



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**FABRICACIÓN DE MÁQUINA DE DESGASTE ABRASIVO PARA
MATERIAL Y CARACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS DE ENSAYO**

POR

Natalia Quintana Ulloa

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Aeroespacial

Profesor Guía:
Dr. Carlos Medina
Dr. Nicolás Araya

Diciembre 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Natalia Quintana Ulloa

© 2023 Natalia Quintana Ulloa

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a quienes han sido pilares fundamentales en este trayecto académico y personal. En primer lugar, agradezco a Paulina Quintana por ser mi constante soporte emocional y por su invaluable contribución como fotógrafa oficial de esta memoria.

También, a Carlos Medina y Nicolás Araya, por su disposición y orientación durante el desarrollo de este proyecto. Además, agradezco a Mario Ramírez, Rodrigo Moreno y Eduardo Escobar por su invaluable ayuda en la fabricación de piezas y por sus valiosas recomendaciones para mejorar el sistema. Un especial reconocimiento a Nicolás Anabalón por su colaboración en impresión de piezas, así como a Joaquín Sepúlveda, por su apoyo en el área de materiales para la fabricación de probetas y por brindarme la oportunidad de adentrarme en el mundo de la industria 4.0.

Mi reconocimiento también va dirigido a Sofía Cruces y Alfo Benítez por su apoyo constante a lo largo de estos seis años de carrera, así como en el apoyo durante la realización de este proyecto. Y a Pamela Pinilla, con quien he tenido el honor de compartir la experiencia de estudiar ingeniería estos últimos dos años, por su apoyo en la configuración del sistema de control.

Agradezco profundamente a mis amigos y familiares por su inquebrantable apoyo durante la realización de este proyecto. Sin su respaldo, no habría sido posible diseñar y fabricar una máquina de desgaste abrasivo.

Esta memoria está dedicada a Esperanza.

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo principal el diseño y fabricación de una máquina de desgaste abrasivo que sea de fácil operación, destinada a evaluar diversos materiales, y que pueda ser utilizada sin complicaciones por usuarios comunes, incluso aquellos sin experiencia previa en el campo del ensayo de materiales. Enfocado en la problemática del desgaste, principal causa de reducción en la vida útil de componentes industriales, este proyecto se centra específicamente en el desgaste abrasivo. La máquina diseñada se concibe como un banco de ensayo para evaluar materiales bajo condiciones específicas de desgaste.

El desarrollo del proyecto abarca el diseño y fabricación de una máquina de flujo giratorio, incluyendo tanto la estructura como el sistema de control. Para verificar el funcionamiento de la máquina se realizan dos ensayos: uno factorial en probetas de yeso, para determinar la influencia de diferentes factores en el porcentaje de desgaste a través de un análisis de varianza, y otro en metales, específicamente en acero de bajo contenido de carbono y aluminio, para comprobar la capacidad de la máquina de desgastar diversos materiales.

Los resultados obtenidos confirman la efectividad de la máquina en generar desgaste abrasivo en materiales como yeso, acero de bajo contenido de carbono y aluminio, demostrando su capacidad para evaluar materiales de manera precisa y controlada. Se destaca también la influencia de factores como la velocidad de rotación y la concentración de partículas sólidas en la lechada sobre el porcentaje de desgaste.

La conclusión del trabajo resalta la consecución del objetivo principal con la creación de una máquina que evalúa el desgaste abrasivo en una variedad de materiales y es accesible para usuarios no especializados. Como propuesta futura, se sugiere aumentar el número de réplicas en los ensayos para profundizar en la comprensión de la influencia de ciertos factores y considerar la posible optimización de la máquina para aplicaciones industriales.

Palabras claves: Desgaste abrasivo; Materiales.

Abstract

This work aims at designing and manufacturing an abrasive wear testing machine that is user-friendly, intended to assess various materials, and can be operated effortlessly by common users, including those without prior experience in materials testing. Focused on the issue of wear, the primary cause of reduced industrial component lifespan, this project specifically targets abrasive wear. The designed machine is conceived as a test bench to evaluate materials under specific wear conditions.

The project's development encompasses the design and manufacturing of a slurry pot machine, encompassing both the structure and control system. To verify the machine's functionality, two tests are conducted: a factorial test on gypsum specimens to determine the influence of different factors on the wear rate through variance analysis, and another on metals, particularly low-carbon steel and aluminum, to validate the machine's capability to wear various materials.

The obtained results confirm the machine's effectiveness in generating abrasive wear in materials such as gypsum, low-carbon steel, and aluminum, demonstrating its ability to evaluate materials precisely and in a controlled manner. Additionally, the impact of factors such as rotation speed and concentration of solid particles in the slurry on the wear rate is highlighted.

The conclusion emphasizes the achievement of the primary objective by creating a machine that evaluates abrasive wear in a variety of materials and is accessible to non-specialized users. As a future proposal, increasing the number of test replicates is suggested to deepen the understanding of certain influencing factors and consider potential machine optimization for industrial applications.

