapa con la sección inferior.

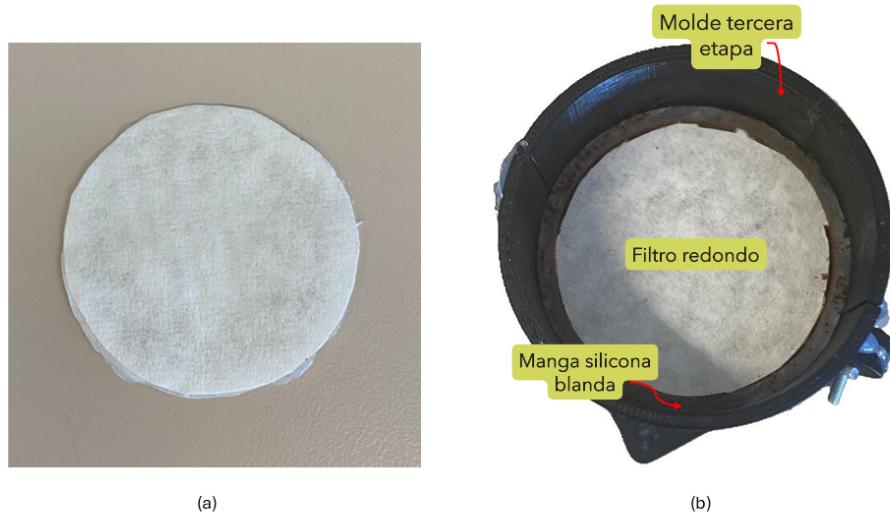


Figura 4.24: Última etapa de fabricación, colocación del filtro. (a) Filtro redondo para evitar el filtrado de silicona líquida en el café. (b) Filtro redondo situado encima del café molido dentro de la “manga” de silicona.

Una vez la sección hace contacto con el molde y el conjunto se encuentra cerrado apropiadamente, se aplica silicona caliente en las uniones donde la silicona líquida se puede escapar (figura 4.25(a)).

Transcurrido el tiempo de curado, se desmolda el conjunto, obteniendo finalmente el eslabón de rigidez variable listo para la realización de las pruebas (figura 4.25(b)). Los eslabones fabricados presentan una capa de silicona blanda con un ancho de 4 mm.

En la figura 4.26, se muestran los cuatro eslabones sólido-blandos junto con el eslabón completamente sólido impreso.

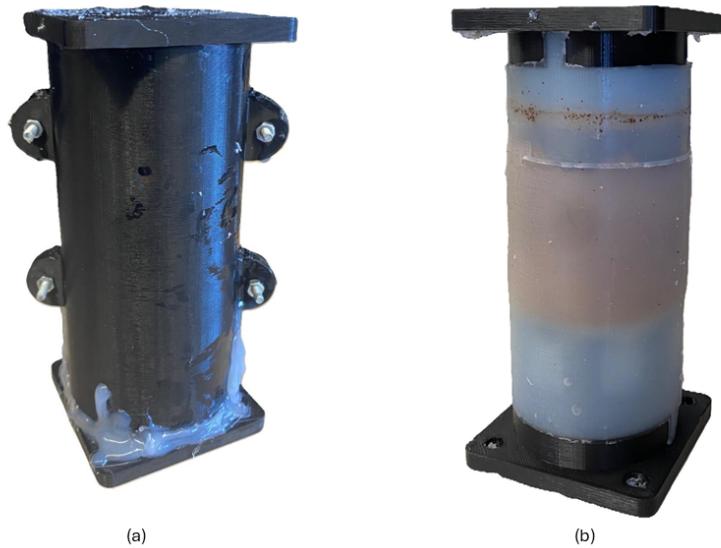


Figura 4.25: Final de la fabricación del eslabón de rigidez variable. (a) Molde de la tercera etapa cerrado con la parte superior rígida ensamblada. (b) Eslabón de rigidez variable fabricado.

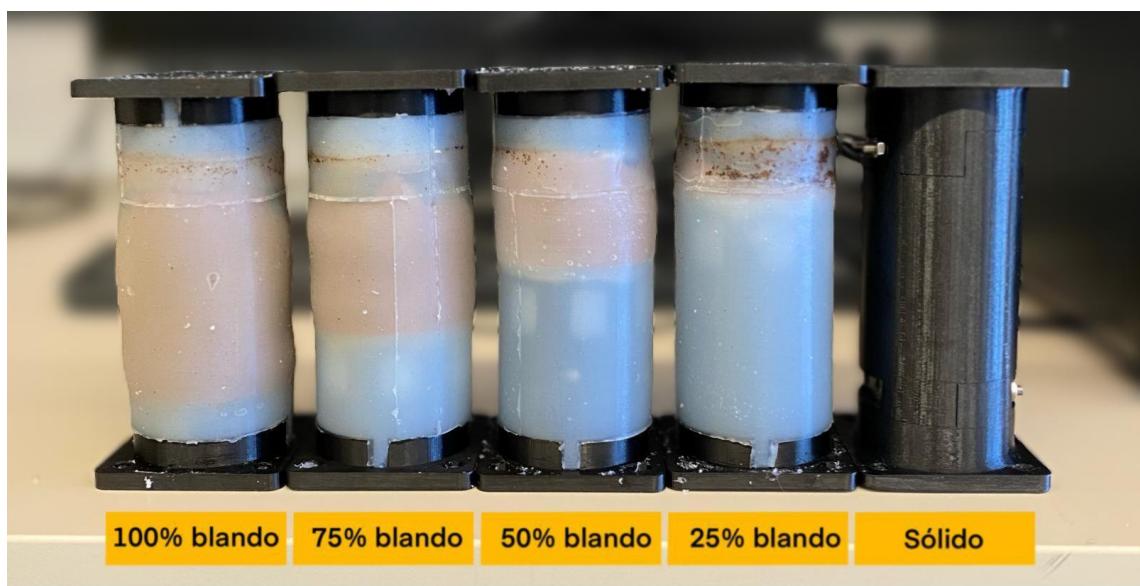


Figura 4.26: Los cinco eslabones fabricados, cuatro de rigidez variable y uno completamente sólido.

4.3. Diseño e implementación del circuito electro-neumático

Para realizar la técnica de “jamming” y tomar datos, se diseña un circuito híbrido que integra componentes neumáticos y electrónicos. El circuito se ilustra en las figuras 4.27 y 4.28, el circuito completo se ha separado en dos figuras para más claridad, la primera corresponde a la parte electrónica y la segunda a la neumática.

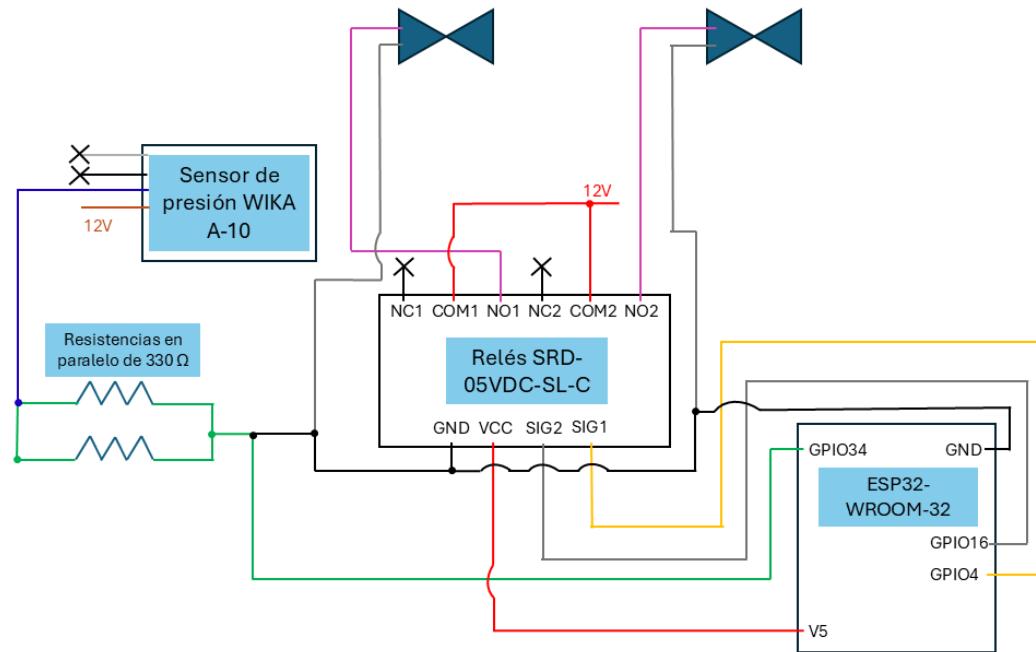


Figura 4.27: Circuito electrónico.

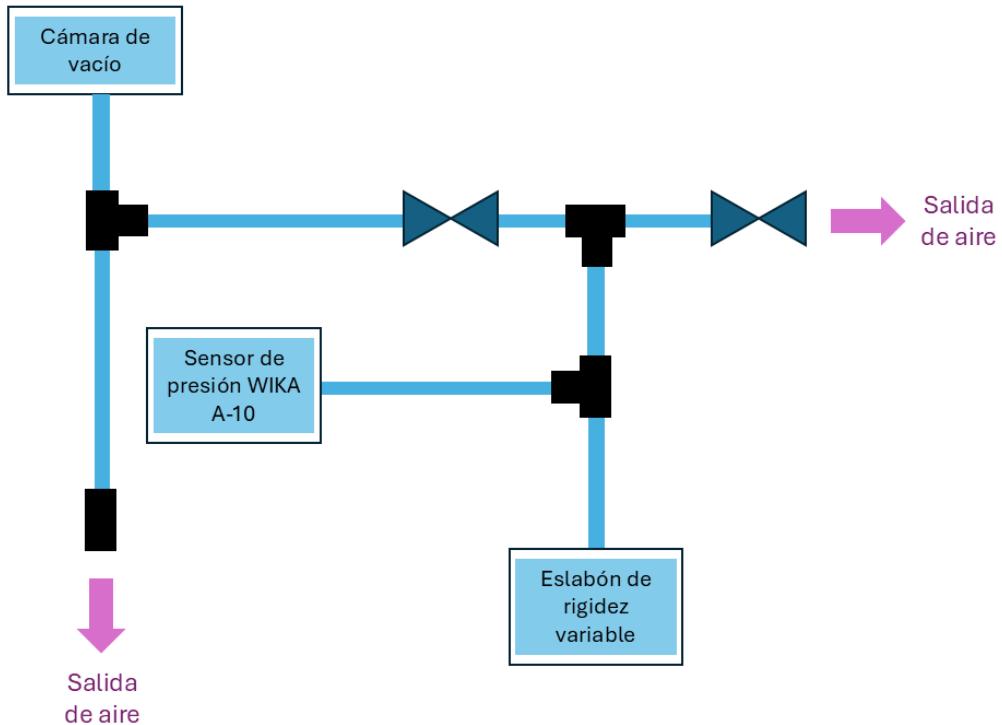


Figura 4.28: Circuito neumático.

4.3.1. Componentes neumáticos

El sistema neumático es el encargado de generar y aplicar el vacío necesario para el “jamming”. Los componentes principales son:

- **Tubos de vacío (azul grueso en la figura 4.28):** Se utilizan tubos de 6 mm de diámetro para la conducción de vacío, se conectan a la cámara de vacío y bifurca hasta el eslabón de rigidez variable.
- **Válvulas PVQ31 [34]:** Válvulas solenoides compactas que permiten un control preciso del vacío aplicado. Tienen la capacidad de modular el flujo de aire permitiendo ajustar la rigidez del eslabón. Se alimentan a 12V y son controladas con los relés. En el circuito hay dos, una de ellas controla la rigidez del eslabón y la otra se utiliza para liberar el vacío del circuito cuando es necesario.
- **Bomba y cámara de vacío (figura 4.16(a)):** estos dos elementos se encargan de generar y almacenar el vacío necesario para realizar el “jamming”. La bomba extrae el aire del sistema y la cámara de vacío es un depósito que asegura un suministro de vacío.

- **Salida de aire manual:** se incorpora una salida de aire manual para un control adicional y rápida liberación de vacío.

4.3.2. Componentes electrónicos y control

La parte electrónica del circuito es la responsable del control y monitoreo del sistema. Los componentes son:

- **ESP32-WROOM-32:** este microcontrolador ejecuta el código que controla la apertura y cierre de las válvulas a través de los relés, y también procesa las señales del sensor de presión de vacío. La alimentación de la ESP32 se realiza a través del conector USB. En la figura 4.27 se muestran los pines conectados de la ESP32. Los pines utilizados son:
 - GPIO 4: Control del Relé 1 (Válvula 1).
 - GPIO 34: lectura del sensor de presión.
 - GPIO 16: control del Relé 2 (Válvula 2).
 - GND
 - 5V: para alimentar los relés.
- **Relés SRD-05VDC-SL-C [35]:** se emplean dos relés para el control de las válvulas. El ESP32 envía señales a los relés para abrir o cerrar las válvulas. Los relés se alimentan a 5V y se controlan con señales de 3.3V que provienen de la ESP32.
- **Sensor de presión WIKA A-10 [36]:** este sensor se encarga de medir la presión actual dentro del circuito neumático. Esta información es fundamental para monitorizar el proceso de “jamming”. Se alimenta también a 12V. Consta de un conector circular de 4 cables:
 - Cable marrón: alimentación 12V.
 - Cable azul: GND.
 - Cables blanco y negro: no utilizados.
- **Resistencias en paralelo de 330 Ω:** la salida del sensor de presión es en corriente, en el rango de 4mA a 20mA, en lugar de voltaje. Para poder interpretar la señal con la ESP32, es necesario convertirla a voltaje. Esta conversión se logra mediante un circuito de dos resistencias de 330 Ω en paralelo (equivalente a una de 165 Ω). El voltaje compatible para los pines de la ESP32 es de 0 a 3.3V. La corriente que fluye a través de las resistencias genera una caída de voltaje (Ley de Ohm: $V = I \cdot R$), y este voltaje es el que mide la ESP32.

- **Motor Dynamixel XM450-W350-R [37], U2D2 [38] y Power Hub [39]:** el circuito incluye un motor Dynamixel, junto con su interfaz U2D2 y un Power Hub. Este servomotor se utiliza para desplazar los eslabones contra el sensor de fuerza.
- **Sensor de fuerza:** se incorpora un sensor de fuerza desarrollado en el Trabajo de Fin de Grado [40] por Victor Rosillo Suero, para medir las fuerzas durante los experimentos. El sensor es capaz de medir la fuerza lineal en el eje Z. La célula de carga puede medir hasta un máximo de 5 kg (49.05 N), esto se ha de tener en cuenta para no sobrepasar los límites del sensor.

4.3.3. Diseño de placa de prototipado (PCB)

Se ha diseñado una placa de prototipado para simplificar el circuito y cableado, visible en la figura 4.29. La placa de prototipado contiene integradas las resistencias en paralelo para convertir la señal de corriente del sensor de presión WIKA A-10 a una señal de tensión compatible con la ESP32.

Asimismo, la placa incorpora bornes de conexión para las fuentes de alimentación requeridas por el sistema. Estos bornes aseguran conexiones más seguras y organizadas, facilitando la distribución de energía a los componentes del circuito electroneumático. Cuenta con un punto de conexión común para todas las tierras (GND), garantizando una referencia de voltaje estable para todos los elementos y minimizando posibles interferencias.

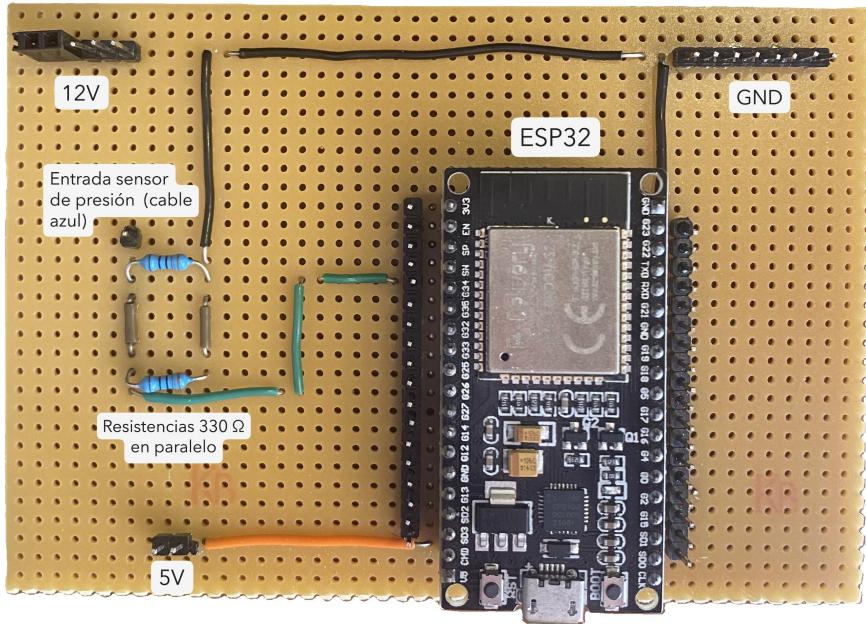


Figura 4.29: Placa de prototipado para el circuito electroneumático.

4.4. Desarrollo del Software

4.4.1. Control del sistema electroneumático

Para la parte del circuito electroneumático, se implementa un código en el microcontrolador ESP32 con Arduino IDE, con comunicación basada en ROS (Robot Operating System) a través de la biblioteca rosserial. Esto permite interactuar con otros nodos en tiempo real y facilita la toma y representación de datos en los experimentos. El código se encarga del control de las válvulas para aplicar y deshacer el “jamming”, controlando los dos relés conectados a las válvulas PVQ31. Asimismo, toma las lecturas del sensor de presión WIKA A-10. El código ejecuta el envío de datos a una frecuencia de 10Hz.

Los topics utilizados son:

Publisher:

- /sensor_vacio (std_msgs/Float32): publica la presión medida por el sensor. La conversión de señal se realiza aplicando la ecuación:

$$P = a \cdot \text{ADC} + b \quad (4.1)$$

donde P representa la presión en bar, y ADC representa la lectura del convertidor analógico-digital (Analog to Digital Converter) del GPIO 34 de la ESP32, que transforma la señal analógica del sensor en un valor digital comprendido entre 0 y 4095. Los coeficientes $a = 0,000657$ y $b = -1,5049$ se han obtenido mediante un ajuste lineal tras la caracterización experimental del sensor de presión.

Subscribers:

- /Rele1 (std_msgs/UInt8): activa o desactiva la válvula conectada al relé 1.
- /Rele2 (std_msgs/UInt8): activa o desactiva la válvula conectada al relé 2.

El código completo está disponible en el repositorio de GitHub²².

4.4.2. Lectura del sensor de fuerza

Para la lectura del sensor de fuerza se utiliza una segunda ESP32 conectada a una celda de carga mediante un amplificador HX711. El diseño de este sensor y su conexionado fueron desarrollados en el Trabajo de Fin de Grado de Víctor Rosillo Suero [40].

El código se ha implementado con Arduino IDE, utilizando la librería HX711 y rosserial para publicar los datos a una frecuencia de 10Hz.

Los topics utilizados son:

- /Force_Z (std_msgs/Float32): publica la fuerza en eje Z medida por la celda de carga.

Se llevó a cabo una calibración del sensor de fuerza. Esta consistió en aplicar masas conocidas sobre la célula de carga, registrando el valor digital proporcionado por el amplificador HX711. Con los datos obtenidos, se realizó un ajuste polinómico de segundo grado mediante regresión. La expresión obtenida es la siguiente:

$$F_z = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (4.2)$$

²²https://github.com/TanyaIT16/TFG_eslabon_rigidez_variable.git

donde F_z es la fuerza aplicada en el eje Z en Newtons y x representa la salida digital leída por el HX711. Los coeficientes de ajuste fueron $a = 1,29 \times 10^{-10}$, $b = -2,04 \times 10^{-5}$ y $c = -1,94$.

El código completo está disponible en el repositorio de GitHub²².

4.4.3. Control del motor Dynamixel

El control del motor Dynamixel se realiza mediante un nodo ROS implementado en C++. Para ello se ha hecho uso de las funcionalidades de la librería desarrollada por Maksym Saldat. El código fuente de dicha librería está disponible en el repositorio de GitHub²³.

Se ha seguido el procedimiento de instalación descrito en el enlace. A continuación, se ha añadido un nuevo paquete denominado *jammer_experiments*, dentro del cual se ha desarrollado el nodo *jammer.cpp*. Este nodo configura el servo en modo control de velocidad y publica los datos de posición y corriente a una frecuencia de 10 Hz. Se ha establecido un umbral de corriente máxima alcanzable de 3 A para no dañar el motor, si se excede el motor se detiene.

Los topics utilizados son:

- /motor_position(std_msgs/Float32): posición angular del motor en grados.
- /motor_current(std_msgs/Float32): corriente del motor en mA.

El código completo está disponible en el repositorio de GitHub²².

4.4.4. Lanzamiento y ejecución del sistema

Para facilitar el despliegue de los códigos y la adquisición de datos se ha creado un archivo de lanzamiento y un script.

4.4.4.1. Archivo *serial_nodes.launch*

Este archivo de lanzamiento de ROS se encarga de inicializar los dos nodos *serial_node.py* de la librería *rosserial_python*, estableciendo la comunicación con

²³https://github.com/TaISLab/dynamixel_ros_library

las dos ESP32 conectadas por USB. El archivo se encuentra en el repositorio de GitHub ²².

4.4.4.2. Script *iniciar_experimento.sh*

Facilita el inicio simultáneo de todos los componentes del sistema, para la posterior representación de datos. Este archivo inicia la grabación de datos con *rosbag record* para registrar los datos publicados por todos los topics durante los experimentos. Asimismo, lanza el archivo *serial_nodes.launch* para inicial la comunicación con las ESP32 y ejecuta el nodo *jammer_node*. El archivo se encuentra en el repositorio de GitHub ²².

Capítulo 5

Experimentos y Resultados

En este capítulo, se presentan los experimentos realizados para evaluar el comportamiento y propiedades mecánicas de los eslabones de rigidez variable desarrollados en este trabajo. Con estos experimentos se pretende cuantificar la influencia de la variación de proporciones sólido-blandas a la hora de modificar la rigidez.

Todas las presiones indicadas en este trabajo se expresan con respecto a la presión atmosférica (0 bar = presión atmosférica).

El montaje experimental consiste en el uso del circuito anteriormente descrito, un portátil, en el cual ejecutar los distintos códigos, y los eslabones fabricados. El montaje es común a todos los experimentos.