Keywords: Abrasive wear; Materials.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	vii
Lista de Tablas	viii
Lista de Figuras	ix
Nomenclatura	xi
1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Objetivo del proyecto	1
1.3 Metodología.....	2
1.4 Carta Gantt.....	2
2 CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	3
2.1 Investigaciones y literatura relevante para el diseño y fabricación de la máquina.....	3
2.2 Diseño factorial de ensayos	6
3 CAPÍTULO 3: DISEÑO	8
3.1 Porta probetas	9
3.2 Estructura.....	12
3.3 Componentes y materiales.....	17
3.4 Sistema de control	20
3.5 Manual de usuario	22
3.6 Costos	24
4 CAPÍTULO 4: DISEÑO EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y ANÁLISIS.	26
4.1 Diseño ensayo factorial	26
4.2 Diseño de ensayo a metales.....	33
4.3 Desgaste presentado en componentes.....	38
4.4 Análisis de resultados	40
5 CAPÍTULO 5: CONCLUSIÓN	42
Referencias	43
6 Anexo	45

Lista de Tablas

Tabla 3.1: Características fluido límite.	8
Tabla 3.2: Componentes ensamble porta probetas.	11
Tabla 3.3: Torque necesario para mover las diversas configuraciones del porta probetas.	18
Tabla 3.4: Componentes sistema de control.	21
Tabla 3.5: Costos de fabricación de máquina de desgaste abrasivo para materiales.	24
Tabla 4.1: Factores y niveles a evaluar.	26
Tabla 4.2: Masa de arena A para cada concentración de partículas sólidas en la lechada.	27
Tabla 4.3: Configuraciones de tratamientos.	28
Tabla 4.4: Porcentaje de desgaste obtenido al finalizas los tratamientos del ensayo factorial.	29
Tabla 5: Niveles de cada factor a analizar en cada análisis.	29
Tabla 4.6: ANOVA 1.	30
Tabla 4.7: ANOVA 2.	30
Tabla 4.8: ANOVA 3.	30
Tabla 4.9: Configuración ensayos a metales.	34
Tabla 4.10: Propiedades mecánicas acero de bajo contenido de carbono (Fuente: [14]).	34
Tabla 4.11: Propiedades mecánicas aluminio 6061 (Fuente: [15]).	34
Tabla 4.12: Porcentaje de desgaste presentada en las placas al finalizar los ensayos.	38
Tabla 6.1: Porcentaje de desgaste obtenido de los tratamientos del ensayo factorial.	88

Lista de Figuras

Figura 2.1: Máquina de desgaste de impacto paralelo (Fuente: [6]).	4
Figura 2.2: Esquema máquina de desgaste de impacto en ángulo (Fuente: [7]).	4
Figura 2.3: Esquema máquina de desgaste de impacto perpendicular (Fuente: [8]).	5
Figura 2.4: Esquema máquina de desgaste de flujo circular (Fuente: [4]).	5
Figura 2.5: Porta probetas con inductor de ángulo de ataque (Fuente: [9]).	6
Figura 2.6: Tratamientos de diseño $2k$ (Fuente: [10]).	7
Figura 2.7: Tratamientos de diseño $3k$ (Fuente: [10]).	7
Figura 3.1: Dimensiones Probeta en mm.	8
Figura 3.2: Dimensiones principales en mm A. Placa superior sin IAA. B. Placa superior IAA1830. C. Placa superior IAA4560 D. Placa inferior.	10
Figura 3.3: Fotografía placas porta probetas.	11
Figura 3.4: Ensamble porta probetas.	11
Figura 3.5: Fotografía estructura ensamblada.	12
Figura 3.6: Ensamble Base.	13
Figura 3.7: Dimensiones principales en mm Base.	13
Figura 3.8: Ensamble riel.	14
Figura 3.9: Dimensiones principales en mm riel.	14
Figura 3.10: Ensamble carro.	15
Figura 3.11: Dimensiones principales en mm carro.	15
Figura 3.12: Contenedores acoplados en la parte posterior del riel.	16
Figura 3.13: Fotografía Contenedor Fin de Carrera acoplado al Riel.	16
Figura 3.14: Contenedores acoplados en los laterales de la base.	17
Figura 3.15: Torque generado a distintas velocidades de rotación por motor RTA NEMA 23 (Fuente: [11]).	19
Figura 3.16: Esquema de conexión sistema de control.	21
Figura 3.17: Esquema montaje Porta Probetas.	22
Figura 3.18: Esquema montaje tapas.	22
Figura 3.19: Enlace descarga de archivos.	23
Figura 3.20: Extracto código Arduino Ensayo.	23
Figura 4.1: Fotografía arena A tomada bajo microscopio.	26
Figura 4.2: Distancia en mm entre el centro de las probetas y las partículas sólidas contenidas en la lechada concentradas en el fondo del contenedor. A) 30% de concentración. B) 60% de concentración.	27
Figura 4.3: Esquema de distribución de probetas según sentido de rotación del sistema.	28
Figura 4.4: Pareto de efectos estandarizados para ANOVA 1.	31
Figura 4.5: Pareto de efectos estandarizados para ANOVA 2.	32
Figura 4.6: Pareto de efectos estandarizados para ANOVA 3.	32
Figura 4.7: Fotografías probetas sometida a tratamiento con factores B (1) y C (-1). A) Probeta antes de ser sometida a tratamiento. B) Sin IAA. C) 18 °. D) 30 °. E) 45 °. F) 60 °.	33

Figura 4.8: Zona en donde se produce desgaste en probetas de yeso para distintos ángulos de ataque.	33
Figura 4.9: Dimensiones en mm probetas de acero con bajo contenido de carbono.	34
Figura 4.10: Fotografía arena B tomada bajo microscopio.	35
Figura 4.11: Distancia en mm entre el centro de las probetas y las partículas sólidas contenidas en la lechada concentradas en el fondo del contenedor.	35
Figura 4.12: Porcentaje de desgaste para diferentes ángulos de ataque en probetas de acero de bajo contenido de carbono.	36
Figura 4.13: Porcentaje de desgaste para diferentes ángulos de ataque en probetas de aluminio.	37
Figura 4.14: Desgaste presentado en la superficie de probetas. A) Acero con bajo contenido de carbono. B) Aluminio.	37
Figura 4.15: Zona en donde se produce desgaste en probetas de metal para distintos ángulos de ataque.	38
Figura 4.16: Base interior del contenedor.	38
Figura 4.17: Desgaste presentado en los bordes externos de la placa inferior.	39
Figura 4.18: Sistemas de acoples al finalizar los ensayos.	39
Figura 4.19: Superficie exterior tuerca M16 al finalizar los ensayos.	39
Figura 4.20: Parte expuesta a lechada del eje al finalizar los ensayos.	40
Figura 6.1: Extracto Carta Gantt.	45

Nomenclatura

y	:	Espesor [m]
r	:	Radio [m]
v	:	Velocidad [m/s]
T	:	Torque [Nm]
ω	:	Velocidad angular [rad]
μ	:	Viscosidad [cp]
ρ	:	Densidad [g/cm^3]
τ	:	Esfuerzo de corte [N/m^2]
PD	:	Porcentaje de desgaste [%]

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

Entre las causas de pérdida de utilidad en componentes de maquinaria se encuentran la obsolescencia, la ruptura y el desgaste. Este último causa alrededor de 70% de la pérdida de vida útil en componentes [1]. Entre los tipos de desgaste se encuentra el desgaste abrasivo, el cual es un proceso de pérdida de material que se produce cuando las superficies de dos cuerpos sólidos entran en contacto y se deslizan uno contra el otro. Este proceso es muy común en la industria, y puede causar graves daños en los equipos y maquinarias, reduciendo su vida útil y aumentando los costos de mantenimiento y reparación. En el caso específico de la industria aeronáutica, todas las aeronaves están sometidas a desgaste abrasivo provocado por el viento y la lluvia, el desgaste se produce en la zona externa del fuselaje, al ser éste principalmente construido de materiales compuestos, los cuales generalmente tienen una baja dureza es necesario realizar mantenciones periódicas para reparar las consecuencias del desgaste [2].

A la luz de esta problemática, resulta crucial la realización de estudios bajo condiciones de laboratorio. Estos estudios permiten evaluar con mayor precisión cómo distintos materiales y recubrimientos resisten al desgaste abrasivo en un entorno controlado. La capacidad de someter a los materiales a situaciones simuladas de desgaste abrasivo brinda una perspectiva valiosa para el desarrollo de soluciones efectivas y duraderas.

Así, se plantea la propuesta de fabricar una máquina que facilite la evaluación de la resistencia al desgaste de variados materiales y recubrimientos bajo condiciones controladas. El propósito subyacente es contribuir al desarrollo de soluciones más eficaces y económicamente viables para prevenir y controlar el desgaste abrasivo en diferentes industrias afectadas.

1.2 Objetivo del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es el desarrollo de una máquina de desgaste abrasivo de fácil operación, destinada a evaluar diversos materiales. Se busca una máquina que pueda ser utilizada sin complicaciones por usuarios comunes, incluso aquellos sin experiencia previa en el campo del ensayo de materiales.

Para alcanzar este objetivo, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar y configurar un sistema de control amigable con el usuario, que permita a cualquier persona operar la máquina de manera efectiva. Esto incluye la creación de una interfaz de usuario intuitiva y la programación del software de control.
- Validar la capacidad del sistema para impulsar las partículas sólidas concentradas en el fondo del contenedor.
- Determinar la influencia de los factores de ensayo en la evaluación del desgaste abrasivo.
- Validar la capacidad de la máquina de generar desgaste abrasivo en diversos materiales.

Estos objetivos específicos están diseñados para garantizar el éxito en el logro del objetivo principal del proyecto.

1.3 Metodología

La metodología que se utiliza para el desarrollo de este proyecto es:

- Definir los parámetros de ensayo mediante la revisión del estado del arte.
- Diseñar y fabricar las piezas necesarias para ensamblar la máquina.
- Ensamblar y programar sistema de control.
- Diseñar ensayos que permitan determinar la influencia de los factores de ensayo y corroborar que la máquina es capaz de desgastar diversos materiales.
- Analizar resultados del ensayo factorial utilizando el método estadístico ANOVA para determinar la influencia de los factores de ensayo.

1.4 Carta Gantt

La estructura del proyecto se define y justifica por medio de la Carta Gantt presente en el Anexo A.1.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

El desgaste se refiere a un daño superficial que implica la pérdida de material debido a un movimiento relativo entre un cuerpo y un fluido o superficie. En el caso del desgaste abrasivo, se refiere al desgaste provocado por el contacto de partículas sólidas sobre un material [3]. El desgaste abrasivo disminuye la vida útil de los componentes, lo que hace necesario llevar a cabo investigaciones en entornos de laboratorio para poder estimar el porcentaje de desgaste de cada material. Esto, a su vez, posibilita mejorar el proceso de selección de materiales para componentes específicos que estén expuestos a condiciones que generen desgaste abrasivo.

El desgaste abrasivo presentado por la superficie de un material determinado en condiciones de ensayo aparte de depender de las propiedades del material utilizado para la fabricación de la superficie o probeta depende principalmente de cinco factores [4]:

- Propiedades mecánicas de las partículas: el desgaste generado por la partícula variara según la dureza y friabilidad de la partícula.
- Tamaño de partícula: a mayor tamaño de partícula se espera un mayor desgaste.
- Velocidad: a mayor velocidad de impacto entre las partículas y las superficies se espera un mayor desgaste.
- Concentración de partículas: un fluido con una mayor concentración de partículas sólidas generara un mayor desgaste.
- Ángulo de ataque: el ángulo de ataque con el cual las partículas impactan la superficie hace que varíe la cantidad de desgaste presentado en estas. Para el caso de materiales dúctiles se alcanza el mayor desgaste entre 20° y 30° , por otro lado, para materiales frágiles el mayor desgaste se alcanza entre 0° y 90° [5].