En total se han realizado 4 experimentos, cada uno con un enfoque y objetivos distintos:

- Experimento 1: Tiempo de transición rígido-blando (5.1)
- Experimento 2: Análisis de la deformación sin vacío (5.2)
- Experimento 3: Estudio de posición y fuerza de eslabones de rigidez variable a distintos niveles de vacío (5.3)
- Experimento 4: Análisis comparativo de la dinámica de los eslabones de rigidez variable con el eslabón completamente sólido (5.4)

A continuación, se detalla el procedimiento y las variables y resultados tomados en cada experimento.

5.1. Experimento 1: Tiempo de transición rígido-blando

5.1.1. Objetivo

El objetivo de este experimento es determinar el tiempo que tarda cada eslabón en alcanzar un nivel de vacío predefinido (-0.85 bar) y en retirar ese vacío. Esta información es muy importante para evaluar la rapidez de respuesta, y su potencial para aplicaciones que requieran cambios rápidos en la rigidez.

5.1.2. Procedimiento

Cada eslabón se monta sobre el eje del motor, aunque no se activa durante el experimento. Una vez cargada la cámara de vacío, se abre una de las válvulas que conecta la cámara con el eslabón. El sensor de presión registra cuánto tiempo transcurre hasta alcanzar el umbral establecido.

Para medir el tiempo de recuperación a 0 bares, se invierte el proceso: con el sistema ya en vacío, se cierra la válvula y se mide cuánto tiempo tarda el aire en volver.

Estos fenómenos se producen de manera muy rápida, debido a ello se ha desarrollado un código específico para este experimento en Arduino IDE y la ESP32. El código se basa en los mismos principios de lectura descritos en la sección 4.4.1, pero se han realizado modificaciones. Se ha eliminado el envío continuo de datos del sensor a través de ROS y se utiliza un buffer para registrar las lecturas. Esto reduce la latencia y mejora la resolución temporal de las mediciones.

Los topics utilizados son:

Publisher:

- /tiempo_hasta_vacio (std_msgs/Float32): publica el tiempo que tardó en alcanzar el vacío objetivo. La medición inicia al enviar un “1” al topic /Rele1, lo que abre la válvula.
- /tiempo_hasta_atmosfera (std_msgs/Float32): publica el tiempo que tardó el eslabón a volver a 0 bares tras cerrar la válvula (al enviar un “0” al topic /Rele1).

Subscribers:

- /Rele1 (std_msgs/UInt8): activa o desactiva la válvula conectada al relé 1.
- /Rele2 (std_msgs/UInt8): activa o desactiva la válvula conectada al relé 2.

El código completo está disponible en el repositorio de GitHub ¹.

5.1.3. Resultados

La tabla 5.1 resume los resultados obtenidos en este experimento.

Se observa que el porcentaje de parte blanda y el tiempo necesario en alcanzar el vacío tienen una relación inversa: a menor porcentaje blando, menor es el volumen al que se le aplica el “jamming” y más rápido se alcanza el objetivo. El eslabón 25 % blando fue el más rápido (0.329s), y el 100 % blando es el que más tardó (0.917s).

En la fase de recuperación a 0 bares, el eslabón 25 % blando de nuevo fue el más rápido (1.562s) y el eslabón 100 % blando fue el más lento (5.956s). Se rompe la tendencia esperada en los eslabones 50 % blando (3.602s) y 75 % blando (2.992s), esto puede atribuirse a posibles diferencias en la fabricación, causando que el café se acomode y compacte de formas distintas. El eslabón de 50 % podría tener una estructura mejor sellada, dificultando la entrada del aire en comparación con el 75 % blando.

Los procesos de vacío y despresurización no son iguales en tiempos, tal como se observa en la tabla 5.1. Aunque no se conocen con certeza las causas de esta diferencia, se cree que podría deberse a la compactación del café al aplicar el vacío, lo que ofrecería mayor resistencia al flujo de aire durante la entrada del mismo. Esta hipótesis deberá ser analizada con mayor profundidad en futuros estudios.

Porcentaje blando (%)	Tiempo hasta vacío (s)	Tiempo hasta atmósfera (s)
100 %	0.917	5.956
75 %	0.893	2.992
50 %	0.580	3.602
25 %	0.329	1.562

Tabla 5.1: Tiempos de activación y desactivación del vacío según el porcentaje de parte blanda

¹https://github.com/TanyaIT16/TFG_eslabon_rigidez_variable.git

5.2. Experimento 2: Análisis de la deformación sin vacío

5.2.1. Objetivo

Este experimento tiene como objetivo evaluar la deflexión estática de los eslabones de rigidez variable ante la acción de la gravedad sin aplicar vacío.

5.2.2. Procedimiento

En este experimento se hace uso únicamente de los eslabones fabricados y de una hoja milimetrada. Se toma el eslabón en una posición horizontal y se coloca en una posición de referencia frente a la hoja milimetrada. En esta misma posición se colocarán todos los eslabones para evaluar las diferencias en las imágenes tomadas.

5.2.3. Resultados

La variable medida en este experimento es la deflexión visual, se ilustra en las siguientes imágenes 5.1.

Se observa que los eslabones con una mayor proporción de material blando presentan una mayor deflexión. Este experimento proporciona una comparación visual de este fenómeno.

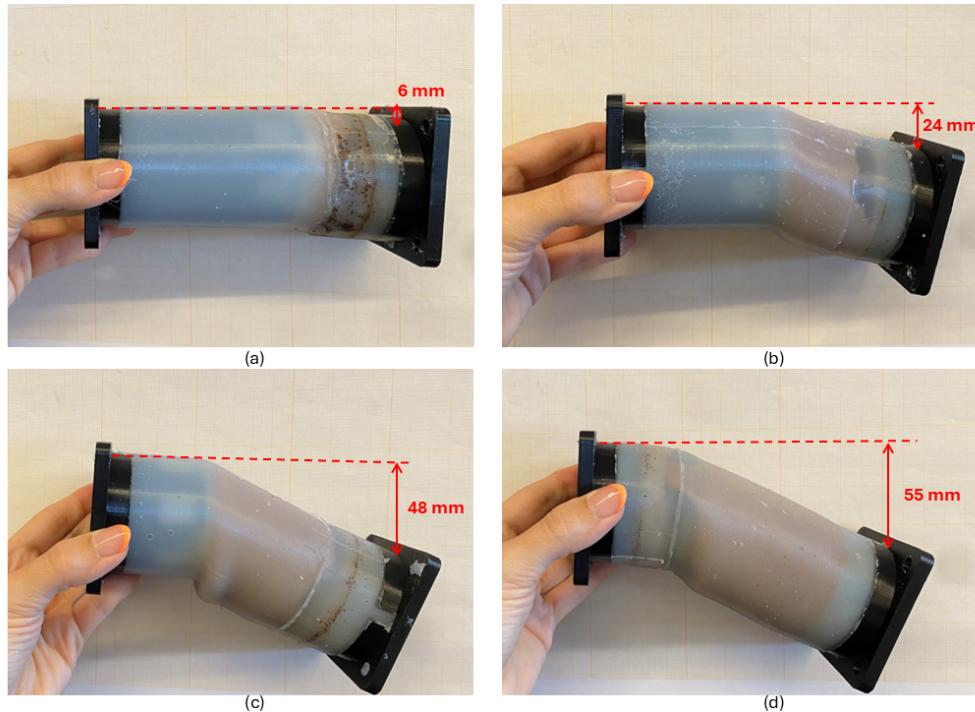


Figura 5.1: Deflexión de los eslabones de rigidez variable sobre una hoja milimetrada. (a) Eslabón 25 % blando. (b) Eslabón 50 % blando. (c) Eslabón 75 % blando. (d) Eslabón 100 % blando.

5.3. Experimento 3: Estudio de posición y fuerza de eslabones de rigidez variable a distintos niveles de vacío

5.3.1. Objetivo

En este experimento se busca analizar el comportamiento de los eslabones de rigidez variable sometidos a distintos niveles de vacío: 0 bares, -0.4 bares y -0.9 bares. Se pretende evaluar la influencia del porcentaje de parte blanda sobre la rigidez al aplicar “jamming”.

5.3.2. Procedimiento

Cada uno de los eslabones se monta sobre el motor Dynamixel. El motor rota a una velocidad constante para empujar el eslabón contra el sensor de fuerza hasta que se alcance el límite de corriente del motor o hasta que haya una deformación significativa del eslabón, momento en el cual se detiene el experimento manualmente.

El control del sistema y toma de datos se realizan ejecutando el script *iniciar_experimento.sh*, mencionado en el apartado 4.4.4.2. Previamente al inicio del experimento, se ajusta el nivel de vacío deseado en la cámara de vacío.

Con los datos tomados se construirán las siguientes gráficas para cada nivel de vacío:

- Posición vs. Tiempo
- Fuerza vs. Tiempo
- Fuerza vs. Posición

Los datos recogidos en el experimento se han representado y procesado con un script de Python (se puede consultar en el repositorio de GitHub²). Se han empleado las librerías *pandas*, *numpy*, y *matplotlib*. Este código se encarga de cargar los datos de los archivos .csv correspondientes a la posición del motor y a la fuerza, corrige el offset inicial del sensor de fuerza y realiza una interpolación temporal de los datos.

Para una mejor coherencia en la comparación de los datos obtenidos, especialmente en el experimento de 0 bares (estado más blando), el experimento se ha recortado cuando el eslabón 25 % blando alcanza su máxima posición. Este eslabón es el más rígido de todos, por lo que ofrece un límite de referencia útil para estudiar el comportamiento de los demás eslabones sin llegar a deformarse excesivamente. De este modo, se garantiza que los experimentos se comparan en un rango de trabajo equivalente donde su forma no se ve comprometida. Tras este recorte, los tiempos se normalizan entre 0 y 1 para una mejor comparación del comportamiento entre los distintos eslabones. El script genera automáticamente las tres gráficas y muestra por pantalla los niveles máximos de fuerza soportados por cada eslabón en el rango representado, permitiendo comparar con facilidad cómo influye el porcentaje de parte blanda y el nivel de vacío.

5.3.3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados organizados por nivel de presión.

5.3.3.1. Vacío 0 bares

El vídeo de esta parte del experimento se puede ver en el enlace de YouTube³.

² https://github.com/TanyaIT16/TFG_eslabon_rigidez_variable.git

³<https://www.youtube.com/watch?v=LxqkGA9fsPc>

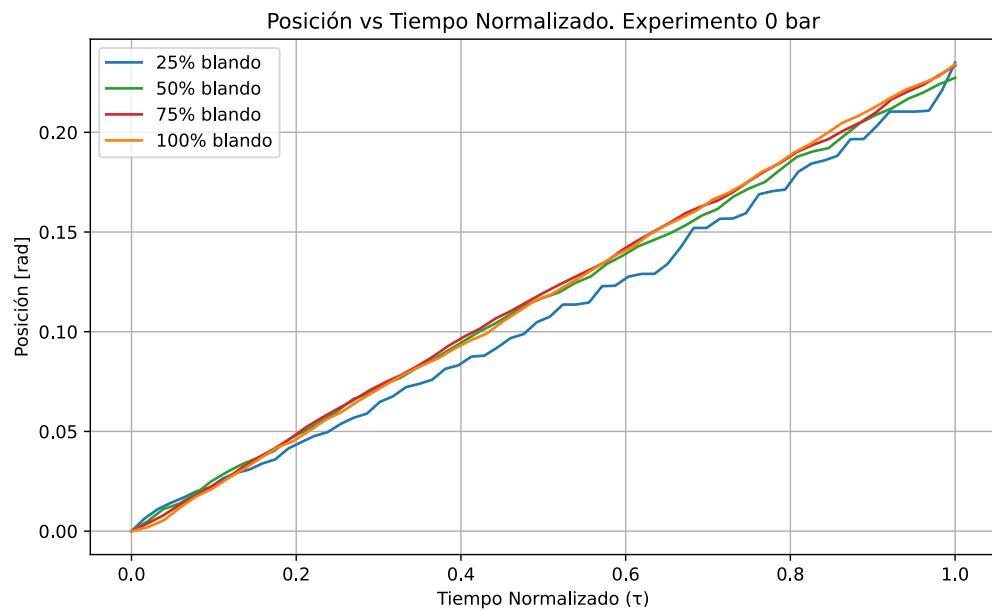


Figura 5.2: Posición Vs. Tiempo a presión de 0 bares

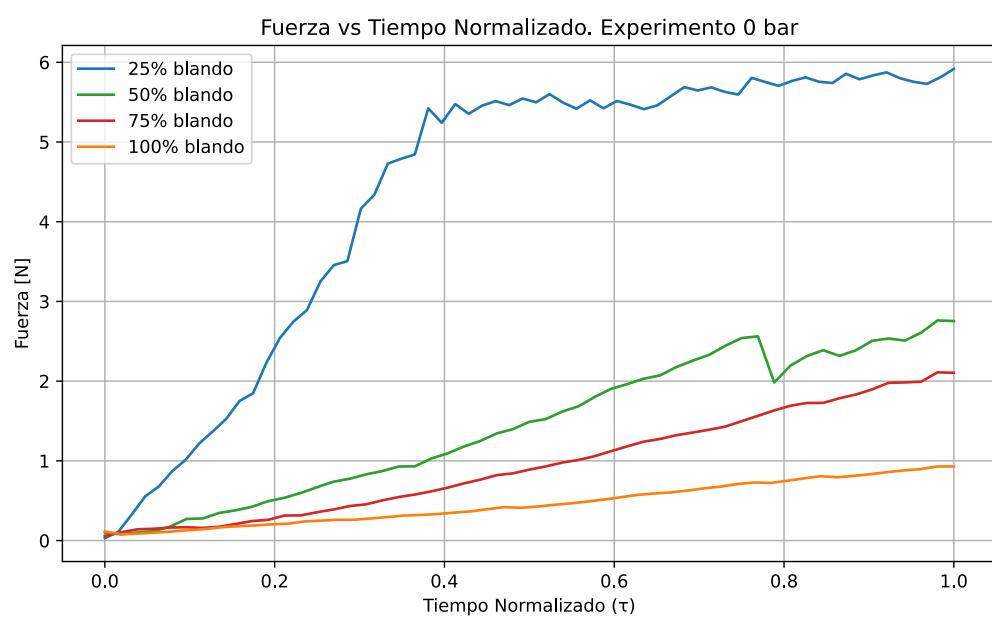


Figura 5.3: Fuerza Vs. Tiempo a presión de 0 bares

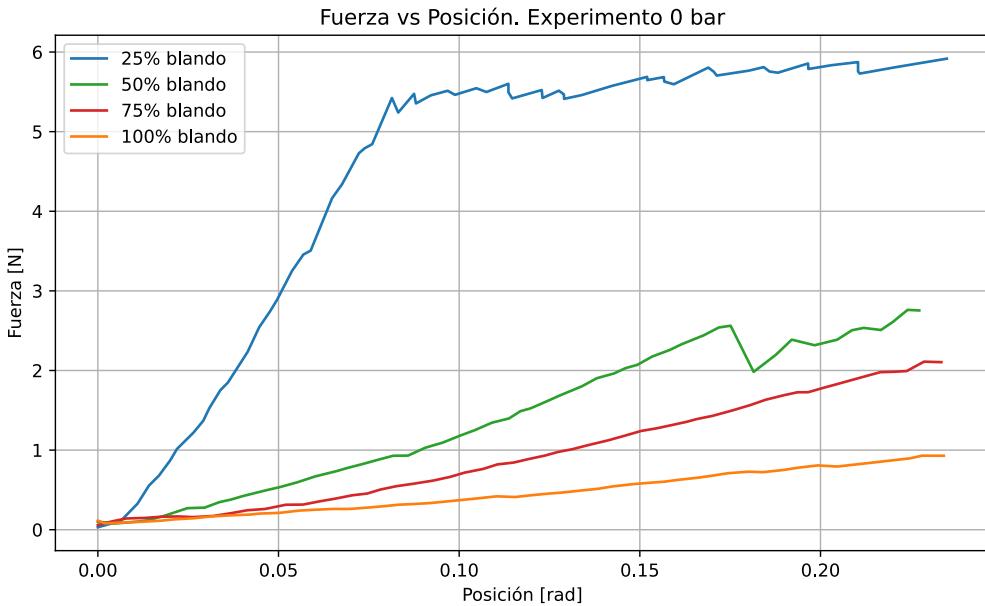


Figura 5.4: Fuerza Vs. Posición a presión de 0 bares

En la gráfica (5.2) se observa que los eslabones siguen una evolución de posición similar, aunque los son más blandos tienen trayectorias más continuas debido a su menor resistencia mecánica. A esta presión de 0 bares domina el comportamiento elástico sin efecto del “jamming”.

En las figuras 5.3 y 5.4 se aprecia que el eslabón 25 % blando es el que alcanza una mayor fuerza, con un valor de 5.92N. A medida que aumenta el porcentaje de parte blanda la fuerza máxima disminuye, siendo el eslabón 100 % el que menos fuerza alcanza, solo 0.93N.

5.3.3.2. Vacío -0.4 bares

El vídeo de esta parte del experimento se puede ver en el enlace de YouTube ⁴.

Con el aumento del nivel de vacío a -0.4 bares, ya se observa una clara transición hacia un comportamiento más rígido en los eslabones. Esto se refleja en la figura 5.5, se observa que todos los eslabones alcanzan desplazamientos angulares similares, ya que el experimento finaliza cuando el eslabón 25 % alcanza su máxima posición. Esta máxima posición es menor que la observada en la figura 5.2, lo que indica un aumento de rigidez.

Es importante señalar que, debido a la discretización temporal e interpolación

⁴<https://www.youtube.com/watch?v=E-wTZbCgTn4>

de los datos, la posición final no es exactamente la misma para todos los eslabones. Esta ligera diferencia se hace más evidente con el aumento de la rigidez, ya que las trayectorias se vuelven más escalonadas debido a la oposición al movimiento.

En fuerza máxima destacan los eslabones de 50 % y 25 % blando, con valores de 18.75N y 17.82N respectivamente. Los eslabones más blandos muestran valores de fuerza máxima similares (se ve en la figura 5.6 y en 5.7).

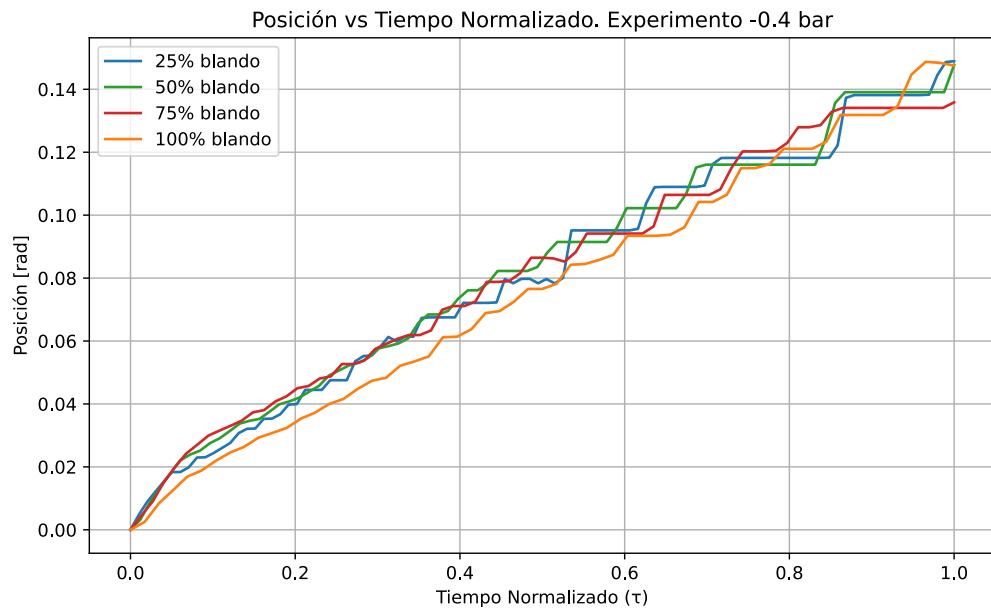


Figura 5.5: Posición Vs. Tiempo a presión de -0.4 bares

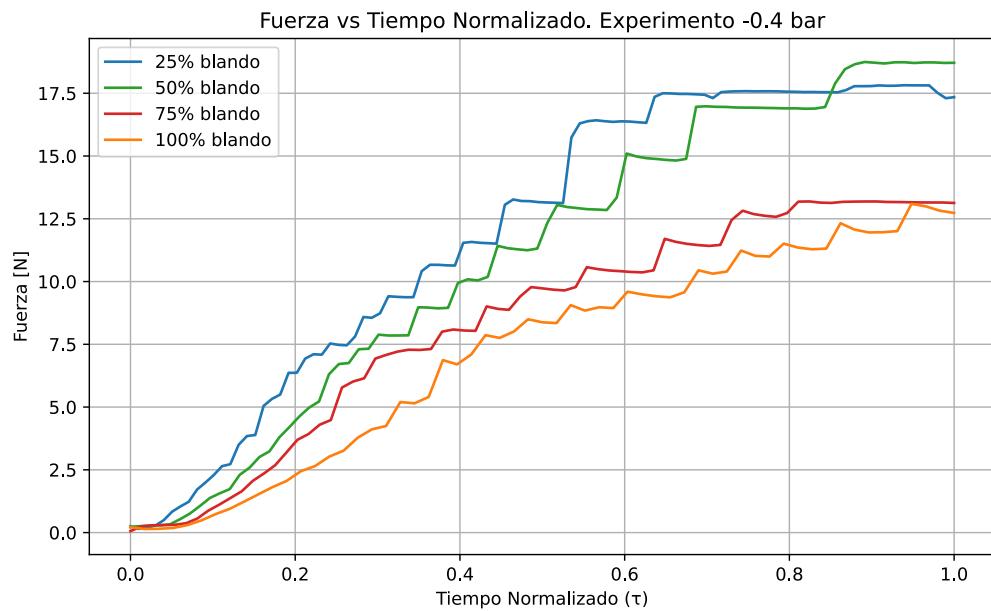


Figura 5.6: Fuerza Vs. Tiempo a presión de -0.4 bares

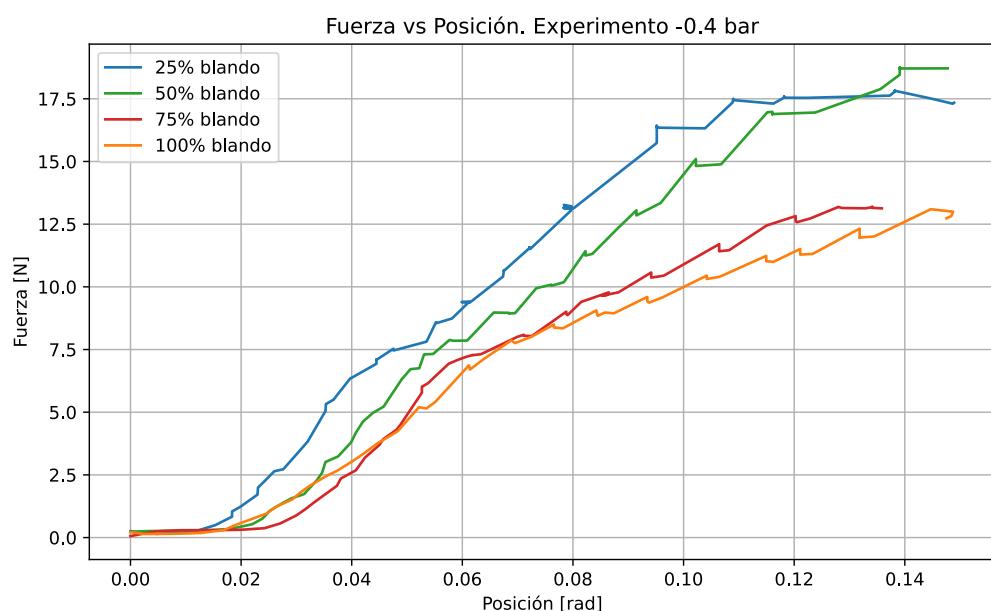


Figura 5.7: Fuerza Vs. Posición a presión de -0.4 bares

5.3.3.3. Vacío -0.9 bares

El vídeo de esta parte del experimento se puede ver en el enlace de YouTube ⁵.

A presión de -0.9 bares el efecto de “jamming” se intensifica. Las trayectorias presentan más escalones debido a la oposición al desplazamiento (se ve en la figura 5.8) y se registran valores de fuerzas máximas superiores.

El eslabón de 25 % es el más resistente a este nivel de vacío, llegando a soportar 19.6N, seguido del eslabón de 50 % blando con 18.18N. Por otro lado, aunque el eslabón de 100 % tiene una mejora significativa, solo llega a una fuerza máxima de 9.95N (se ve en las figuras 5.9 y 5.10).

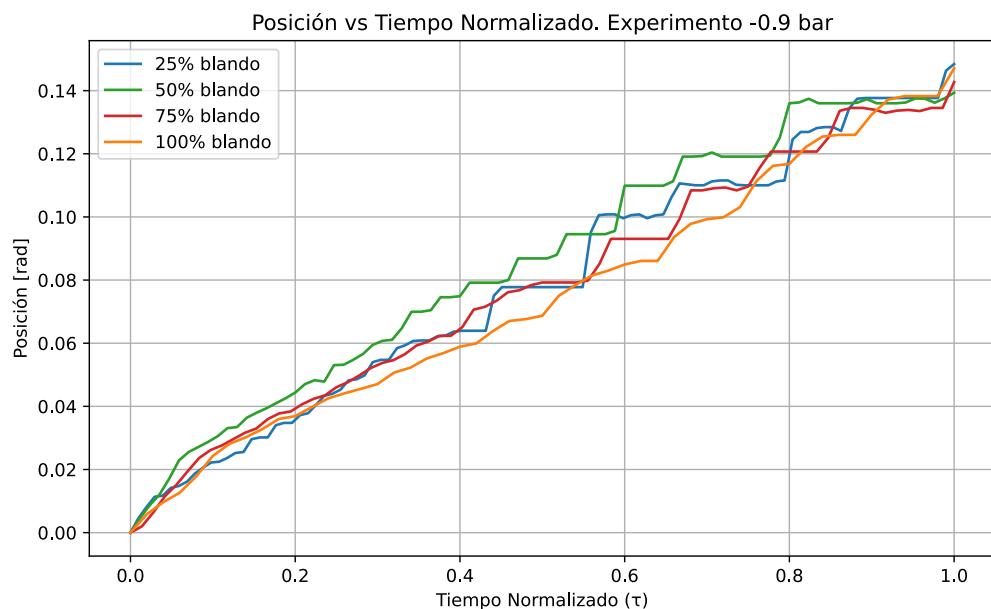


Figura 5.8: Posición Vs. Tiempo a presión de -0.9 bares

⁵<https://www.youtube.com/watch?v=LiK3LmW17gg>

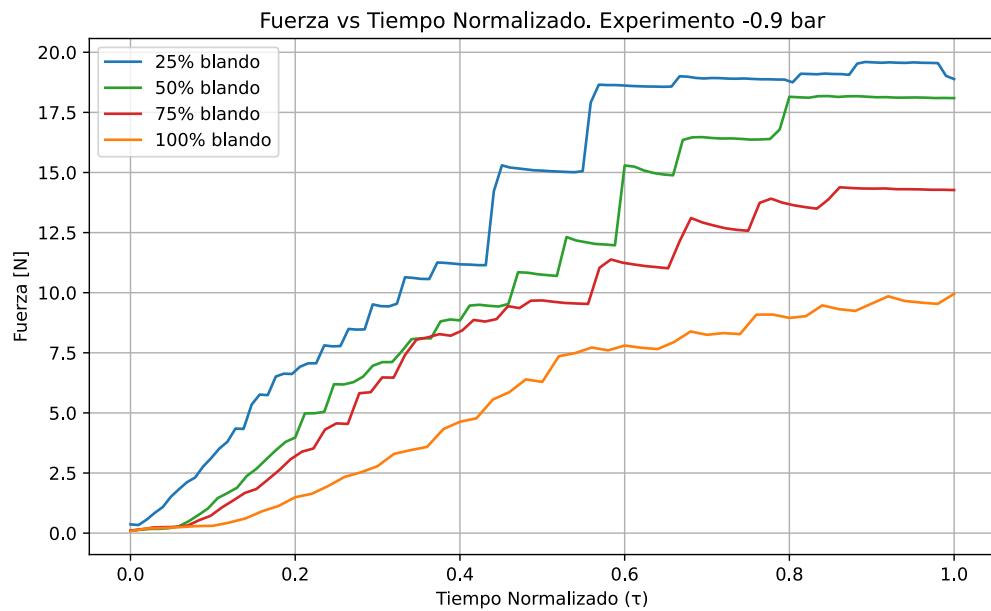


Figura 5.9: Fuerza Vs. Tiempo a presión de -0.9 bares

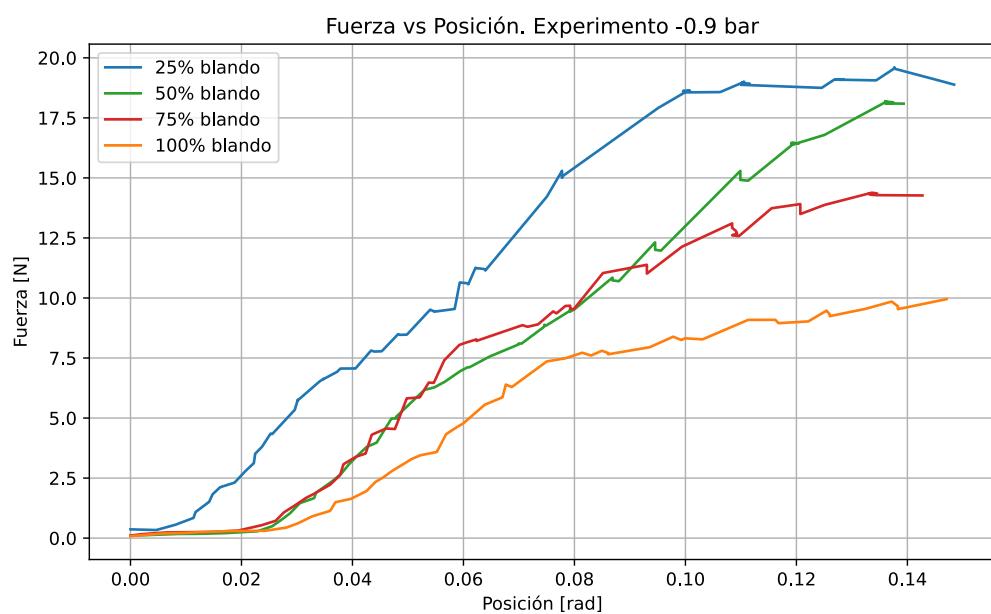


Figura 5.10: Fuerza Vs. Posición a presión de -0.9 bares

5.3.3.4. Resumen comparativo de los resultados

Se presentan en una tabla 5.2 los valores máximos de fuerza registrados en el rango útil definido por la posición máxima del eslabón 25 % blando, para ver el efecto de los distintos niveles de vacío y de las distintas proporciones de los eslabones.

Porcentaje de parte blanda (%)	0 bar (N)	-0.4 bar (N)	-0.9 bar (N)
25 %	5.92	17.82	19.6
50 %	2.76	18.75	18.18
75 %	2.11	13.19	14.39
100 %	0.93	13.10	9.95

Tabla 5.2: Fuerza máxima registrada por los eslabones de rigidez variable a distintos niveles de vacío (rango útil definido por la posición máxima del eslabón 25 % blando).

Con estos resultados se concluye que:

- El aumento de nivel de vacío da lugar a un mayor fuerza máxima resistida en los eslabones.
- El eslabón 50 % blando, combinación equilibrada de material sólido y blando, es el que muestra mejor rendimiento en el experimento a -0.4 bares, aunque el 25 % blando presenta un rango muy similar. En cambio, en el experimento a -0.9 bares, el eslabón 25 % blando es el que más destaca.
- El eslabón 100 % blando no logra transmitir eficazmente la fuerza incluso a niveles de vacío óptimos.
- Es importante destacar que los valores de fuerzas máximas aquí representados corresponden únicamente al rango útil definido. Esto implica que, en algunos casos, como en el del eslabón 100 % blando, la fuerza alcanzada a -0.4 bares puede superar a la registrada a -0.9 bares. Este comportamiento no contradice el efecto del “jamming”, sino que refleja el corte deliberado del experimento para garantizar una comparación en condiciones similares y evitar zonas donde los eslabones más blandos puedan sufrir una deformación excesiva.
- Cabe señalar que los “escalones” observados en las gráficas no corresponden necesariamente con variaciones en el comportamiento real de los eslabones. Se trata de un desplazamiento del sensor de fuerza cuando este es empujado por el eslabón. Este desplazamiento causa ligeras modificaciones en la posición del motor. Aunque la tendencia general de las gráficas es coherente, este fenómeno introduce cierta imprecisión en las curvas obtenidas.

5.4. Experimento 4: Análisis comparativo de la dinámica de los eslabones de rigidez variable con el eslabón completamente sólido

5.4.1. Objetivo

El objetivo de este experimento es determinar la resistencia a la flexión de los eslabones cuando estos se encuentran completamente rígidos (-0.9 bar), cuantificando la fuerza máxima que pueden soportar hasta alcanzar el límite de corriente del motor Dynamixel. Se compara esta capacidad con la del eslabón completamente sólido, expresándola en términos de fuerza relativa.

5.4.2. Procedimiento

Se ha realizado el mismo procedimiento que en el experimento 3 (5.3), con la única diferencia de que se ha añadido el eslabón completamente sólido, y en este caso no se ha recortado el experimento en función de la posición máxima alcanzada por el eslabón 25 % blando. Se ha hecho uso de un script de Python (el código completo está en el repositorio de GitHub⁶), que sigue la misma lógica de sincronización y normalización temporal que en el experimento anterior, pero añadiendo la representación de los datos del eslabón sólido.

Conociendo el porcentaje de parte blanda de los eslabones, se calcula el porcentaje de fuerza resistida por cada eslabón respecto a la fuerza máxima del eslabón completamente sólido.

Se ha utilizado la expresión 5.1

$$\text{Fuerza relativa} = \frac{\text{Fuerza max eslabón blando}}{\text{Fuerza max eslabón sólido}} \times 100 \% \quad (5.1)$$

5.4.3. Resultados

El vídeo de esta parte del experimento se puede ver en el enlace de YouTube.

En la figura 5.11 se observa que el eslabón completamente sólido presenta el

⁶https://github.com/TanyaIT16/TFG_eslabon_rigidez_variable.git

menor desplazamiento angular, como es esperable debido a su rigidez. A diferencia del Experimento 3 (5.3), al no recortar la trayectoria de los eslabones a una posición común, se visualiza qué eslabones logran una posición angular distinta entre ellos. Se aprecia que los eslabones más blandos alcanzan mayores posiciones.

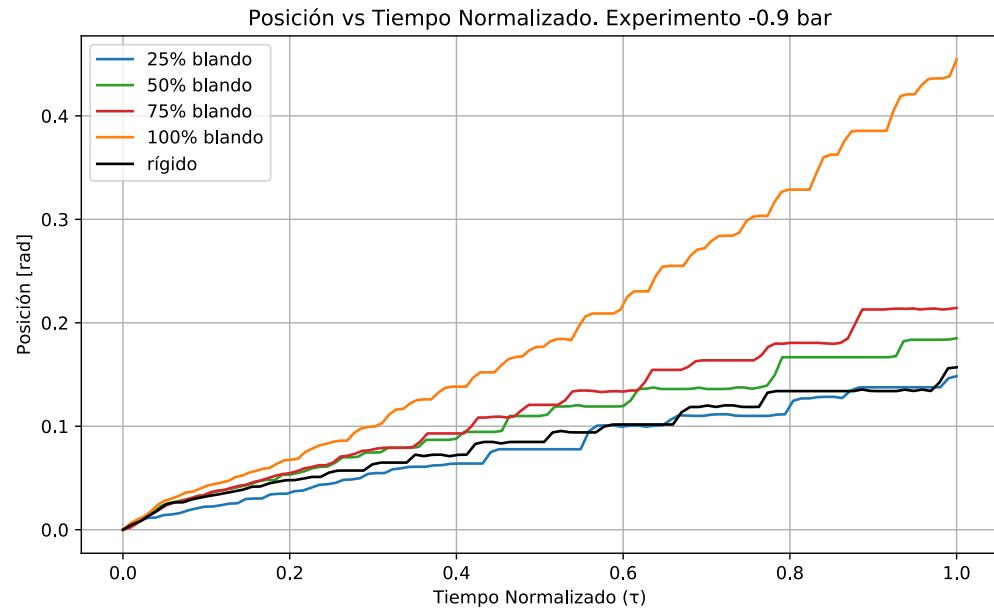


Figura 5.11: Posición Vs. Tiempo a presión de -0.9 bares

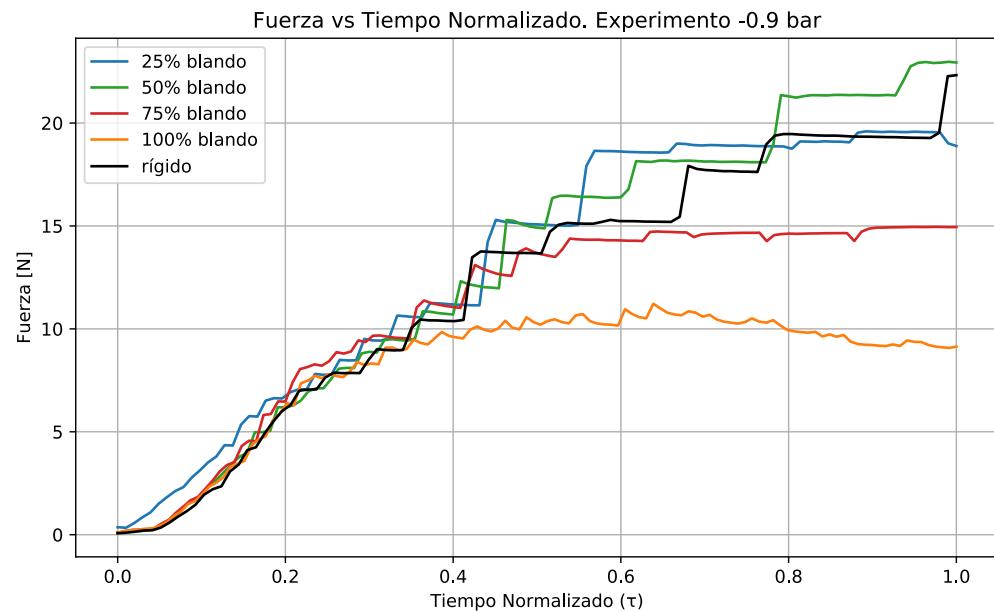


Figura 5.12: Fuerza Vs. Tiempo a presión de -0.9 bares

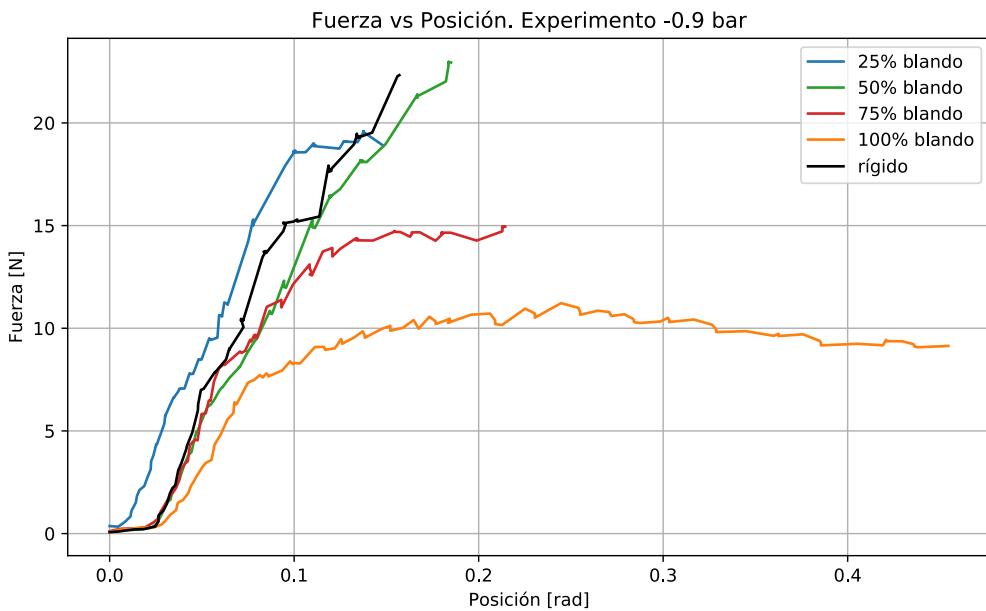


Figura 5.13: Fuerza Vs. Posición a presión de -0.9 bares

En las figuras 5.12 y 5.13 se aprecia que el eslabón de 50 % alcanza una fuerza máxima de 22.97N, superando ligeramente al completamente sólido que llega a 22.33N.

En la tabla 5.3 se muestran los valores calculados con la expresión 5.1. Destaca el eslabón 50 % blando, que alcanza una fuerza relativa respecto al sólido de 102.9 %. Este fenómeno puede atribuirse a una combinación óptima de su estructura rígido-blanda, permitiendo una transmisión de fuerza eficiente. Cabe mencionar que este valor, debe interpretarse con cautela, ya que puede estar influido por posibles imprecisiones en el entorno experimental, como el leve desplazamiento del sensor de fuerza descrito anteriormente.

Eslabón Rígido-Blando (% blando)	Fuerza relativa (%)
25 %	87.8 %
50 %	102.9 %
75 %	67.0 %
100 %	50.2 %

Tabla 5.3: Fuerza relativa de los eslabones de rigidez variable calculada respecto al eslabón completamente sólido

Capítulo 6

Conclusiones y Líneas Futuras

6.1. Conclusiones

En este Trabajo de Fin de Grado se ha demostrado la efectividad del uso de eslabones de rigidez variable basados en “jamming” como una alternativa a las convencionales estructuras completamente sólidas. Se ha realizado el diseño, fabricación de los eslabones y se han sometido a análisis experimentales, evaluando su comportamiento a distintos niveles de presión y porcentaje de parte blanda.

Los resultados muestran que, aplicando “jamming”, los eslabones de rigidez variable son capaces de adquirir un comportamiento muy similar a un eslabón completamente sólido, soportando cargas significativas. Particularmente, el eslabón 50 % blando ha alcanzado, en las condiciones del montaje experimental empleado, valores de fuerza máximos ligeramente superiores a los del eslabón sólido de referencia (Experimento 4 5.4). Este comportamiento puede deberse al diseño equilibrado del eslabón y a la gran capacidad de compactación del material granular. No obstante, es importante señalar que estas mediciones se producen en el entorno de saturación del motor (límite de corriente), donde pueden aparecer pequeñas desviaciones o resultados no del todo representativos. Por ello, aunque en este caso el eslabón 50 % blando puede considerarse comparable al completamente sólido, esta equivalencia debe interpretarse con cautela. En los experimentos con recorte de posición (Experimento 3 5.3), tanto el eslabón de 50 % como el de 25 % muestran un gran rendimiento. Esto pone en manifiesto el potencial de un diseño equilibrado entre material blando y sólido, y su gran capacidad de compactación. Además, este comportamiento también podría estar influido ligeramente por las variaciones en la fabricación o por imprecisiones experimentales, como por ejemplo el desplazamiento del sensor de fuerza.

Se ha observado también que el porcentaje de material blando influye de manera

notable en la capacidad de carga. Los eslabones con porcentajes altos de material blando, como el 100 % blando, presentan menor rigidez incluso a niveles máximos de vacío. Esta menor rigidez no implica necesariamente un comportamiento negativo, puede ser deseable en aplicaciones donde se priorice la flexibilidad o la adaptabilidad frente a la capacidad de carga.

Se han visto diferencias en los tiempos de vacío y evacuación de este. La evacuación se produce con mayor lentitud que su aplicación, especialmente en los eslabones que constan de mayor porcentaje de material granular. Se cree que esto podría deberse a la dificultad de reingreso del aire debido a la fuerte compactación del material, aunque esta hipótesis requeriría un análisis más detallado para confirmarse.

Por otro lado, se ha demostrado que los eslabones con menos material granular responden con mayor rapidez a la aplicación de vacío, compactándose más rápidamente. Esto puede ser ventajoso en sistemas donde se requiera una mayor velocidad de actuación.

En conclusión, los resultados obtenidos confirman la viabilidad del uso de componentes de rigidez variable bien diseñados, manteniendo la funcionalidad del sistema y añadiendo la capacidad de adaptación y control de rigidez mediante la aplicación de distintos niveles de vacío. Si la técnica de “granular jamming” se aplica de manera adecuada, es una solución interesante para entornos donde se requiera una variabilidad estructural sin renunciar a la capacidad de resistir fuerzas.