2.1 Investigaciones y literatura relevante para el diseño y fabricación de la máquina

2.1.1 Máquinas de desgaste de impacto paralelo (ASTM G65)

Esta configuración busca desgastar el material utilizando un fluido abrasivo que impacte la probeta de forma paralela. El sistema está compuesto por un estanque que contiene el fluido, una rueda para impulsarlo y un peso que ubica a la probeta paralela al fluido. Genera un desgaste superficial en la probeta sin picadura. Las desventajas de este sistema son que no se puede modificar el ángulo de incidencia del fluido en la probeta y el fluido no recircula por el sistema, por lo cual es necesario un estanque de un gran volumen para realizar un ensayo que dure lo necesario para imitar las condiciones de funcionamiento de un sistema expuesto a desgaste abrasivo. En la Fig. 2.1 se presenta una máquina de desgaste de impacto paralelo.



Figura 2.1: Máquina de desgaste de impacto paralelo (Fuente: [6]).

2.1.2 Máquinas de desgaste de impacto en ángulo (ASTM G76)

Estos sistemas buscan principalmente imitar el desgaste de las tuberías que transportan fluidos abrasivos, como relaves mineros. La configuración de la máquina consiste en un sistema que permite recircular el fluido e impulsarlo para que impacte la probeta, la cual está sujeta por un dispositivo que permite modificar el ángulo de inclinación de esta, como se presenta en la Fig. 2.2.

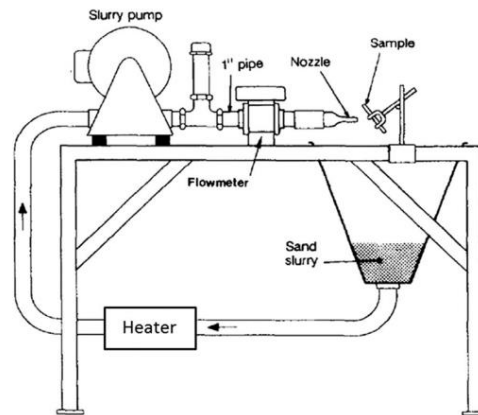


Figura 2.2: Esquema máquina de desgaste de impacto en ángulo (Fuente: [7]).

La ventaja de este sistema es que se puede modificar el ángulo de incidencia del fluido en la probeta y que el fluido puede recircular por el sistema. Por otra parte, entre sus desventajas se encuentra que el resultado será desgaste por picadura, lo que no es demostrativo de lo que sucede en todos los desgastes de material por abrasión.

2.1.3 Máquinas de desgaste de impacto perpendicular (ASTM G76)

Esta configuración busca estudiar el desgaste en superficies donde el fluido impacta de forma perpendicular, como en los codos de un sistema de tuberías. El sistema está compuesto principalmente por una bomba, un sistema de tuberías y una boquilla, en algunos casos se agregan válvulas de presión y un motor para mantener el fluido como una mezcla homogénea, como se esquematiza en la Fig. 2.3.

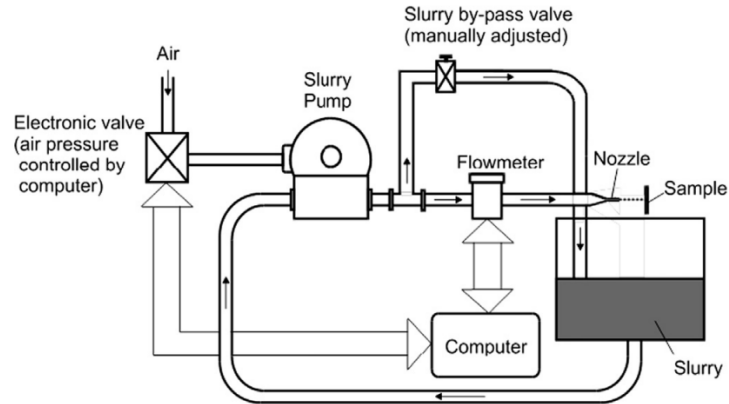


Figura 2.3: Esquema máquina de desgaste de impacto perpendicular (Fuente: [8]).

La ventaja del sistema es que permite recircular el fluido y en caso de agregar un motor, asegurar que el fluido es una mezcla homogénea. Su principal desventaja es que no se puede modificar el ángulo de incidencia del fluido en la probeta. Las otras desventajas son las mismas descritas para máquina de desgaste de impacto en ángulo.

2.1.4 Máquinas de desgaste de flujo giratorio

Las máquinas de desgaste por flujo giratorio están compuestas principalmente por un contenedor del fluido y porta probetas ensamblado a un eje, el cual está conectado a un motor. Al girar el porta probetas provoca que el fluido acelere rotando dentro del contenedor. El sistema descrito es presentado en la Fig. 2.4. Dependiendo del diseño del porta probetas se puede lograr que el fluido impacte a las probetas con un ángulo de incidencia determinado, para lo que se necesita añadir piezas con un determinado ángulo que permitan que el flujo modifique su trayectoria antes de impactar la probeta como se presenta en la Fig. 2.5. Los resultados dependen del diseño del porta probetas.

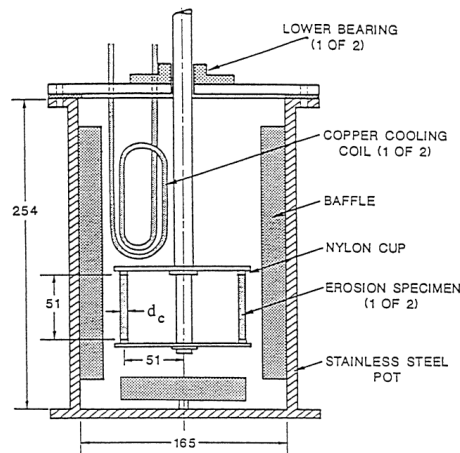


Figura 2.4: Esquema máquina de desgaste de flujo circular (Fuente: [4]).

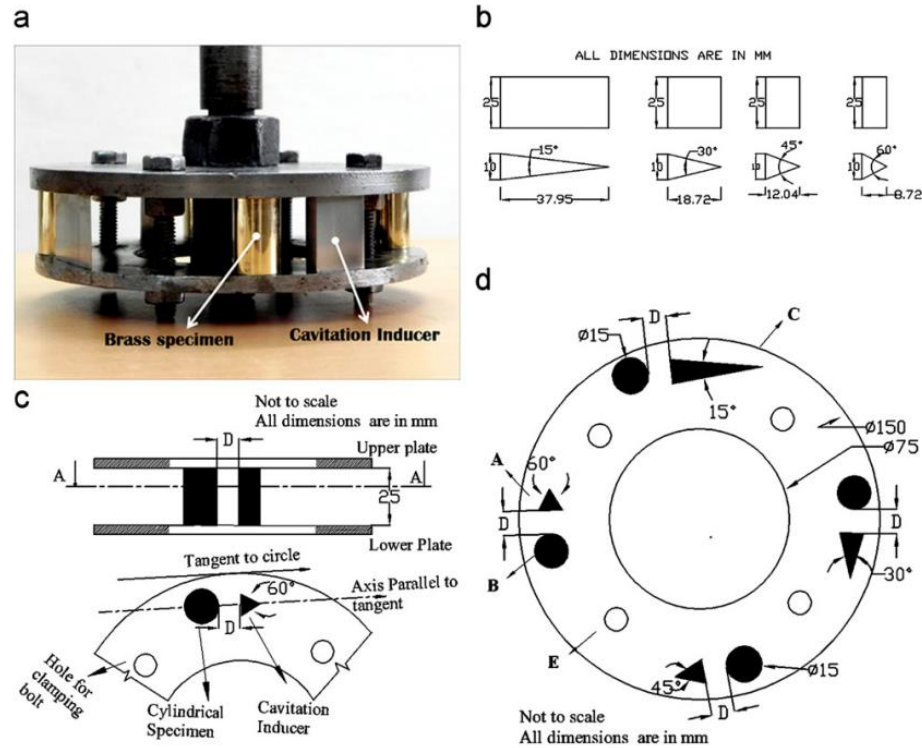


Figura 2.5: Porta probetas con inductor de ángulo de ataque (Fuente: [9]).

Las ventajas de este sistema son que no requiere bomba, no tiene un sistema de tuberías que se pueda desgastar, se puede modificar el ángulo de incidencia del fluido a la probeta y no tiene límite de tiempo de funcionamiento, ya que el fluido está siempre contenido en el mismo lugar. Su principal desventaja es que necesita un diseño que permita impulsar el fluido y que las partículas sólidas no se estancan en el fondo del contenedor.

2.2 Diseño factorial de ensayos

Para analizar el efecto de diversos factores en el porcentaje de desgaste abrasivo, se propone utilizar un diseño factorial. El objetivo de un diseño factorial es estudiar el impacto de múltiples factores en una o varias respuestas, cuando se tiene un interés equitativo en todos los factores. En un experimento de diseño factorial, se utilizan combinaciones aleatorias de los factores para abarcar todas las posibles interacciones. Las ventajas de un experimento factorial incluyen [10]:

- Permiten estudiar tanto los efectos individuales como las interacciones entre los distintos factores.
- Son diseñados de manera que pueden ampliarse a diseños compuestos si es necesario una exploración más exhaustiva. Por ejemplo, es útil expandir el diseño si la respuesta no muestra un comportamiento lineal en los factores controlados.
- La interpretación y el cálculo de los efectos en los experimentos factoriales se pueden realizar mediante aritmética básica.

Existen varios tipos de ensayos factoriales que involucran diferentes números de factores:

2.2.1 Ensayos factoriales 2^k

Los ensayos factoriales 2^k son ensayos donde con k cantidad de factores con dos niveles se tienen 2^k cantidad de tratamientos. Los niveles son siempre un nivel bajo y un nivel alto, por ejemplo, si uno de los factores fuera la velocidad de rotación los niveles a considerar serían 350 [rpm] y 500 [rpm]. En la Fig. 2.6 se presenta distintas notaciones para ensayos factoriales y la combinatoria de factores en los distintos tratamientos. Los ensayos factoriales 2^k son especialmente útiles cuando se estudian entre dos y cinco factores.

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	Notación de Yates
Trat 1 →	bajo	bajo	A_1	B_1	A^-	B^-	-	-	0	0	-1	-1	(1)
Trat 2 →	alto	bajo	A_2	B_1	A^+	B^-	+	-	1	0	1	-1	<i>a</i>
Trat 3 →	bajo	alto	A_1	B_2	A^-	B^+	-	+	0	1	-1	1	<i>b</i>
Trat 4 →	alto	alto	A_2	B_2	A^+	B^+	+	+	1	1	1	1	<i>ab</i>

Figura 2.6: Tratamientos de diseño 2^k (Fuente: [10]).