6.2. Líneas Futuras

Tras estudiar los resultados obtenidos y observar las limitaciones durante el desarrollo del trabajo, se proponen las siguientes posibles líneas de mejora y ampliación para futuros proyectos:

- **Control de corriente de las válvulas:** actualmente las válvulas se controlan con los relés, pudiendo estar totalmente abiertas o totalmente cerradas (control todo o nada), sin posibilidad de modular el flujo de vacío. Las válvulas utilizadas, PVQ31, permiten control por corriente, se propone implementar un sistema de control mediante el uso de transistores MOSFET que actúe como un interruptor o regulador, controlando la señal eléctrica de su puerta, y controladores PWM. Con esto se ajustaría de manera dinámica la rigidez del eslabón.
- **Comprimir el tamaño del sistema electroneumático:** reducir el volumen del circuito permitiría integrar el sistema entre los eslabones de rigidez variable. Esto abre la puerta al desarrollo de mecanismos articulados como brazos

robóticos o dedos blandos, explorando su potencial adaptativo.

- **Repetición y robustez estadística de los experimentos:** los resultados de los experimentos son coherentes, pero es interesante repetir las pruebas múltiples veces, para poder analizar la variabilidad y robustez del sistema más detalladamente. Esto permitiría representar gráficas con bandas de incertidumbre y calcular la desviación típica, aumentando la validez experimental.
- **Modelado del comportamiento dinámico:** con un mayor volumen de datos experimentales, sería posible aplicar técnicas de identificación de sistemas para generar modelos que describan los comportamientos dinámicos de los eslabones. Con estos modelos se podría predecir la respuesta del sistema ante distintas entradas.
- **Mejora del montaje experimental:** aunque la tendencia de las gráficas es correcta y corresponde, en su mayoría, con el comportamiento esperado, el hecho de que se mueva el sensor de fuerzas hace que los resultados no tengan fiabilidad total. En futuros trabajos en los que se pretenda caracterizar fielmente el comportamiento de los eslabones debería mejorarse el entorno experimental para evitar este fenómeno.

Bibliografía

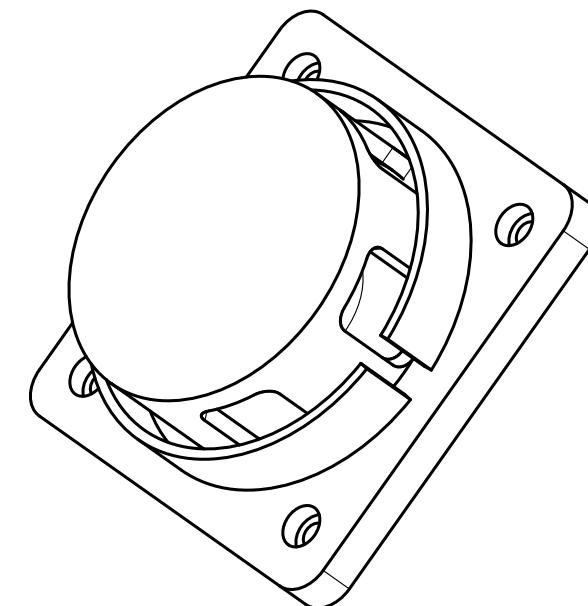
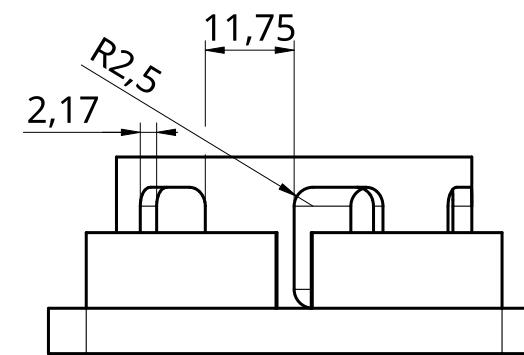
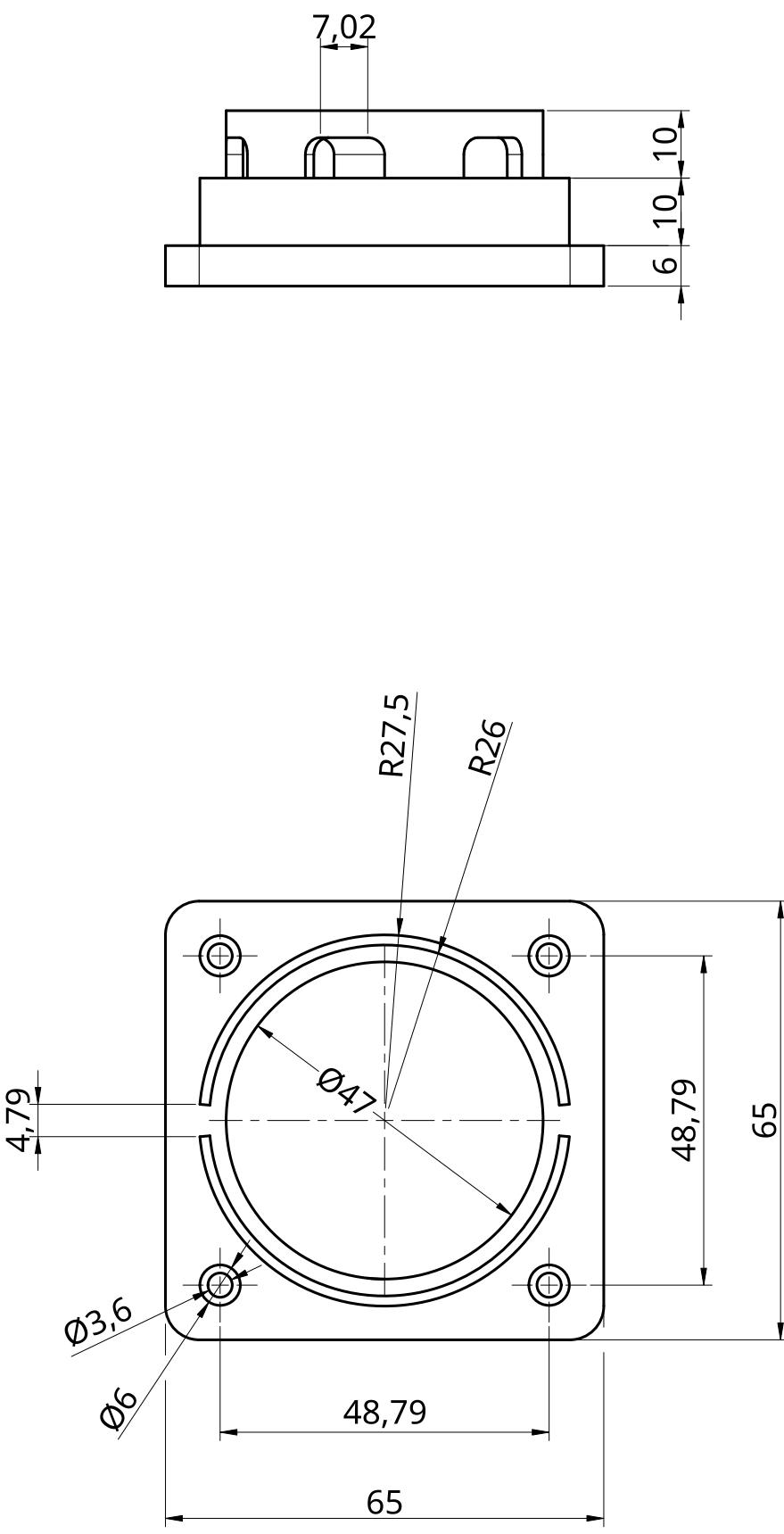
- [1] E. I. Sulimma, “Análisis experimental de eslabones de rigidez variable basados en jamming para manipuladores robóticos,” Ph.D. dissertation, Universidad de Málaga, Escuela de Ingenierías Industriales, Málaga, España, 2024.
- [2] M. T. Daniela L.Rus, “Design, fabrication and control of soft robots,” *ResearchGate*, pp. 467–75, 2015.
- [3] N. E. Steltz, J. rembisz and H. Jaeger, “Jamming as an enabling technology for soft robotics,” *The university of Chicago*, 2010.
- [4] D. o. R. Ritsumeikan University, “Particle jamming structure,” https://www.br.ci.ritsumei.ac.jp/particle_eng.html, 2025.
- [5] Wikipedia contributors, “Jamming (physics),” [https://en.wikipedia.org/wiki/Jamming_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Jamming_(physics)), 2025.
- [6] C. S. O’Hern, L. E. Silbert, A. J. Liu, and S. R. Nagel, “Jamming at zero temperature and zero applied stress: The epitome of disorder,” *Physical Review E*, 2003.
- [7] SlidePlayer, “Jamming transition - mechanical response of granular media,” <https://slideplayer.com/slide/13525778/>, 2025.
- [8] B. Aktaş, Y. S. Narang, N. Vasios, K. Bertoldi, and R. D. Howe, “A modeling framework for jamming structures,” *Advanced Functional Materials*, vol. 31, no. 16, p. 2007554, 2021.
- [9] C. M. Lab, “Jamming gripper,” <https://www.creativemachineslab.com/jamming-gripper.html>, 2025.
- [10] Festo, “Bionicsoftarm – a pneumatic lightweight robot with natural movements,” https://www.festo.com/us/en/e/about-festo/research-and-development/bionic-learning-network/highlights-from-2015-to-2017/bionicsoftarm-id_68209/, 2017.
- [11] D. Trivedi, C. D. Rahn, W. M. Kier, and I. D. Walker, “Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research,” *Applied Bionics and Biomechanics*, vol. 5, pp. 99–117, 2008.

- [12] M. TERRILE, “Soft robotics: applications, design and control,” Ph.D. dissertation, Universidad politécnica de Madrid, Madrid, Spain, 2021.
- [13] Wikipedia contributors, “Módulo de young,” https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%B3dulo_de_Young, 2025.
- [14] D. Rus and M. T. Tolley, “Soft robotics: A perspective—current trends and prospects for the future,” *Soft Robotics*, vol. 2, pp. 136–139, 2014.
- [15] L. C. Ang Chen, Ruixue Yin and C. Yuan, “Soft robotics: Definition and research issues,” *ResearchGate*, 2017.
- [16] Y. T. Takuya Umedachi, Yasuhiro Nishioka and A. Ishiguro, “A branch-crawling, caterpillar-inspired, soft robot,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 35, pp. 1053–1067, 2016.
- [17] E. D. Shixin Mao, S. Zhang, M. Xu, and J. Yang, “A new soft bionic starfish robot with multi-gaits,” in *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2013, pp. 1884–1889.
- [18] TechCrunch, “Soft robotics grippers,” <https://techcrunch.com/2017/04/01/soft-robotics-grippers/>, 2017.
- [19] H. B. Lab, “Soft robotics,” <https://biodesign.seas.harvard.edu/soft-robotics>, 2025.
- [20] H. SEAS, “Soft robot helps the heart beat,” <https://seas.harvard.edu/news/2017/01/soft-robot-helps-heart-beat>, 2017.
- [21] E. Brown, N. Rodenberg, J. Amend, A. Mozeika, E. Steltz, M. R. Zakin, H. Lipson, and H. M. Jaeger, “Universal robotic gripper based on the jamming of granular material,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010.
- [22] N. Cheng, J. Amend, T. Farrell, D. Latour, C. Martinez, J. Johansson, A. McNicoll, M. Wartenberg, S. Naseef, W. Hanson, and W. Culley, “Prosthetic jamming terminal device: A case study of untethered soft robotics,” *Soft Robotics*, 2016.
- [23] Y.-J. Kim, S. Cheng, S. Kim, and K. Iagnemma, “Design of a tubular snake-like manipulator with stiffening capability by layer jamming,” in *2012 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*. IEEE, 2012, pp. 4251–4256.
- [24] F. Caro and M. G. Carmichael, “A review of mechanisms to vary the stiffness of laminar jamming structures and their applications in robotics,” *Actuators*, 2024.
- [25] Wikipedia contributors, “Onshape,” <https://en.wikipedia.org/wiki/Onshape>, 2025.

- [26] E. Systems, “Esp32-wroom-32 datasheet,” https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf, 2023.
- [27] Wikipedia, “Visual studio code,” https://es.wikipedia.org/wiki/Visual_Studio_Code, 2025.
- [28] W. A. IDE), “Arduino ide,” https://es.wikipedia.org/wiki/Arduino_IDE, 2025.
- [29] W. R. O. System), “Robot operating system,” https://es.wikipedia.org/wiki/Robot_Operating_System, 2025.
- [30] Smooth-On, Inc., “Ecoflex™ 00-10 - super soft silicone rubber,” <https://www.smooth-on.com/products/ecoflex-00-10/>, 2025.
- [31] 3DALIA, “Escala de dureza shore: ¿qué es y cómo se mide?” <https://3dalia.com/escala-de-dureza-shore/>, 2025.
- [32] M. R. Technologies, “Ease release 200 - mold release agent,” <https://www.mann-release.com/products/ease-release/200/>, 2025.
- [33] Sinbo, “Manual de usuario de la báscula digital sinbo sks-4520,” <https://www.manual.bo/sinbo/sks-4520/manual?p=3>, 2025.
- [34] S. Corporation, “Pvq series - proportional valve datasheet,” https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/C300/SMC-PVQ_EUS70-33A_EN.pdf, 2025.
- [35] TechyDIY, “Opto-isolated dual relay module for arduino,” <http://www.techydiy.org/opto-isolated-dual-relay-module-arduino/>, 2025.
- [36] WIKA, “Sensor de presión wika a-10 - hoja técnica,” https://www.wika.com/media/Data-sheets/Pressure/Pressure-sensors/ds_pe8160_es_es.pdf, 2025.
- [37] ROBOTIS, “Dynamixel xm430-w350-r,” <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xm430-w350/>, 2025.
- [38] R. E. Dynamixel, “Dynamixel u2d2,” https://www.reichelt.com/es/es/shop/producto/dynamixel_u2d2-263256, 2025.
- [39] R. Elektronik, “Dynamixel u2d2 power hub,” https://www.reichelt.com/es/es/shop/producto/dynamixel_u2d2_power_hub-263262, 2025.
- [40] V. R. Suero, “Control adaptativo de un manipulador paralelo ligero de tres grados de libertad,” Ph.D. dissertation, Universidad de Málaga, Escuela de Ingenierías Industriales, Málaga, España, 2024.

6 5 4 3 2 1

D



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED,
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS

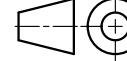
ANGULAR $\pm \circ$

SURFACE FINISH \checkmark

DO NOT SCALE DRAWING

BREAK ALL SHARP EDGES AND
REMOVE BURRS

FIRST ANGLE PROJECTION



NAME SIGNATURE DATE

DRAWN TANYA ILIEVA TIMOVA 2025-06-01

CHECKED

APPROVED

TITLE

Parte superior eslabones sólido-blandos

SIZE A3 DWG NO. 1 REV.

SCALE 1:1 WEIGHT

1 of 17 SHEET

6 5 4 3 2 1

A

D

C

C

B

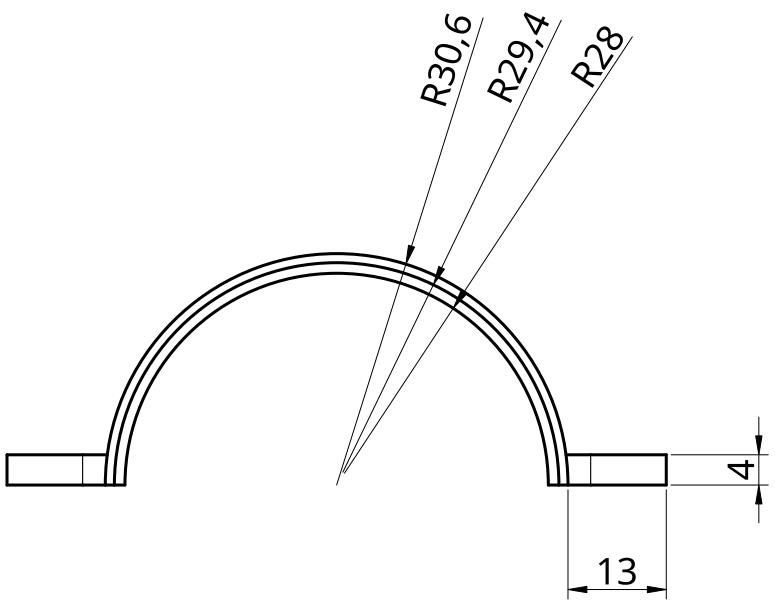
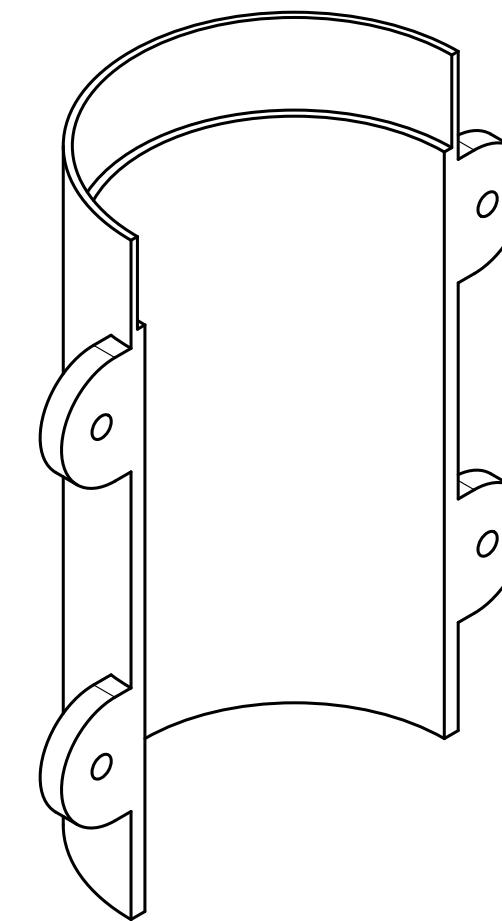
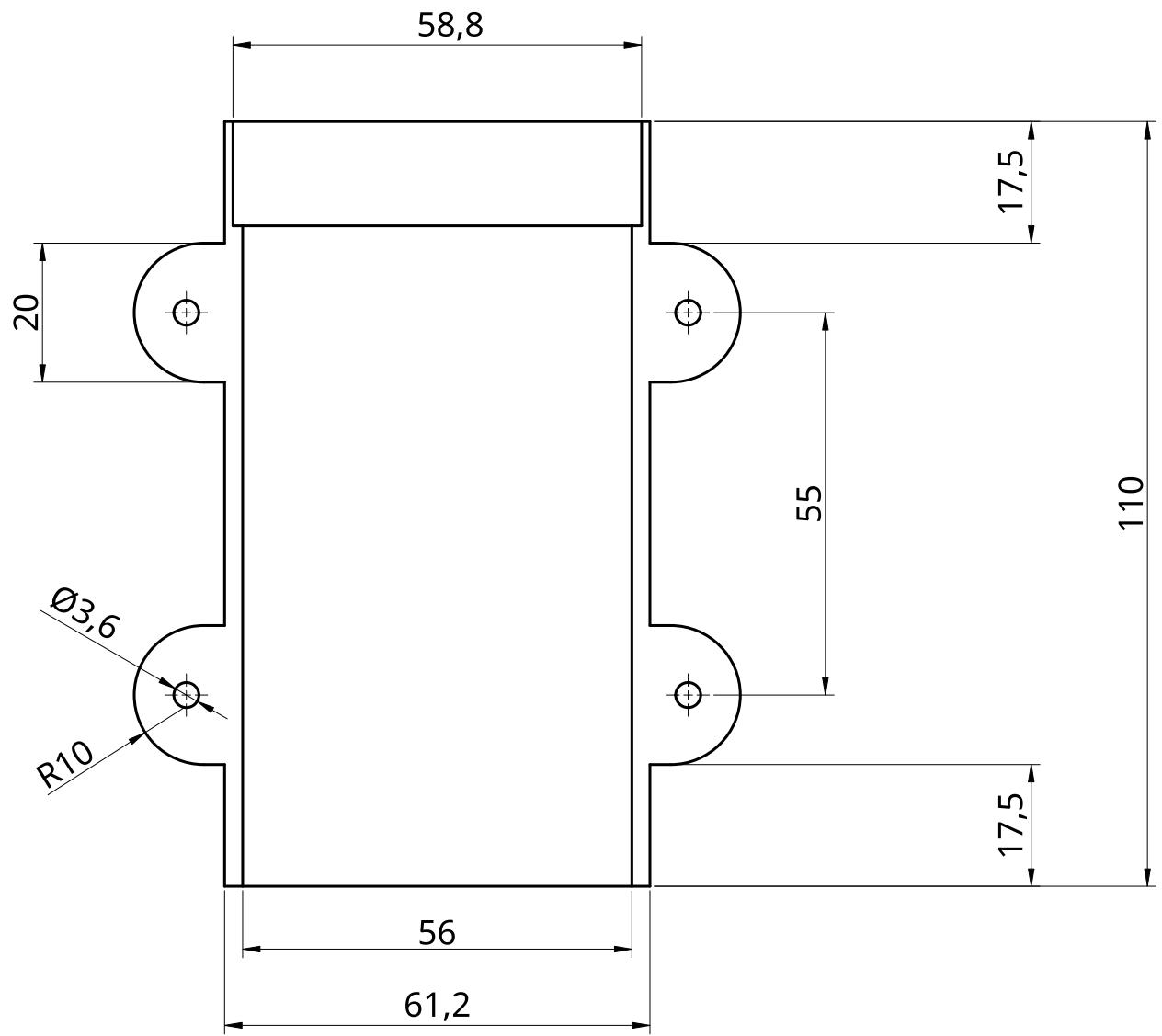
B

A

A

6 5 4 3 2 1

D

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED,
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS

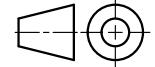
ANGULAR = ± °

SURFACE FINISH ✓

DO NOT SCALE DRAWING

BREAK ALL SHARP EDGES AND
REMOVE BURRS

FIRST ANGLE PROJECTION



DRAWN

CHECKED

APPROVED

NAME

SIGNATURE

DATE

2025-06-01

TITLE

Molde segunda fase de fabricación

SIZE

A3

DWG NO.

2

REV.