2.2.2 Ensayos factoriales 3^k

Los ensayos factoriales 3^k son ensayos donde con k cantidad de factores con tres niveles se tienen 3^k cantidad de tratamientos. Los niveles son siempre un nivel bajo, un nivel medio y un nivel alto, por ejemplo, si uno de los factores fuera la velocidad de rotación los niveles a considerar serían 350 [rpm], 500 [rpm] y 750 [rpm]. Los ensayos factoriales se utilizan cuando se quiere estudiar el comportamiento no lineal de dos o más factores. A continuación, en la Fig. 2.7 se presenta la combinatoria de los tratamientos en un ensayo factorial 3^k .

Tratamiento	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
1	bajo	bajo	-1	-1	0	0
2	medio	bajo	0	-1	1	0
3	alto	bajo	1	-1	2	0
4	bajo	medio	-1	0	0	1
5	medio	medio	0	0	1	1
6	alto	medio	1	0	2	1
7	bajo	alto	-1	1	0	2
8	medio	alto	0	1	1	2
9	alto	alto	1	1	2	2

Figura 2.7: Tratamientos de diseño 3^k (Fuente: [10]).

CAPÍTULO 3: DISEÑO

Considerando la relevancia de analizar estos factores para comprender el desgaste abrasivo, se prevé la fabricación de una máquina de desgaste de flujo giratorio. Las ventajas inherentes a este sistema son su prescindencia de una bomba, la ausencia de un sistema de tuberías propenso a desgaste, la capacidad de ajustar el ángulo de ataque del fluido a la probeta y la carencia de un límite de tiempo de funcionamiento, ya que el fluido siempre permanece contenido en el mismo lugar.

La máquina debe ser capaz de impulsar un fluido con un porcentaje de partículas sólidas de un 70%, densidad máxima $2.2 [g/cm^3]$ y viscosidad de 4 [cp] a una velocidad específica por un tiempo determinado, con el fin de provocar desgaste abrasivo en probetas cilíndricas cuyas dimensiones se presentan en la Fig. 3.1. Se estima que la velocidad de rotación máxima de la máquina corresponda a 500 [rpm].

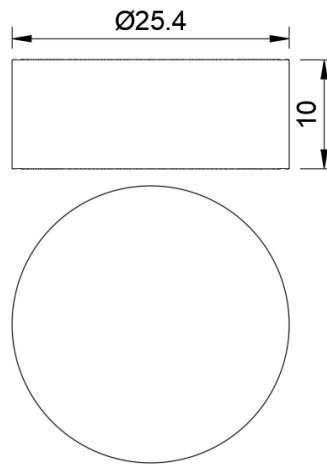


Figura 3.1: Dimensiones Probeta en mm.

El fluido mencionado anteriormente será referido como fluido límite debido a sus propiedades físicas, que requieren que la máquina aplique un torque mayor al necesario con otros fluidos para impulsar las partículas en la dirección deseada. Las características del fluido límite se detallan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Características fluido límite.

Característica	Valor
$\rho [g/cm^3]$	2,2
$\mu [cp]$	4
<i>Tamaño partículas</i> [μm]	10-300

El diseño se inicia con el desarrollo del sistema encargado de propulsar el fluido, correspondiente al porta probetas en este caso. Posteriormente, se trabaja en la creación de la estructura, que se encuentra dividida en cuatro conjuntos de piezas. Finalmente, se diseña el sistema de control, el cual debe cumplir con la función de permitir que las probetas sean extraídas y colocadas por el usuario, facilitar

el cambio de la lechada en el contenedor y controlar la velocidad de rotación del porta probetas durante un tiempo predefinido.

Los planos del ensamble y los planos de cada pieza fabricada se encuentran en el Anexo A.2.

3.1 Porta probetas

El porta probetas se encuentra unido al eje, su función es sostener las probetas, impulsar y recircular el fluido. En este último punto debe ser capaz de mover el fluido que se encuentra en el fondo del contenedor para que las partículas sólidas no se estanquen.

A continuación, se presentan tres diseños de porta probetas que se distinguen por la presencia de inductores de ángulos de ataque (IAA) y los ángulos específicos utilizados. IAA son piezas triangulares que se colocan cerca de las probetas con el propósito de alterar el ángulo de impacto del fluido en cada una de ellas.

Los porta probetas están compuestos por una placa superior y una placa inferior, ambas placas presentan surcos para ubicar cuatro probetas, las cuales se mantendrán en su lugar por la acción de pernos y tuercas. La placa superior va acoplada al eje por medio de dos tuercas M16. La placa inferior presenta un hueco en el centro para permitir la recirculación del fluido. Lo único que cambia entre cada configuración de porta probetas es la placa superior. Las dimensiones principales de las placas se presentan en la Fig. 3.2 y en la Fig. 3.3 se presentan fotografías de estas. El ensamble del porta probetas se presenta en la Fig. 3.4 y los componentes de este se encuentran detallados en la Tabla 3.2.

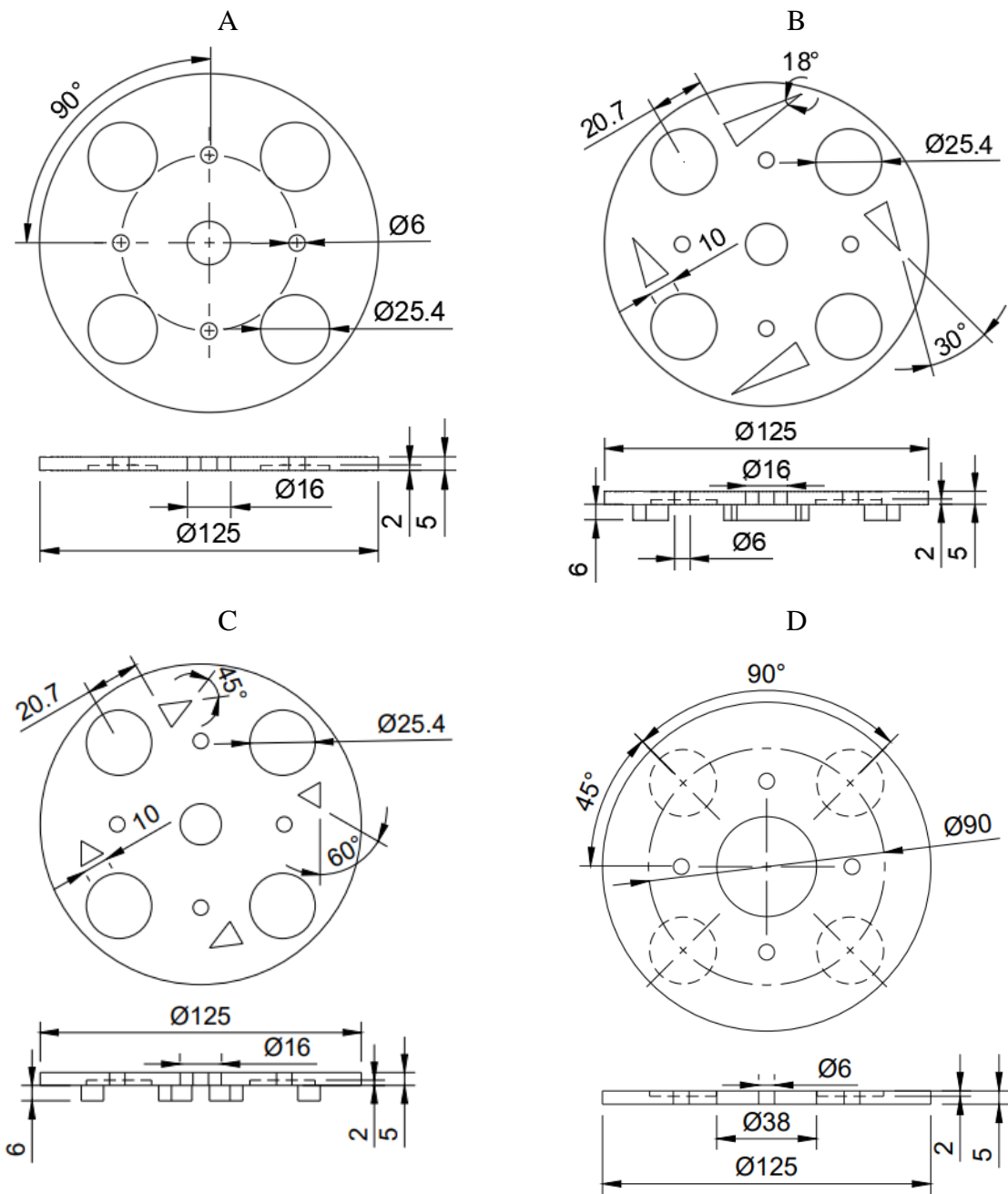


Figura 3.2: Dimensiones principales en mm A. Placa superior sin IAA. B. Placa superior IAA1830. C. Placa superior IAA4560 D. Placa inferior.

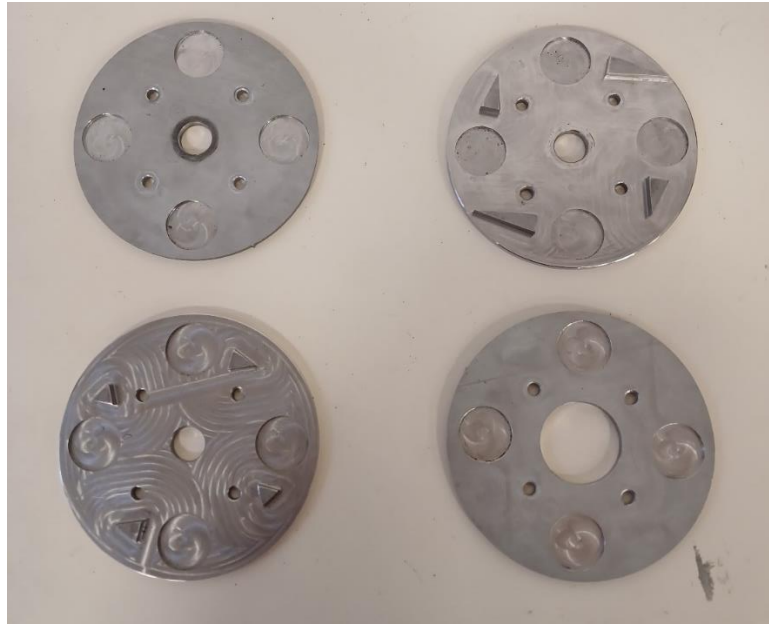


Figura 3.3: Fotografía placas porta probetas.



Figura 3.4: Ensamble porta probetas.

Tabla 3.2: Componentes ensamble porta probetas.