SCALE

1:1

WEIGHT

SHEET

2 of 17

6 5 4 3 2 1

D

C

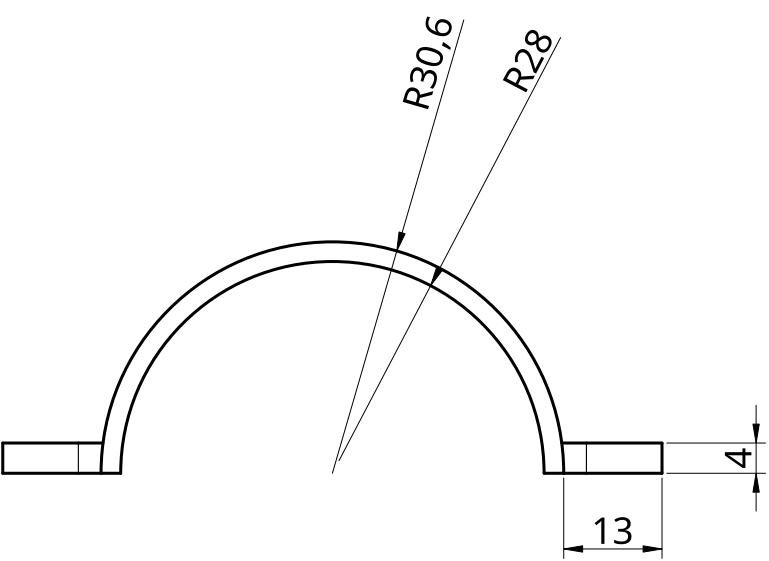
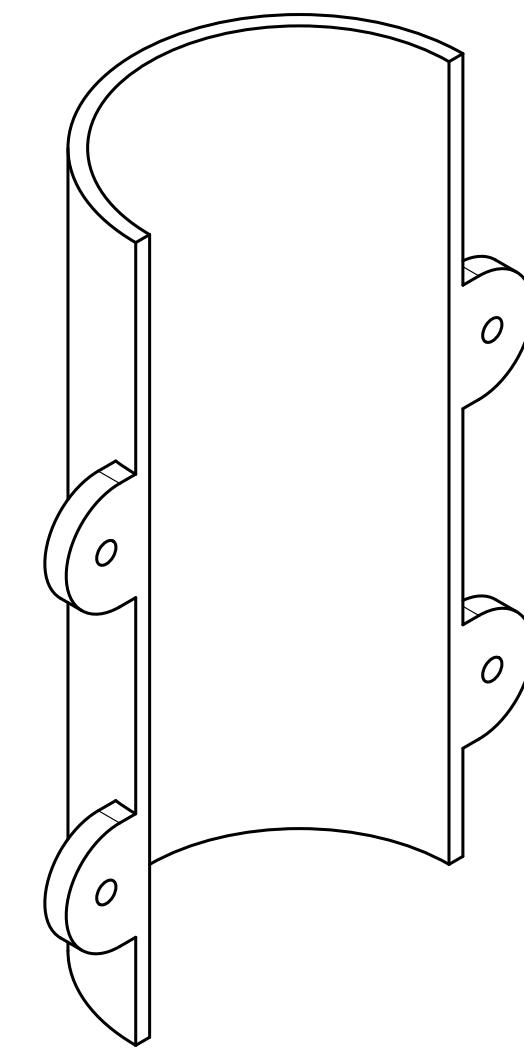
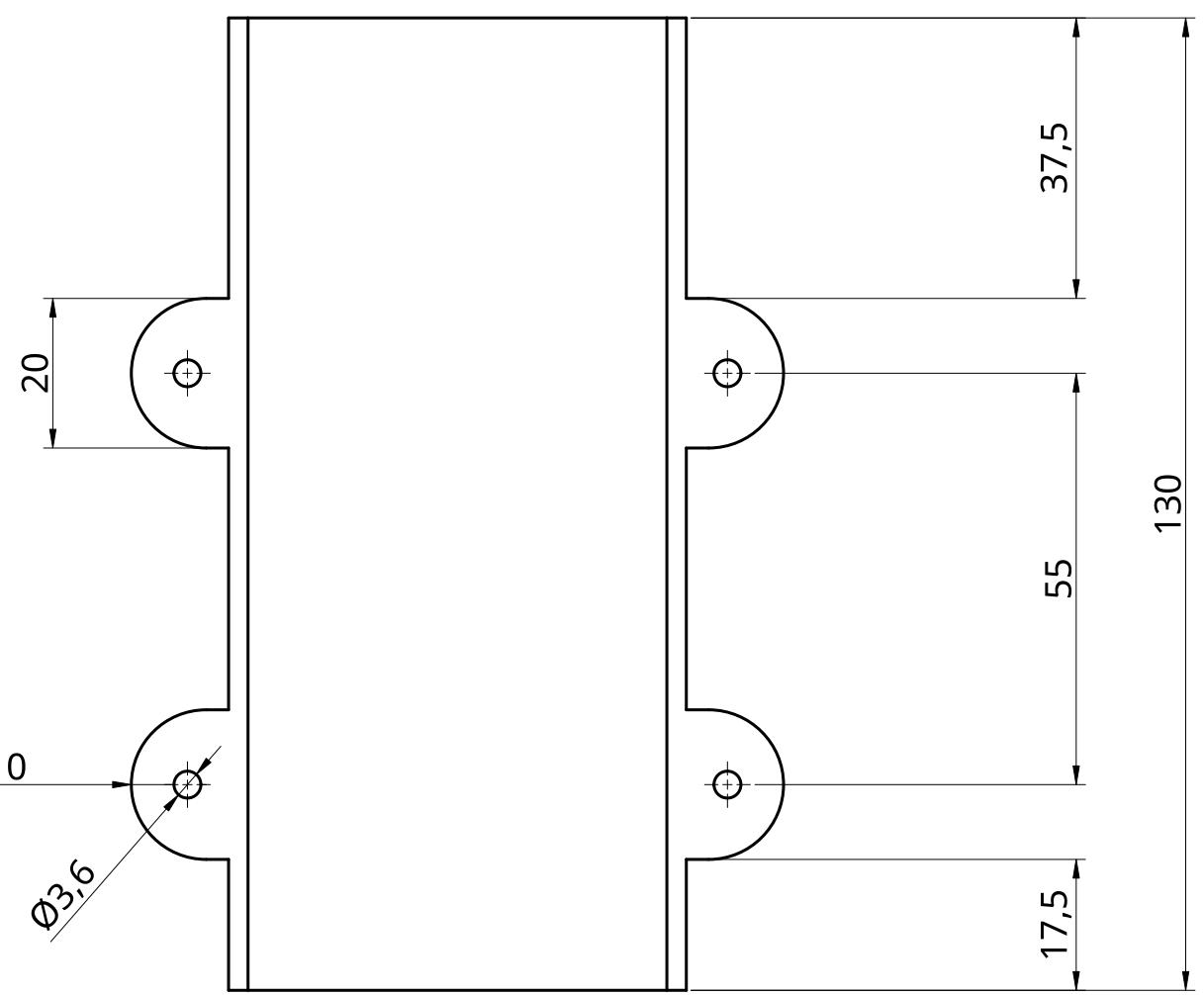
B

A

1

6 5 4 3 2 1

D

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED,
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERSANGULAR = \pm °

SURFACE FINISH ✓

DO NOT SCALE DRAWING

BREAK ALL SHARP EDGES AND
REMOVE BURRS

FIRST ANGLE PROJECTION



NAME

SIGNATURE

DATE

DRAWN

TANYA ILIEVA TIMOVA

2025-06-01

CHECKED

APPROVED

TITLE

Molde tercera fase de fabricación

SIZE

A3

DWG NO.

3

REV.

SCALE

1:1

WEIGHT

SHEET

3 of 17

6 5 4 3 2 1

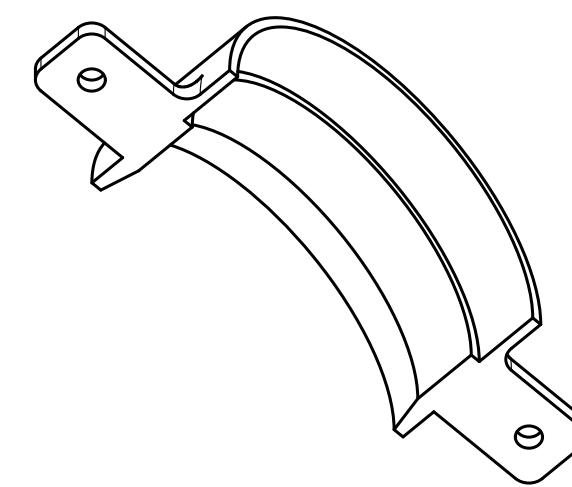
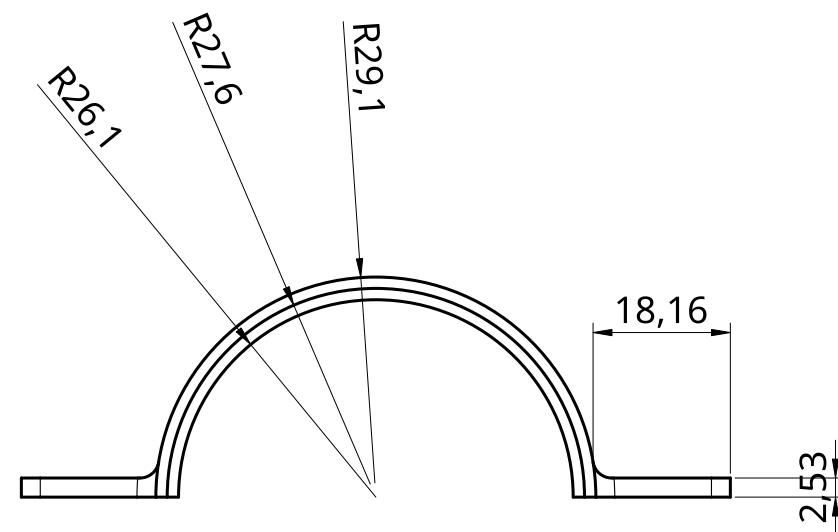
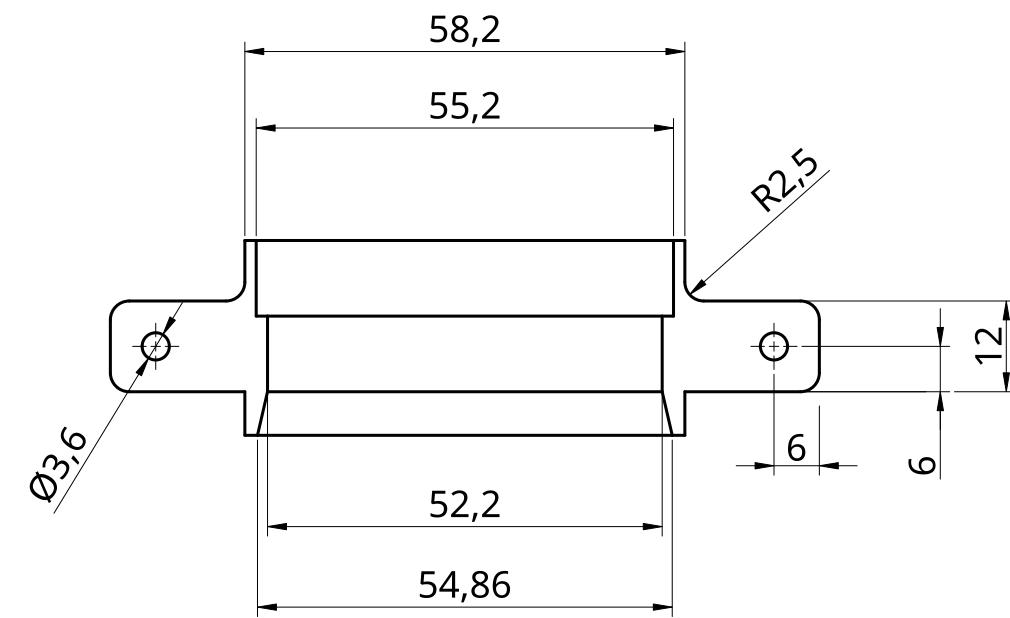
3

2

1

6 5 4 3 2 1

D



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS					
ANGULAR = \pm °		DRAWN	TANYA ILIEVA TIMOVA	SIGNATURE	DATE
SURFACE FINISH ✓					2025-06-01
DO NOT SCALE DRAWING		CHECKED			
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS		APPROVED			
FIRST ANGLE PROJECTION	MATERIAL	FINISH			
TITLE		Casquillo parte superior de los eslabones y parte inferior del eslabón 100% blando			
SIZE	DWG NO.	4			REV.
A3					
SCALE	1:1	WEIGHT			SHEET
					4 of 17

6 5 4 3 2 1

D

D

C

C

B

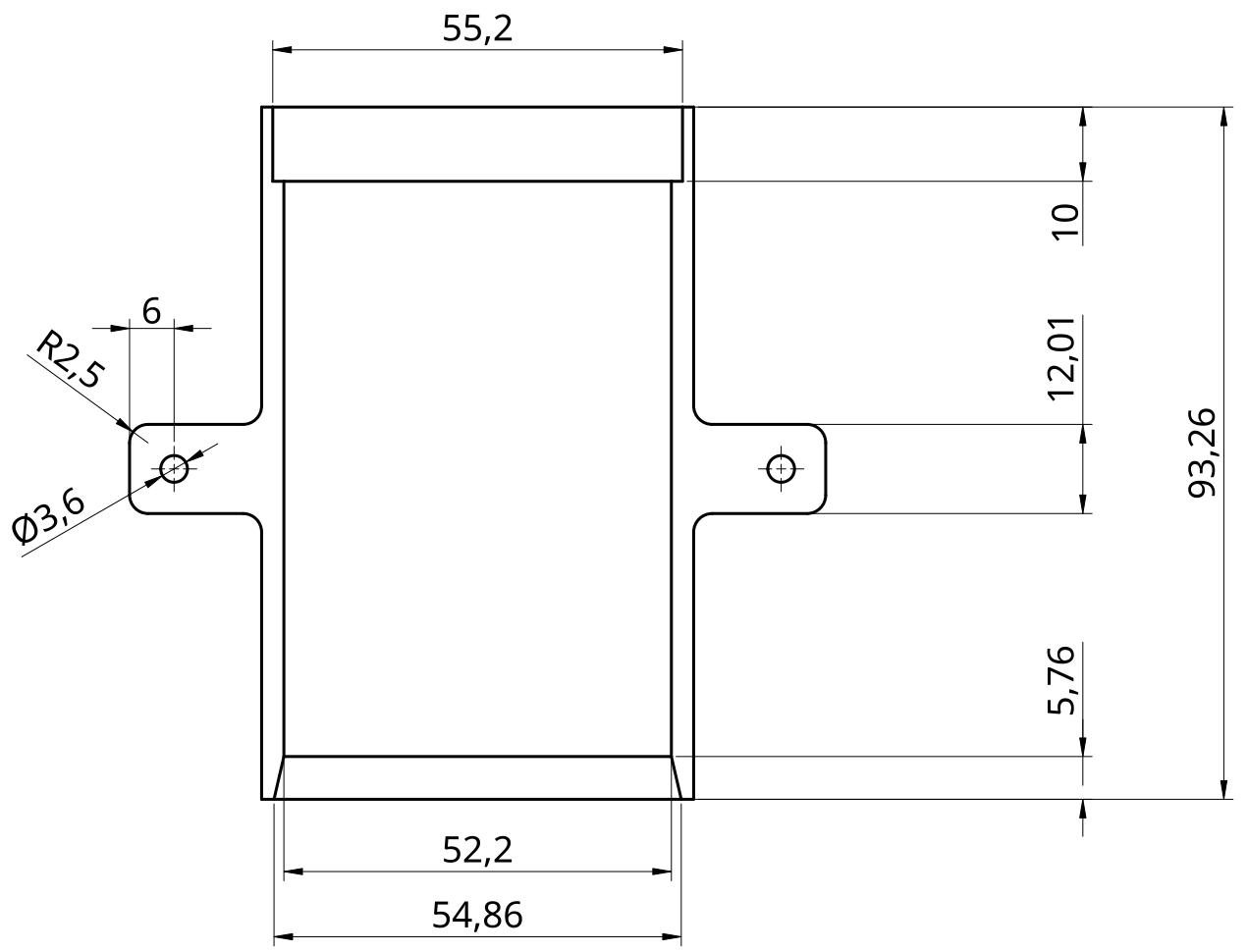
B

A

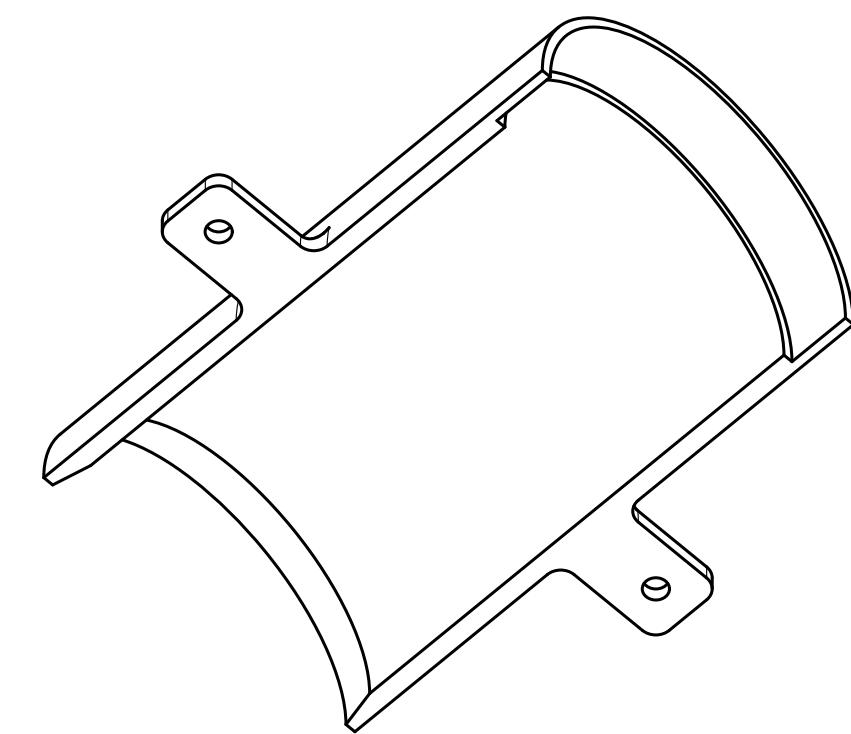
A

6 5 4 3 2 1

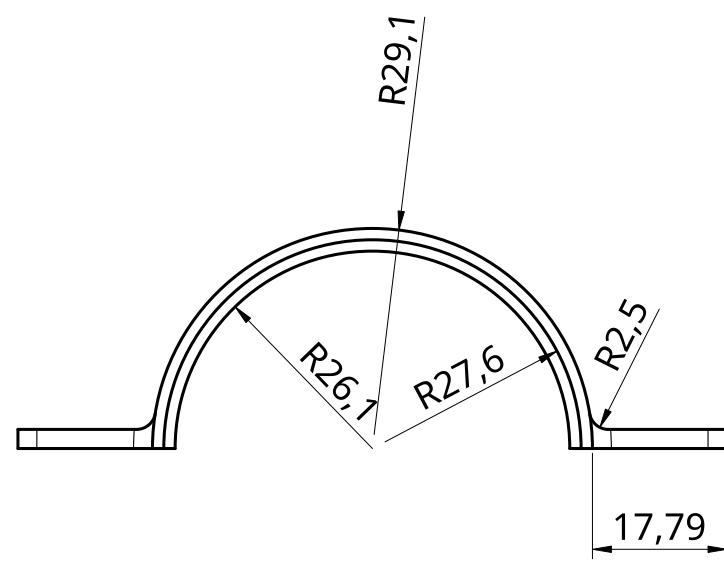
D



C



B



A

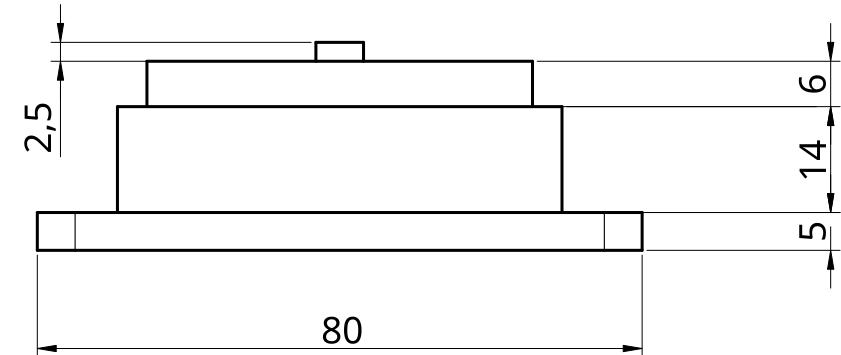
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		DRAWN ANGULAR = \pm °	NAME TANYA ILIEVA TIMOVA	SIGNATURE	DATE 2025-06-01	TITLE Casquillo parte inferior eslabón 25% blando			
SURFACE FINISH	✓								
DO NOT SCALE DRAWING									
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS									
FIRST ANGLE PROJECTION		MATERIAL	FINISH	SIZE A3		DWG NO. 5			
SCALE 1:1		WEIGHT		REV.		SHEET 5 of 17			

6 5 4 3 2 1

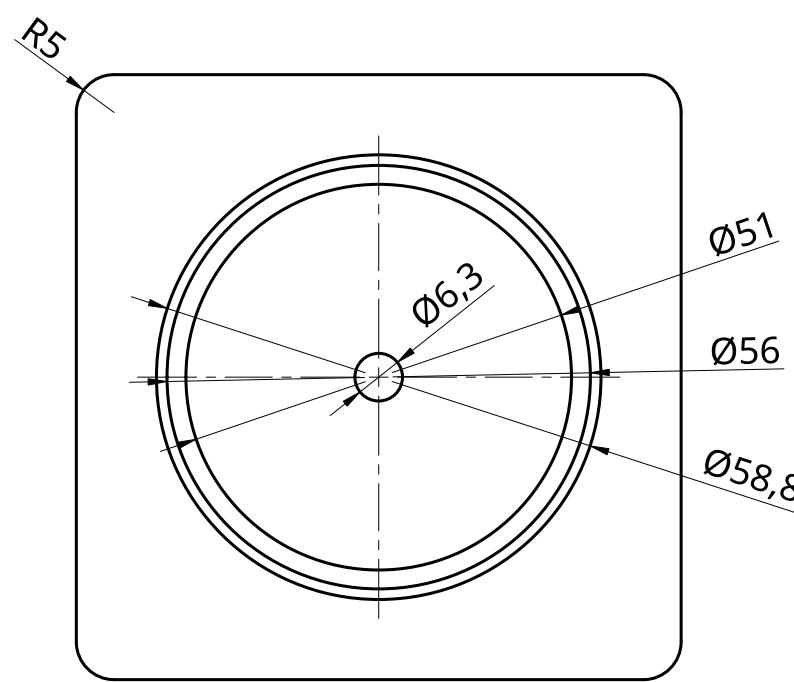
A

6 5 4 3 2 1

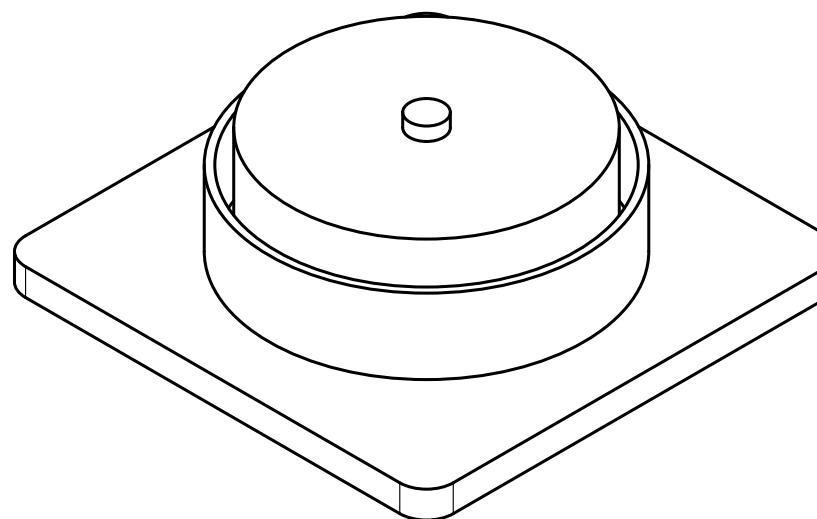
D



C



A



D

B

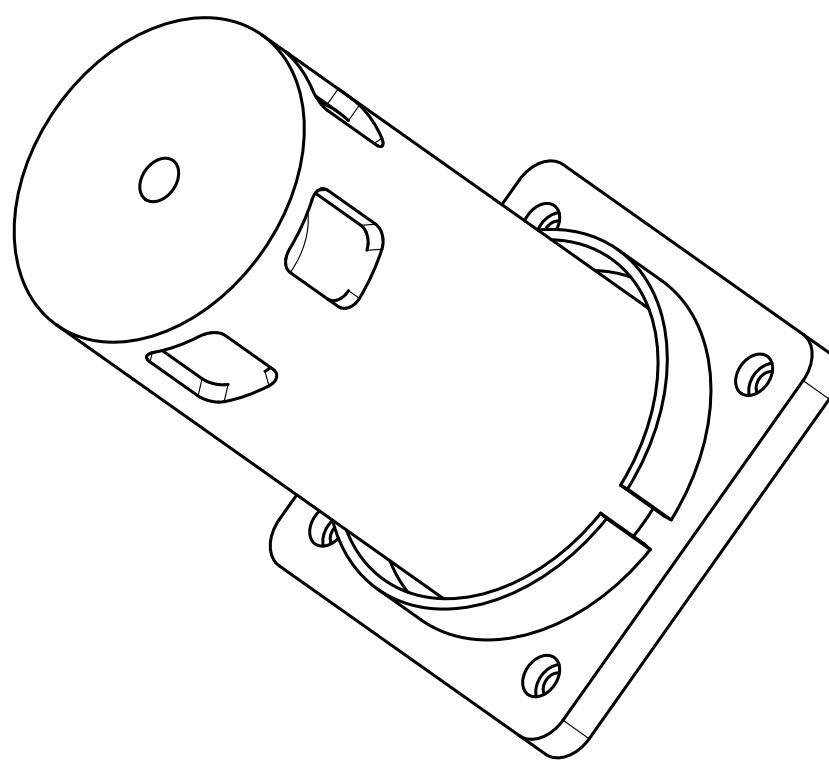
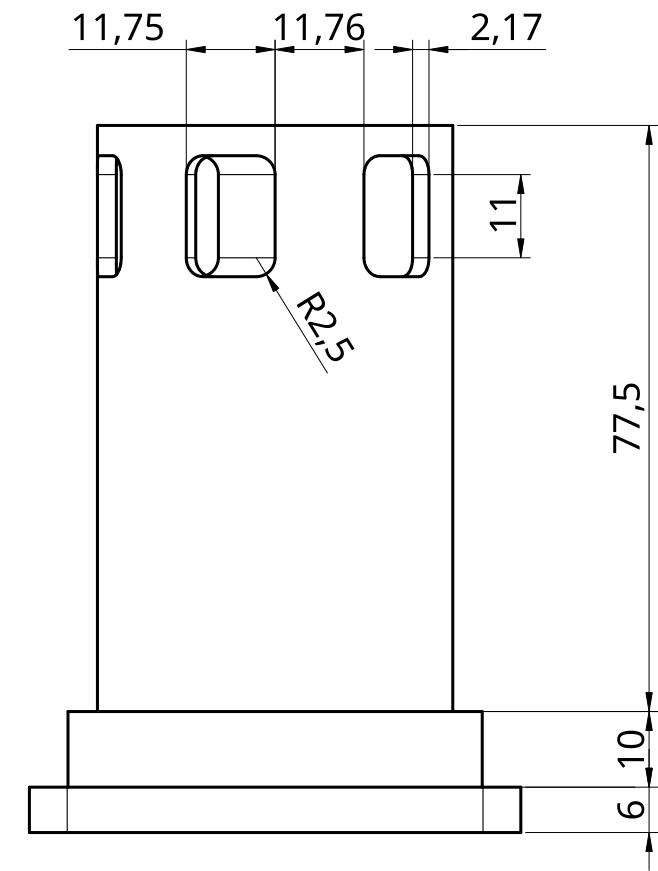
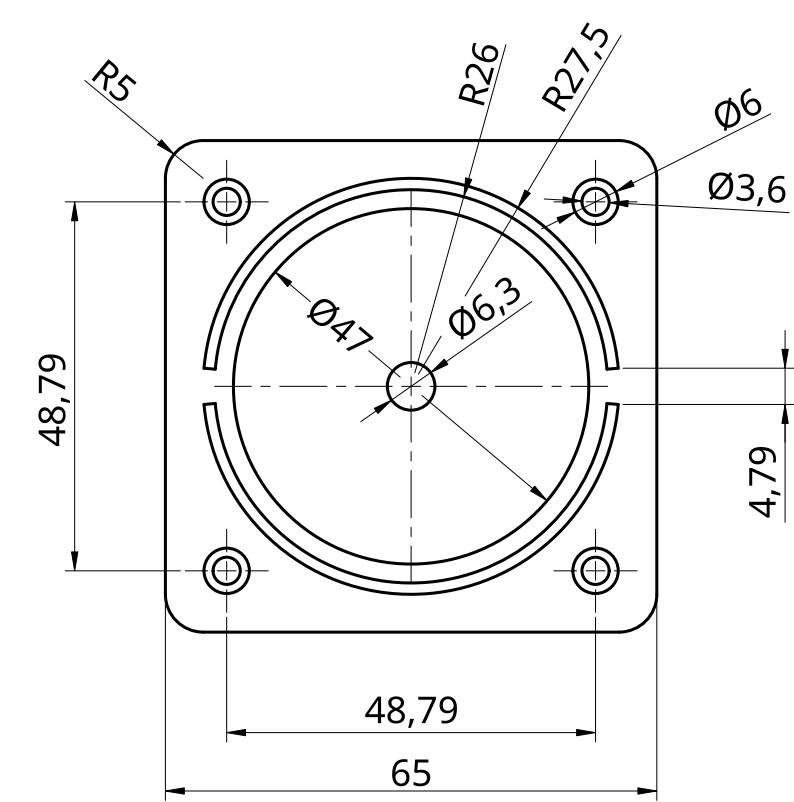
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE
ANGULAR = \pm °	DRAWN	TANYA ILIEVA TIMOVA	2025-04-09	
SURFACE FINISH ✓	CHECKED			
DO NOT SCALE DRAWING	APPROVED			
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS				
FIRST ANGLE PROJECTION	MATERIAL	FINISH	SIZE A3 DWG NO. 6 REV.	Inserto eslabón 25% blando
			SCALE 1:1 WEIGHT	6 of 17

6 5 4 3 2 1

6 5 4 3 2 1

6 5 4 3 2 1

D



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGULAR = \pm °		NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE
	DRAWN	TANYA ILIEVA TIMOVA		2025-06-01	
SURFACE FINISH	CHECKED				
	APPROVED				
DO NOT SCALE DRAWING					
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS					
FIRST ANGLE PROJECTION	MATERIAL	FINISH			SIZE A3 DWG NO. 7 REV.
					SCALE 1:1 WEIGHT SHEET 7 of 17

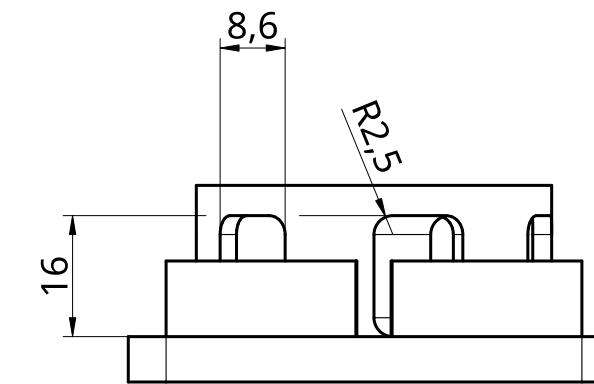
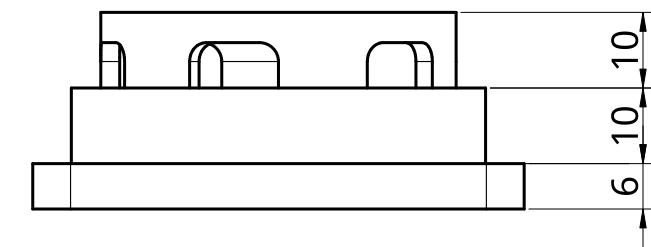
Parte inferior eslabón 25% blando

6 5 4 3 2 1

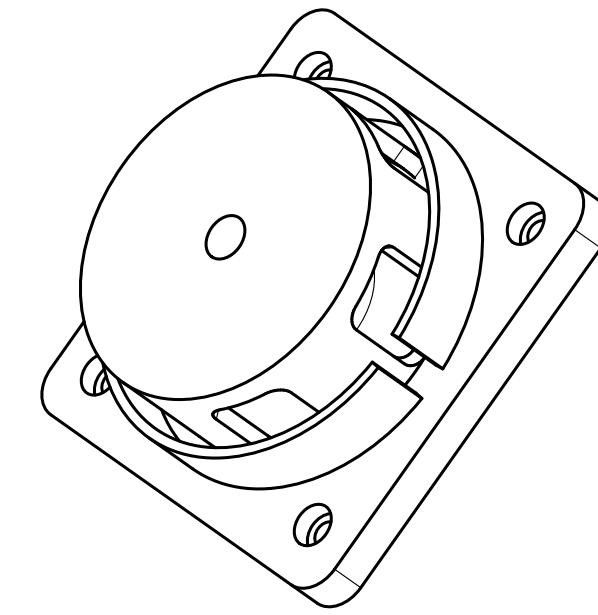
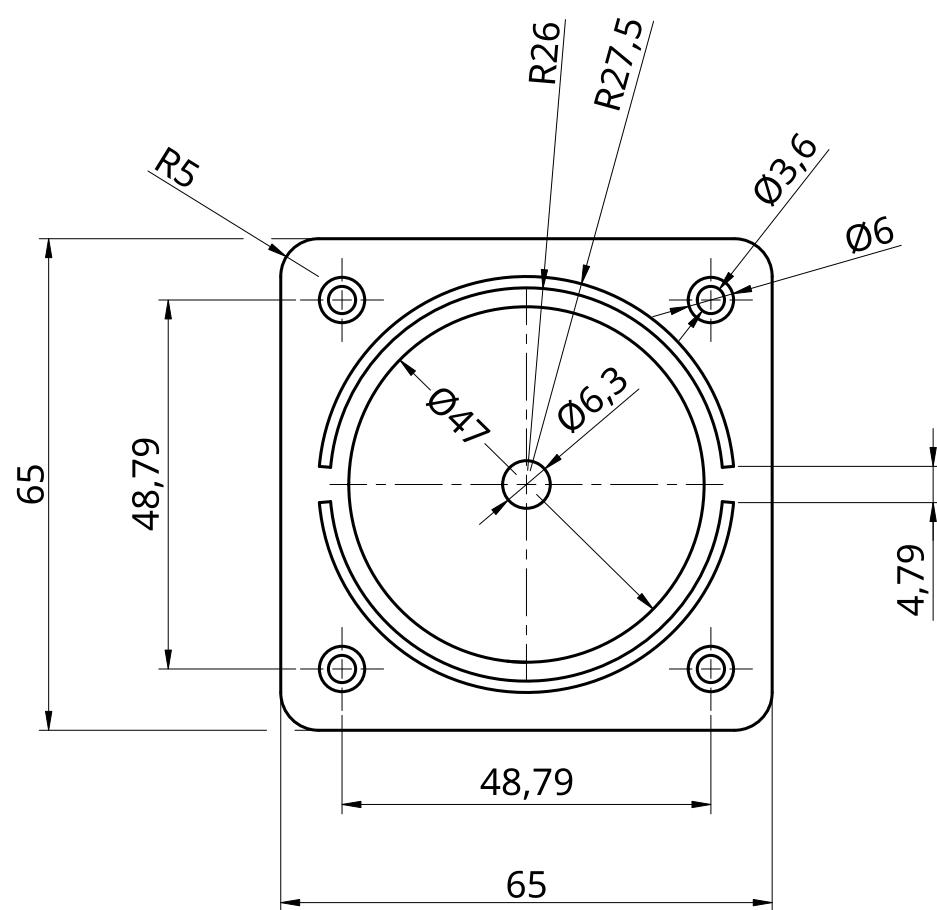
1

6 5 4 3 2 1

D



C



B

A

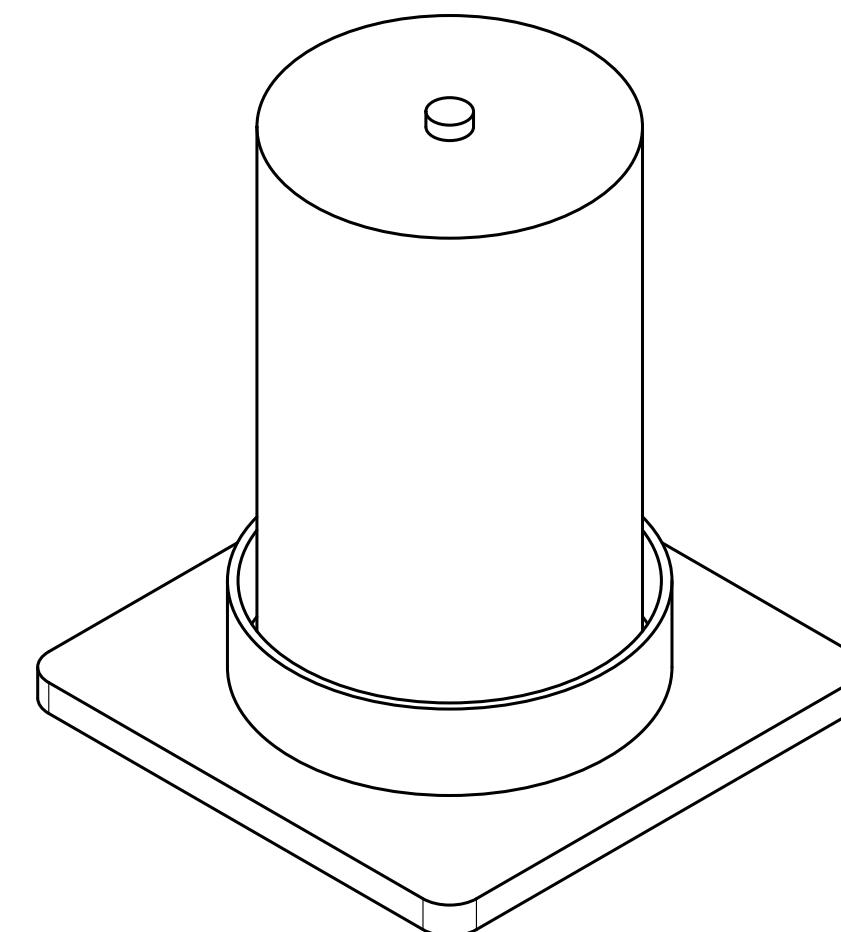
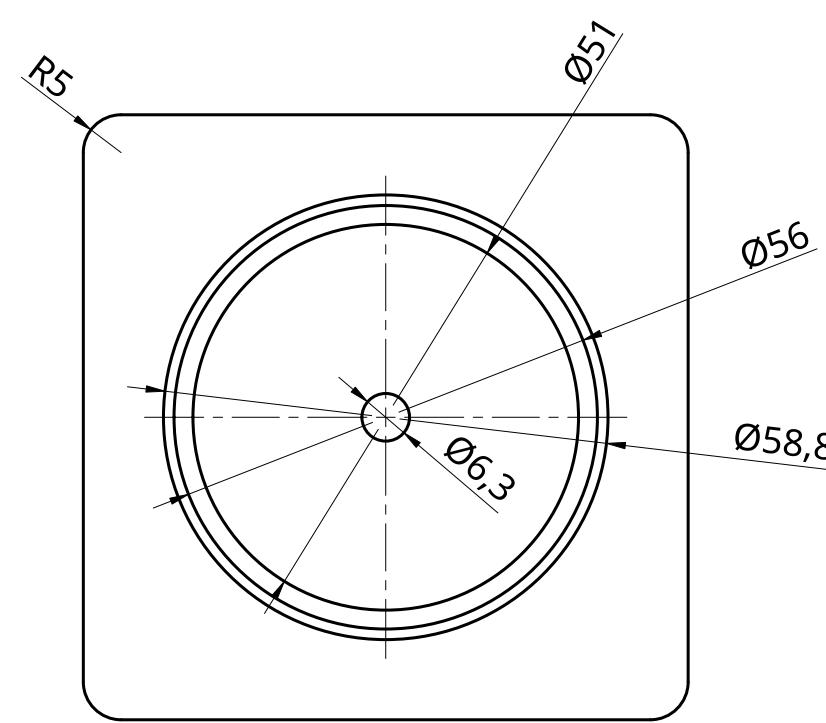
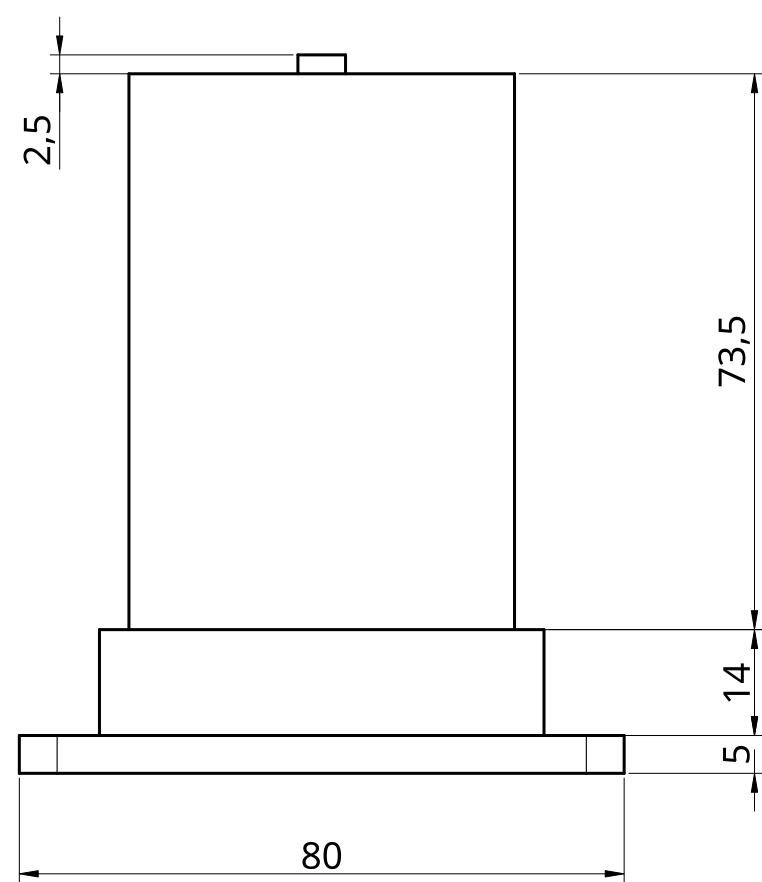
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGULAR = \pm °		DRAWN	TANYA ILIEVA TIMOVA	SIGNATURE	DATE			
SURFACE FINISH ✓		CHECKED			2025-04-09	TITLE		
DO NOT SCALE DRAWING		APPROVED				Parte inferior eslabón 100% blando		
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS								
FIRST ANGLE PROJECTION	MATERIAL	FINISH			SIZE A3 DWG NO. 8 REV.			
					SCALE 1:1 WEIGHT	SHEET 8 of 17		

6 5 4 3 2 1

A

6 5 4 3 2 1

D



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		NAME	SIGNATURE	DATE			
ANGULAR = \pm °		DRAWN	TANYA ILIEVA TIMOVA	2025-04-09			
SURFACE FINISH ✓		CHECKED			TITLE		
DO NOT SCALE DRAWING		APPROVED			Inserto eslabón 100% blando		
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS							
FIRST ANGLE PROJECTION	MATERIAL	FINISH			SIZE	DWG NO.	
					A3	9	REV.
	SCALE	1:1	WEIGHT		SHEET	9 of 17	

6 5 4 3 2 1

D

D

C

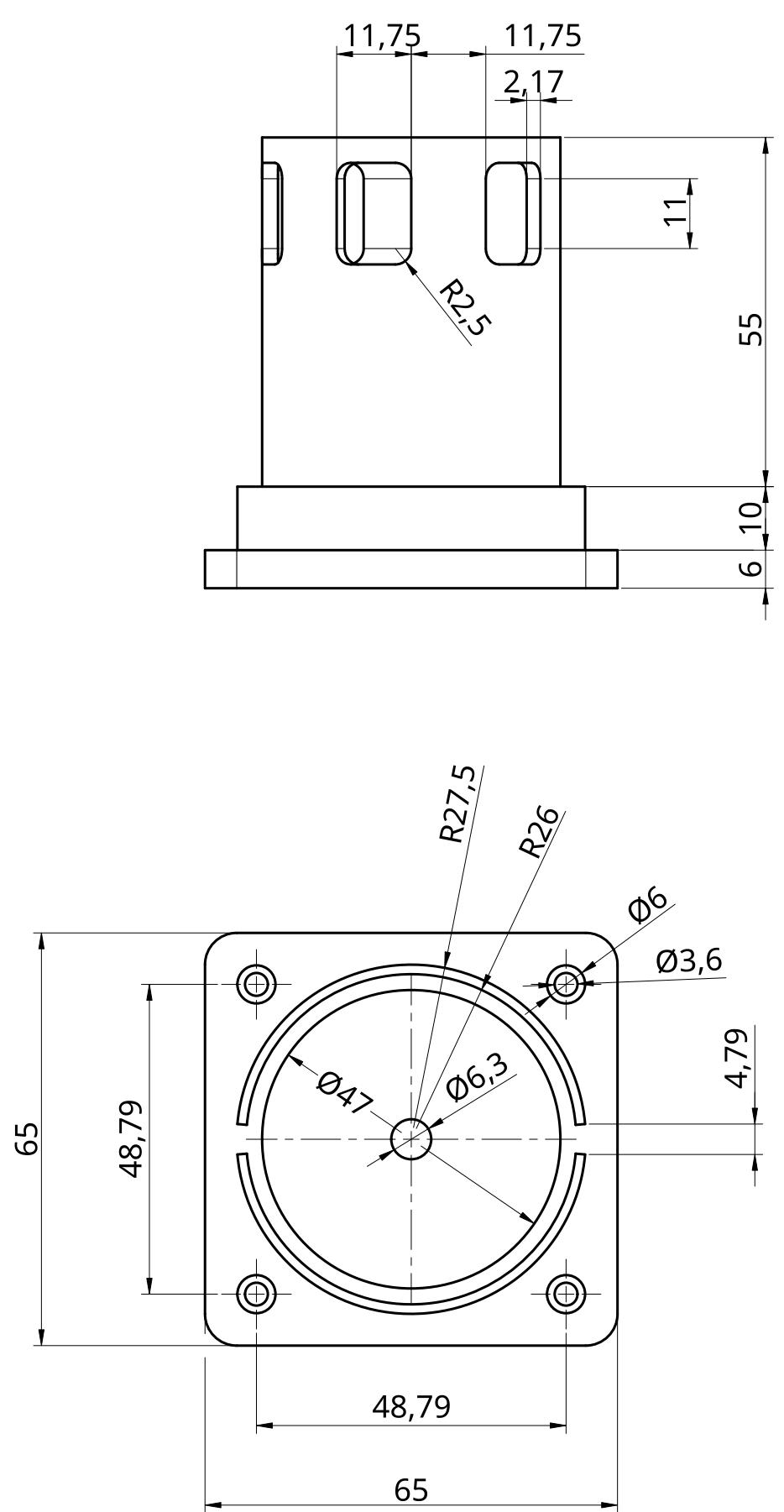
C

B

B

A

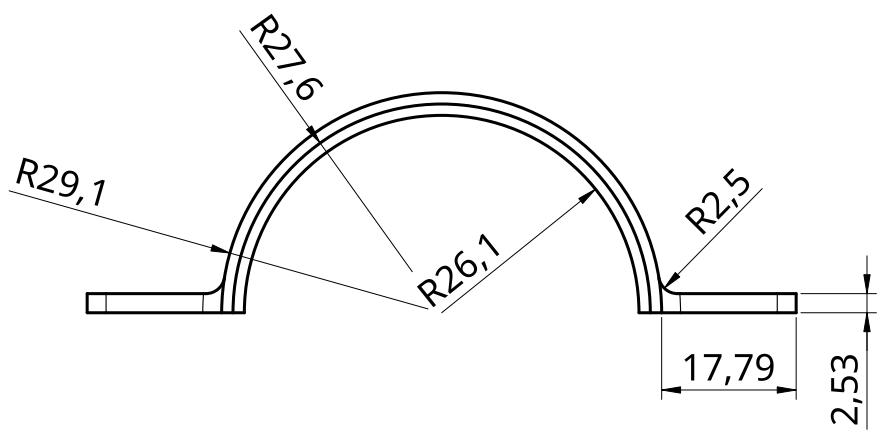
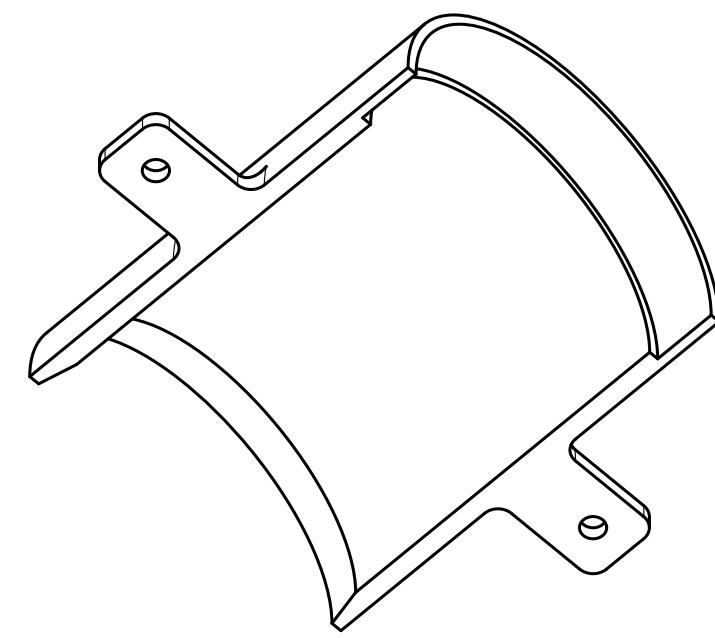
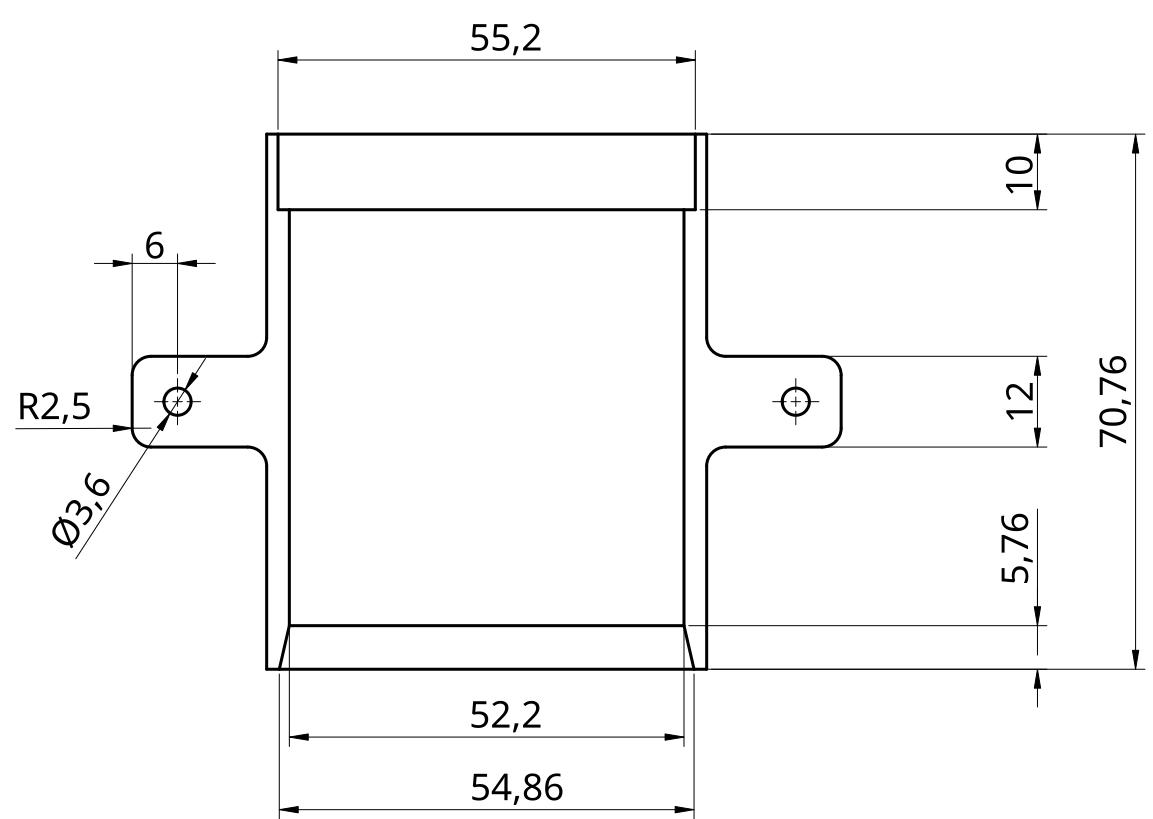
A



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS							
ANGULAR = \pm °	DRAWN	TANYA ILIEVA TIMOVA	SIGNATURE	DATE			
SURFACE FINISH ✓	CHECKED			2025-04-09	TITLE		
DO NOT SCALE DRAWING	APPROVED				Parte inferior eslabón 50% blando		
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS							
FIRST ANGLE PROJECTION	MATERIAL	FINISH		SIZE	A3	DWG NO.	10
				SCALE	1:1	WEIGHT	REV.
				SHEET	10 of 17		

6 5 4 3 2 1

D

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED,
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERSANGULAR = \pm °

SURFACE FINISH ✓

DO NOT SCALE DRAWING

BREAK ALL SHARP EDGES AND
REMOVE BURRS

FIRST ANGLE PROJECTION



DRAWN NAME SIGNATURE DATE

2025-04-09

CHECKED

APPROVED

TITLE

Casquillo parte inferior eslabón 50%
blando

SIZE

A3

SCALE

1:1

DWG NO.

11

WEIGHT

REV.

11 of 17

6 5 4 3 2 1

A

3

2

1

D

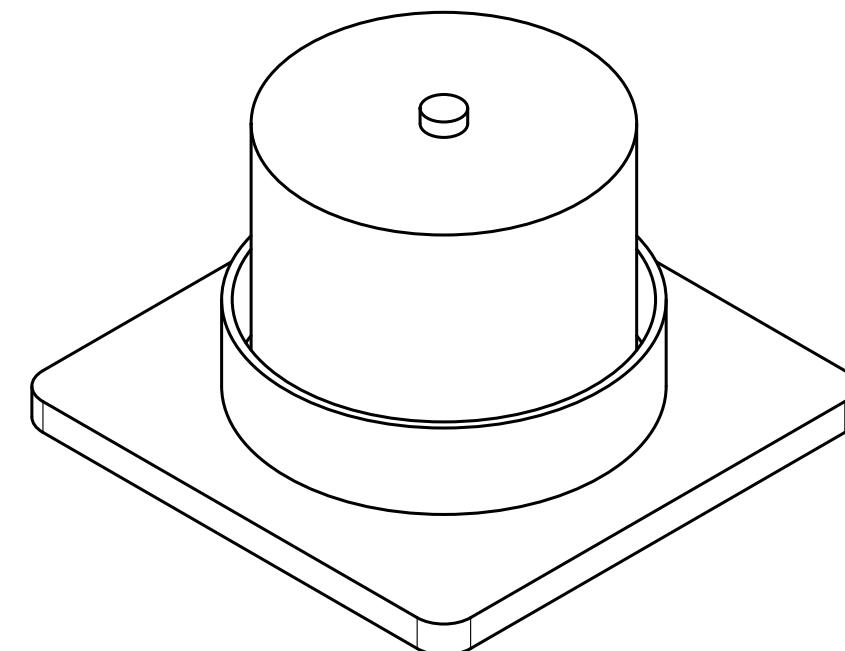
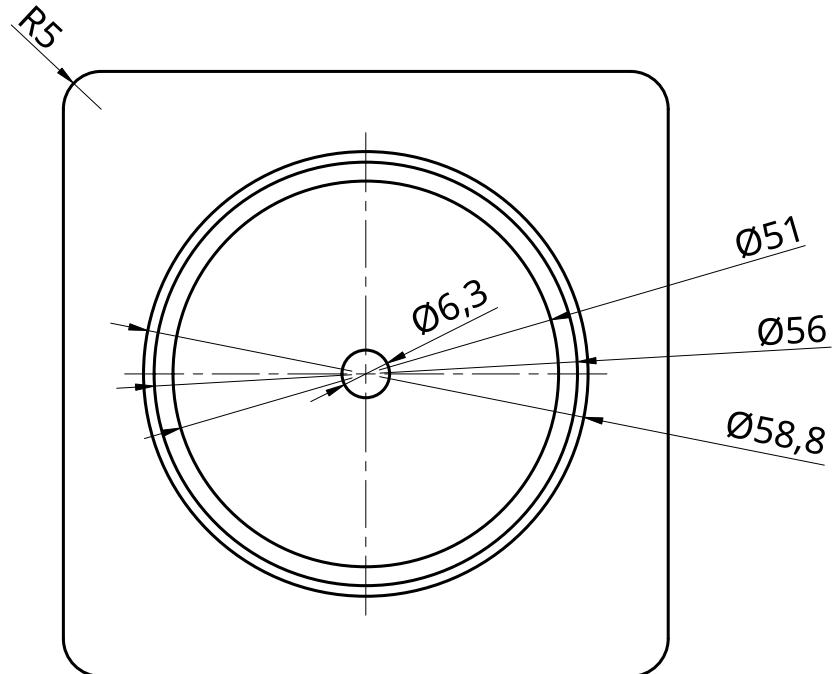
C

B

A

6 5 4 3 2 1

D



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE
ANGULAR = \pm °	DRAWN	TANYA ILIEVA TIMOVA	2025-04-09	
SURFACE FINISH ✓	CHECKED			
DO NOT SCALE DRAWING	APPROVED			
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS				
FIRST ANGLE PROJECTION	MATERIAL	FINISH	SIZE A3	DWG NO. 12
			SCALE 1:1	WEIGHT
				SHEET 12 of 17

Inserto eslabón 50% blando

6 5 4 3 2 1

D

D

C

C

B

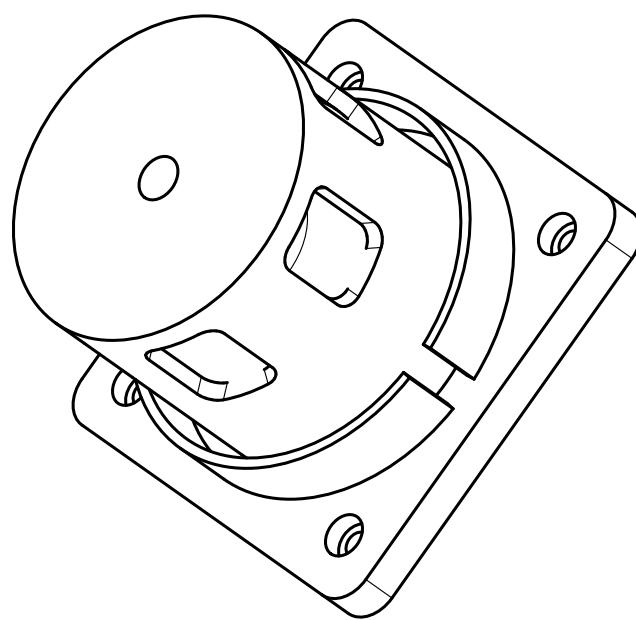
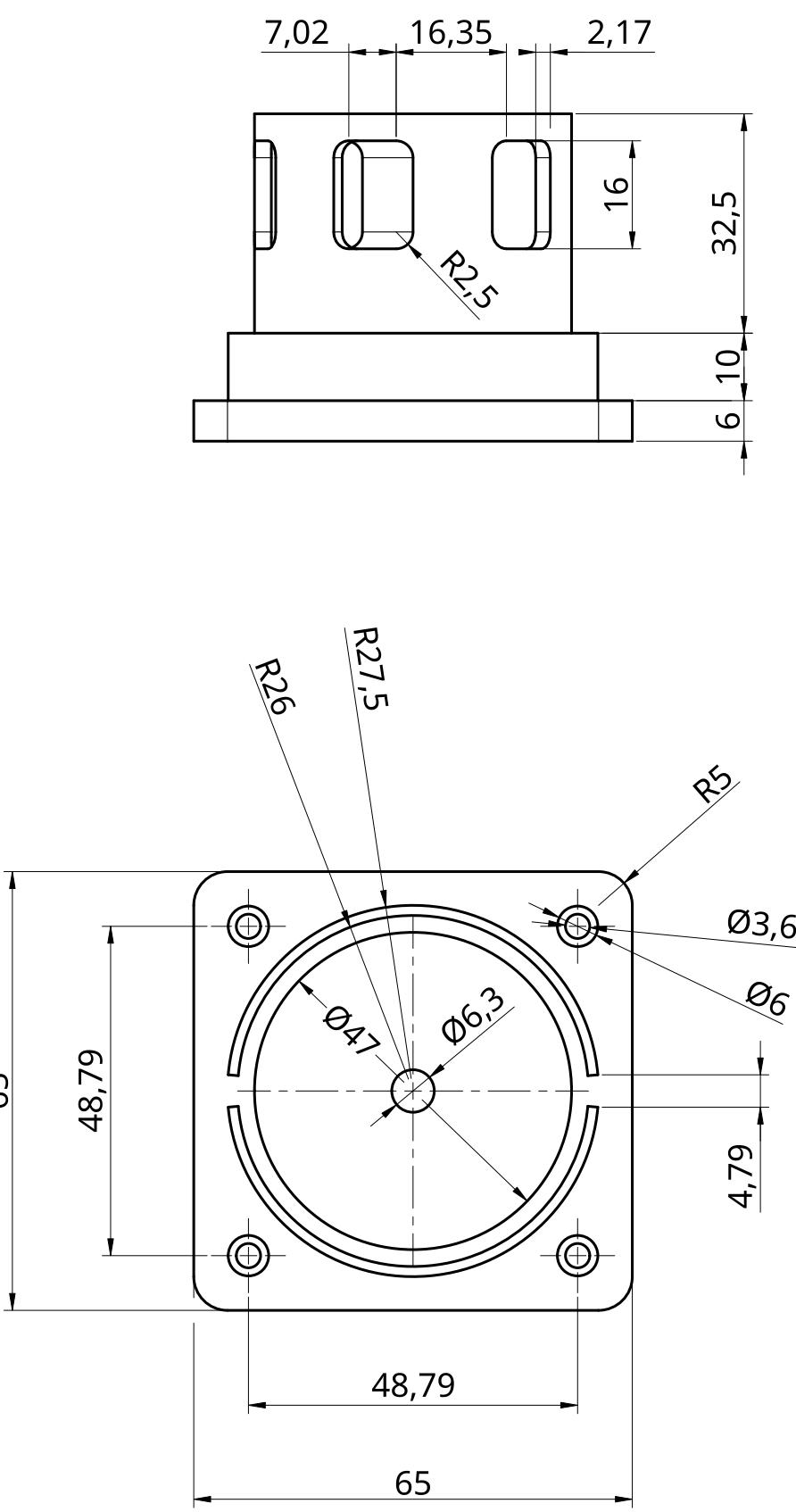
B

A

A

6 5 4 3 2 1

D



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE Parte inferior eslabón 75% blando
ANGULAR $\pm \text{ }^\circ$	DRAWN	TANYA ILIEVA TIMOVA	2025-04-09	
SURFACE FINISH	CHECKED			
	APPROVED			
DO NOT SCALE DRAWING				
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS				
FIRST ANGLE PROJECTION	MATERIAL	FINISH		
			SIZE A3 DWG NO. 13 REV.	
	SCALE 1:1	WEIGHT		13 of 17

6 5 4 3 2 1

D

D

C

C

B

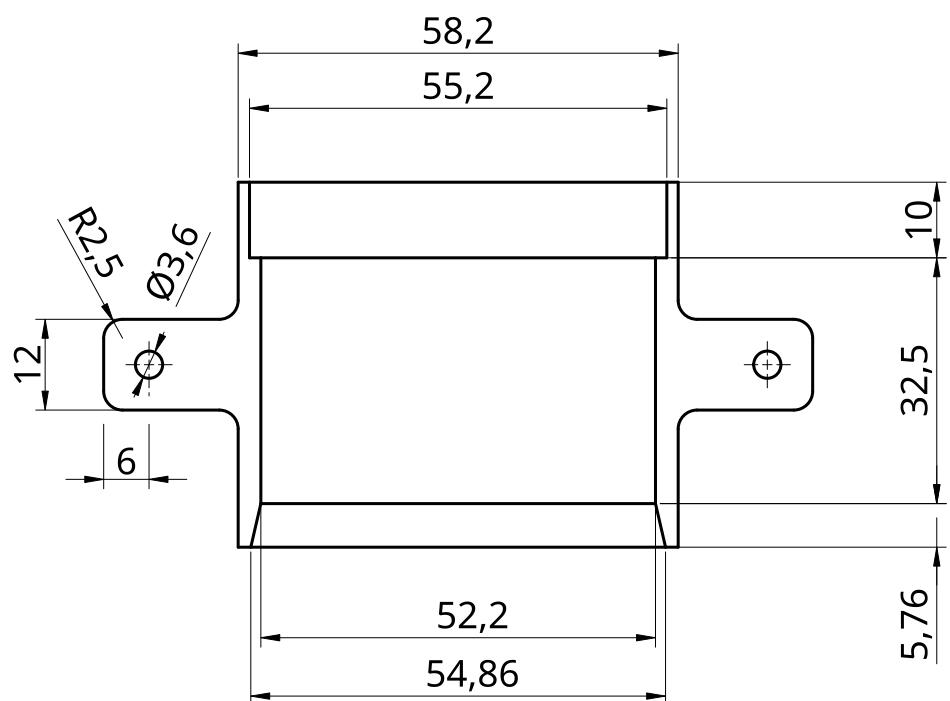
B

A

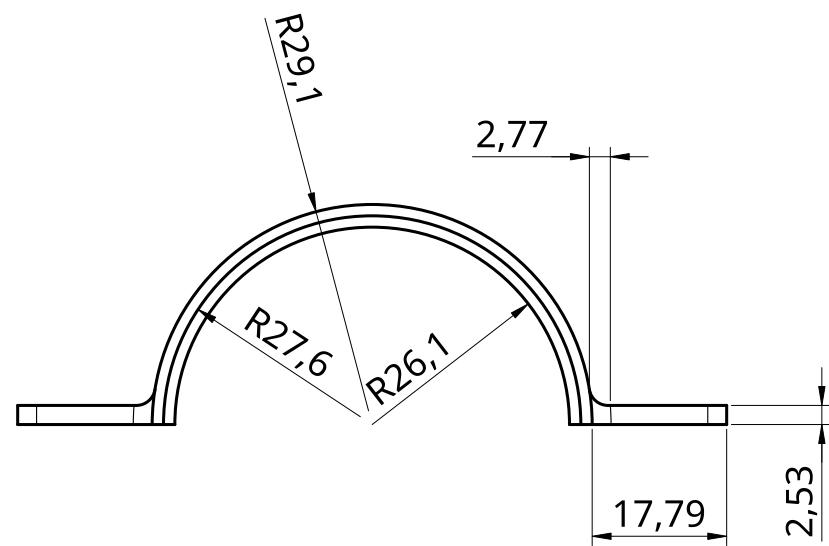
A

6 5 4 3 2 1

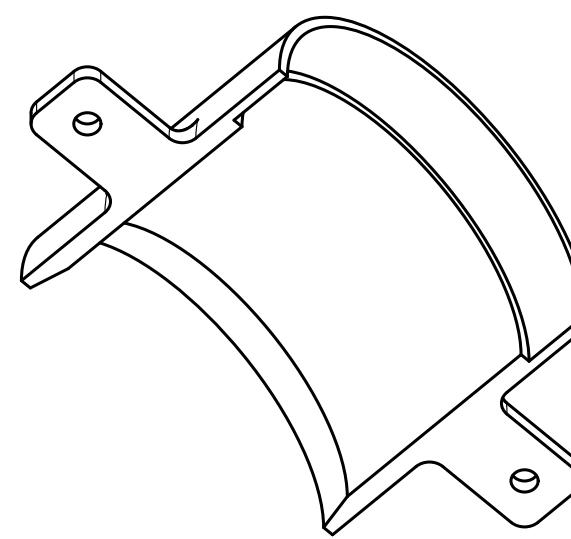
D



C



B



A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		NAME	SIGNATURE	DATE	
ANGULAR $\pm \text{ }^\circ$	DRAWN	TANYA ILIEVA TIMOVA		2025-04-09	
SURFACE FINISH \checkmark	CHECKED				TITLE
	APPROVED				
DO NOT SCALE DRAWING					Casquillo parte inferior eslabón 75% blando
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS					
FIRST ANGLE PROJECTION	MATERIAL	FINISH			SIZE A3 DWG NO. 14 REV.
					SCALE 1:1 WEIGHT SHEET 14 of 17

6 5 4 3 2 1

D

D

C

C

B

B

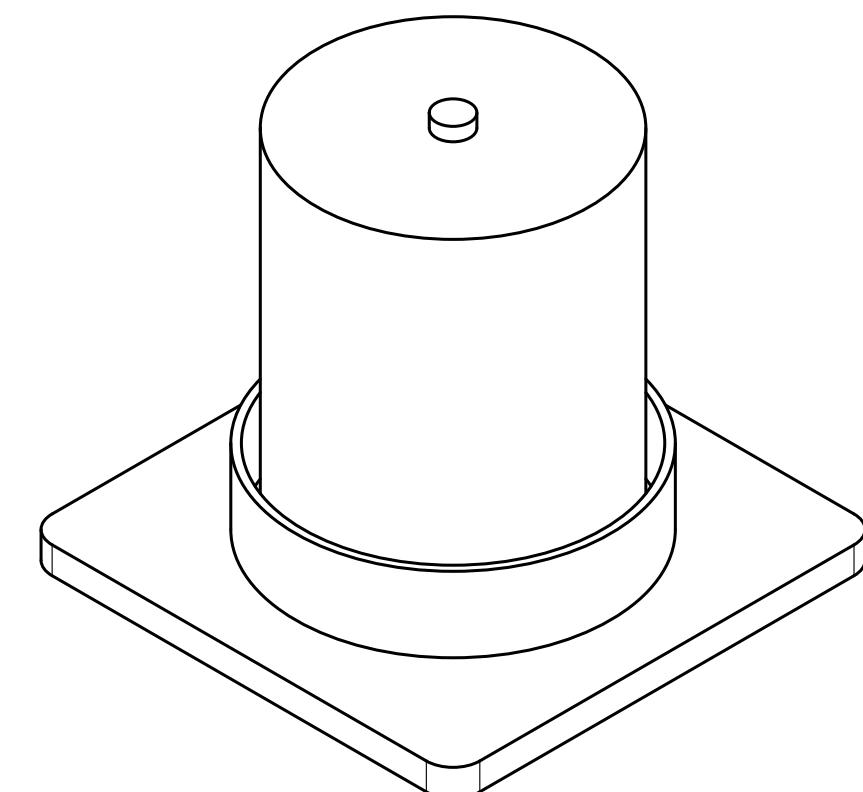
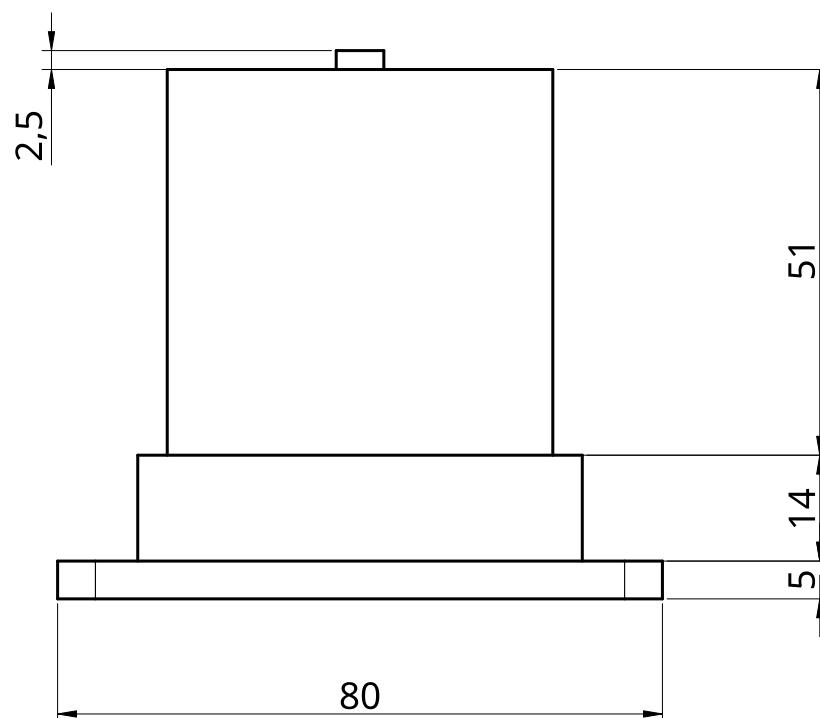
A

A

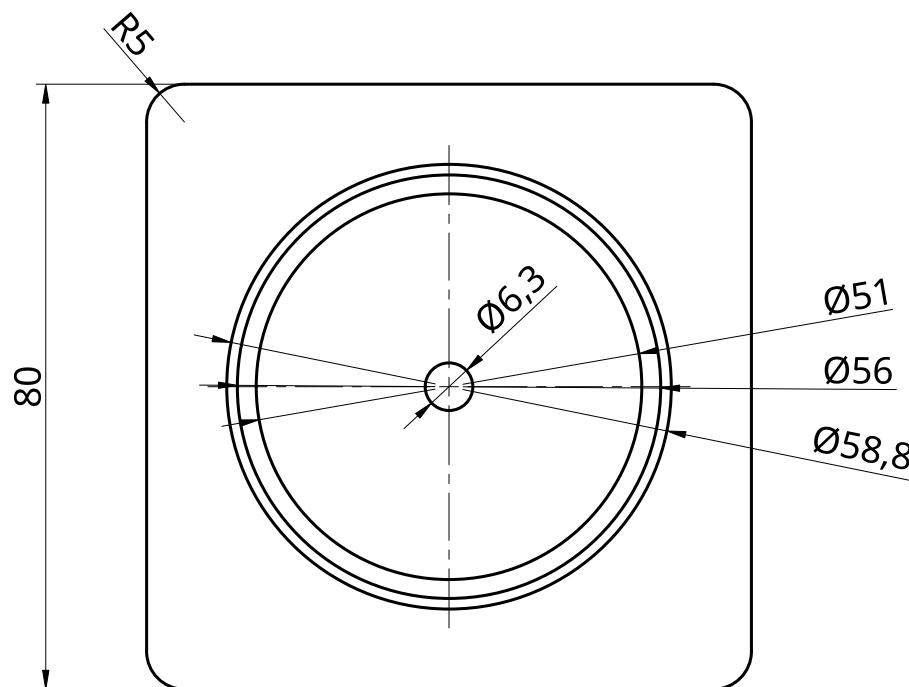
6 5 4 3 2 1

6 5 4 3 2 1

D



C



B

A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE
ANGULAR = \pm °	DRAWN	TANYA ILIEVA TIMOVA		2025-04-09	
SURFACE FINISH ✓	CHECKED				
DO NOT SCALE DRAWING	APPROVED				
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS					
FIRST ANGLE PROJECTION	MATERIAL	FINISH			Inserto eslabón 75% blando
SIZE A3	DWG NO.	15			REV.
SCALE 1:1	WEIGHT				SHEET 15 of 17

6 5 4 3 2 1

D

C

B

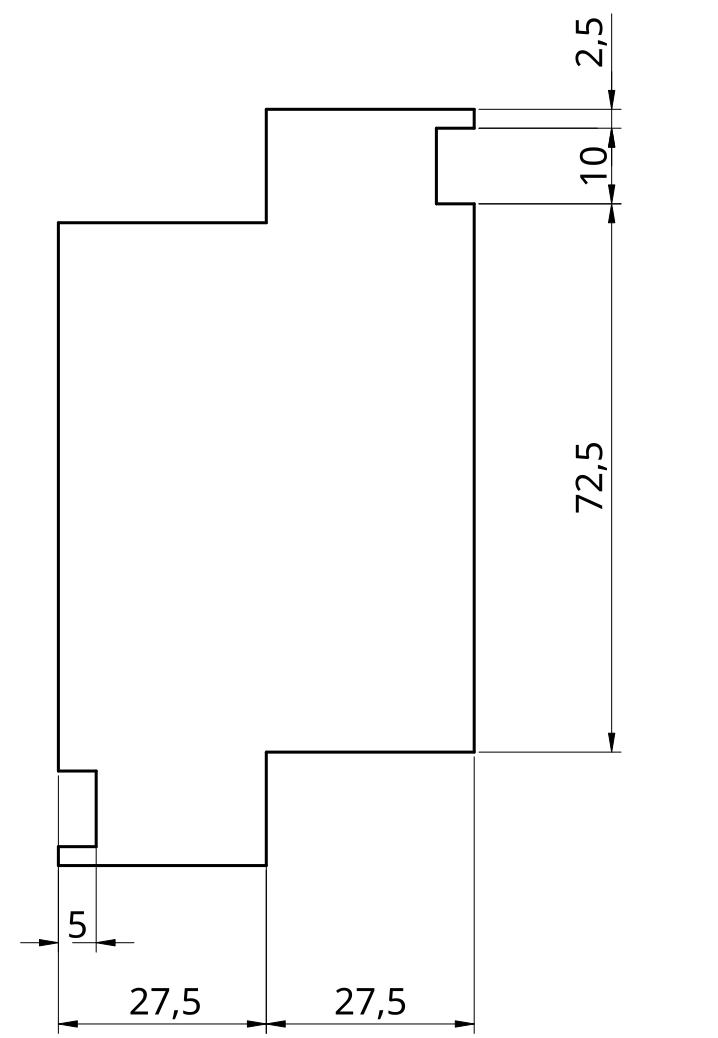
A

D

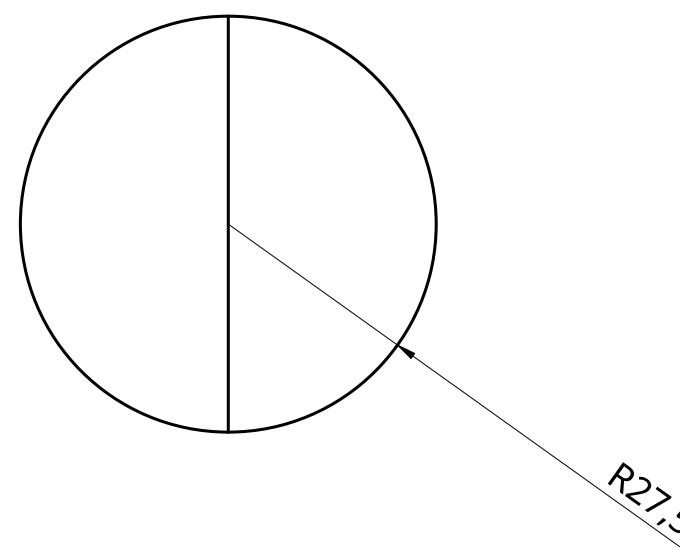
6 5 4 3 2 1

6 5 4 3 2 1

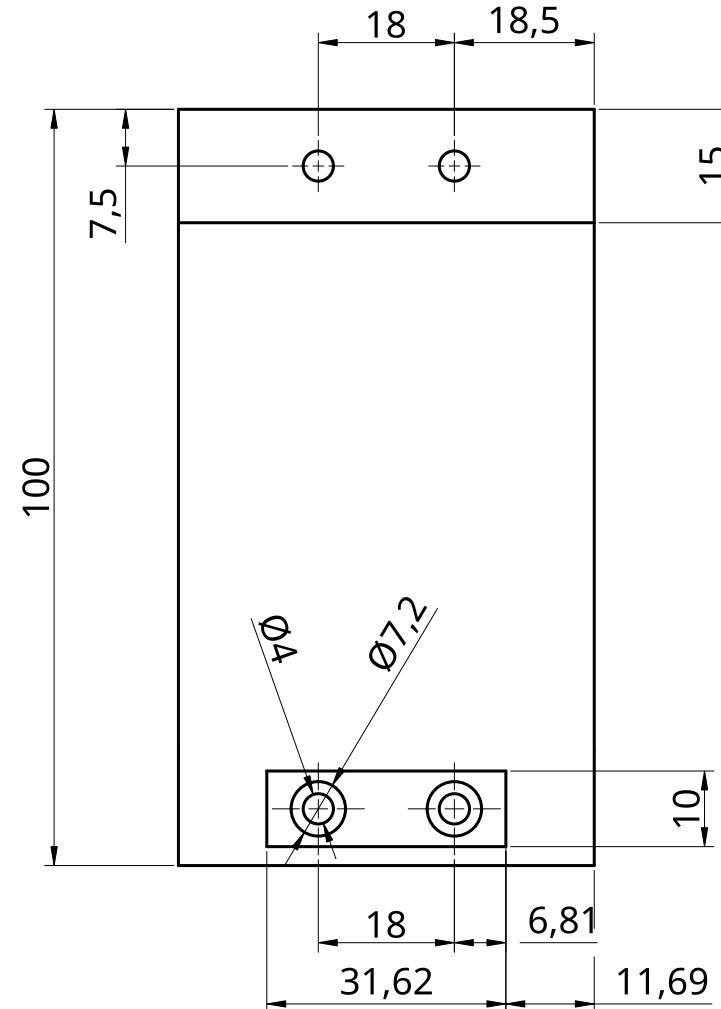
D



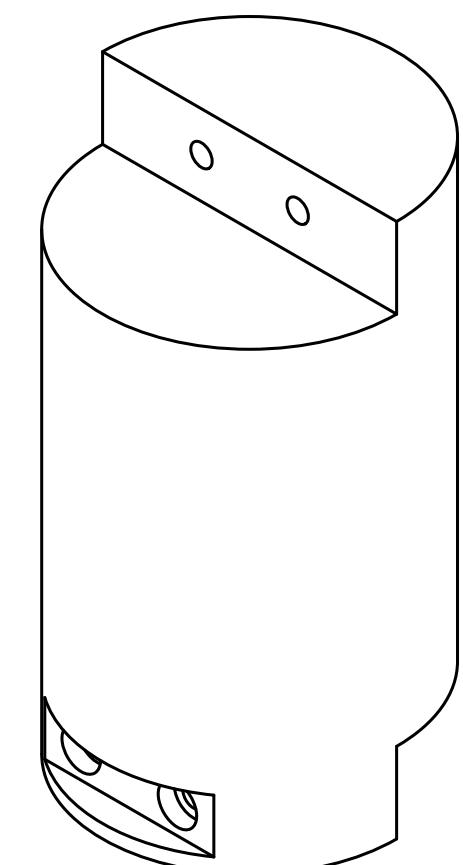
C



B



A



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED,
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS

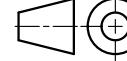
ANGULAR = \pm °

SURFACE FINISH ✓

DO NOT SCALE DRAWING

BREAK ALL SHARP EDGES AND
REMOVE BURRS

FIRST ANGLE PROJECTION



NAME

SIGNATURE

DATE

DRAWN TANYA ILIEVA TIMOVA

2025-06-01

CHECKED

APPROVED

TITLE

Parte central eslabón completamente
rígido

SIZE

A3

SCALE

1:1

DWG NO.

16

WEIGHT

REV.

Sheet

16 of 17

6 5 4 3 2 1

D

D

C

C

B

B

A

A

6 5 4 3 2 1

D

D

6

5

4

3

2

1

D

D

C

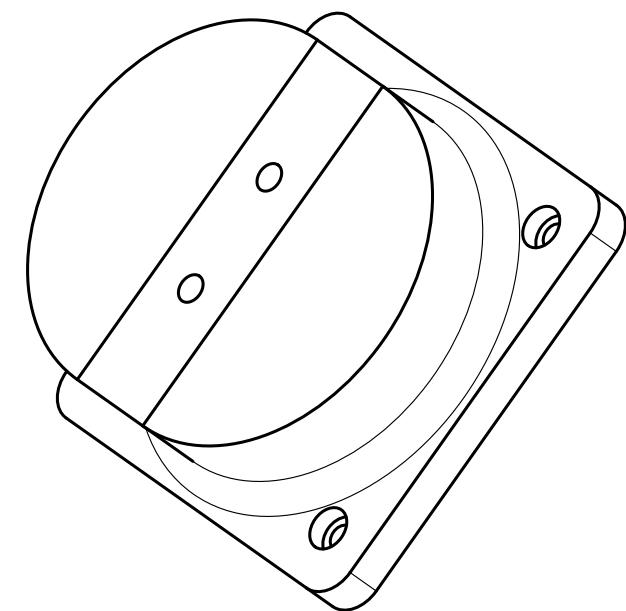
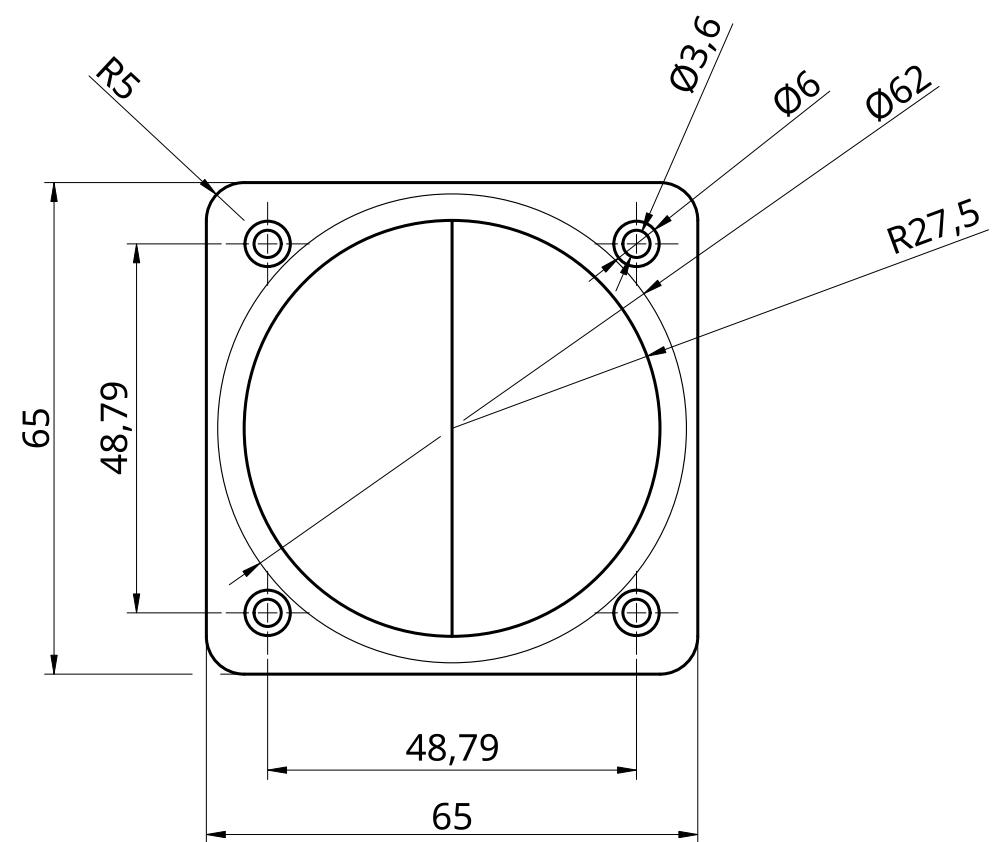
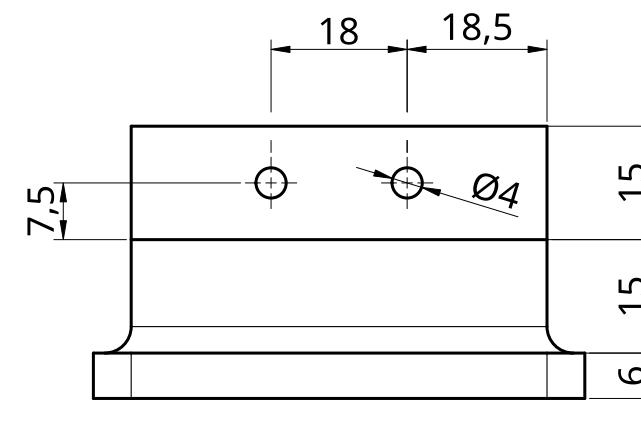
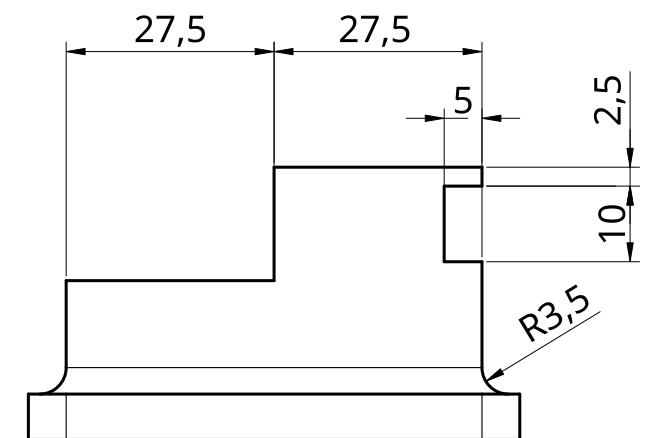
C

B

B

A

A



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE
ANGULAR = \pm °	SURFACE FINISH ✓	TANYA ILIEVA TIMOVA		2025-06-01	
DO NOT SCALE DRAWING					SIZE A3 DWG NO. 17 REV.
BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS					
FIRST ANGLE PROJECTION	MATERIAL	FINISH		SCALE 1:1 WEIGHT	17 of 17