Componente	Cantidad
Placa superior	1
Placa inferior	1
Perno M6 de 30 mm	4
Tuerca M6	8
Tuerca M16	2
Probeta	4

3.2 Estructura

La estructura debe sostener al porta probetas y el contenedor del fluido junto con el sistema de control que permite el movimiento rotatorio del eje. Para lo cual se propone una estructura que se puede dividir en cuatro partes que se acoplan unas a otras: base, riel, carro y contenedores del sistema de control. Se presenta la estructura ensamblada en la Fig. 3.5.

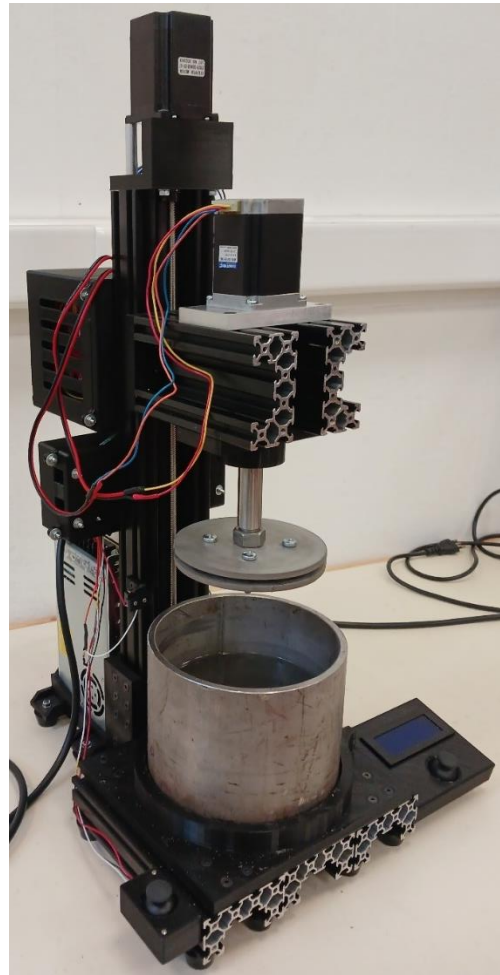


Figura 3.5: Fotografía estructura ensamblada.

3.2.1 Base

La base tiene la función de ubicar el contenedor en una posición fija y sostener el riel. Está compuesta principalmente por el contenedor, tres perfiles de aluminio V-slot tipo C, que se unen mediante la base del contenedor. Además, la base cuenta con una tapa para el contenedor que puede ser fácilmente desacoplada. Se presenta el ensamble en la Fig. 3.6 y sus dimensiones en la Fig. 3.7. El desglose de los componentes y el orden de ensamble es presentado en el Anexo A.2 No.2.



Figura 3.6: Ensamble Base.

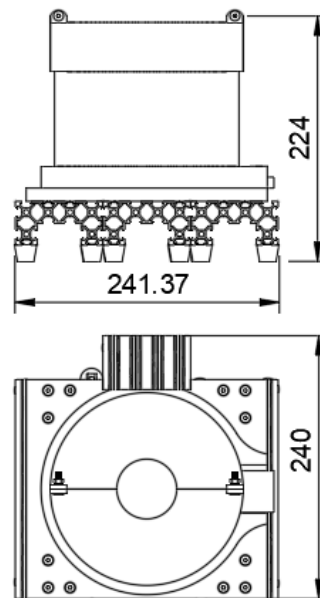


Figura 3.7: Dimensiones principales en mm Base.

3.2.2 Riel

El riel desempeña la función de permitir el desplazamiento vertical del carro, con el fin de elevar el porta probetas para facilitar la extracción del contenedor y el ensamble del porta probetas. Está compuesto principalmente por un perfil de aluminio V-slot tipo C, un motor NEMA 23 y una varilla roscada M8. El riel se encuentra unido a la base mediante dos escuadras. Se presenta el ensamble en la Fig. 3.8 y sus dimensiones en la Fig. 3.9. El desglose de los componentes y el orden de ensamble es presentado en el Anexo A.2 No.6.



Figura 3.8: Ensamble riel.

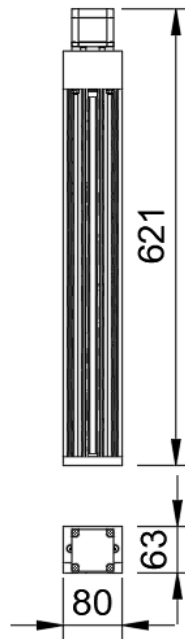


Figura 3.9: Dimensiones principales en mm riel.

3.2.3 Carro

El carro cumple la función de mantener y guiar el eje del porta probetas. Está compuesto principalmente por dos perfiles de aluminio V-slot tipo C, un motor RTA NEMA 23, el porta probetas, dos placas y un rodamiento cónico. El rodamiento cónico va contenido en la placa D y en conjunto son los encargados de sostener el peso del porta probetas. Se presenta el ensamble en la Fig. 3.10 y sus dimensiones en la Fig. 3.11. El desglose de los componentes es presentado en el Anexo A.2 No.11.

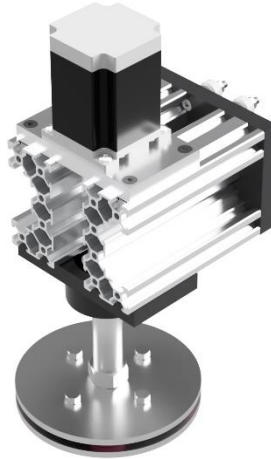


Figura 3.10: Ensamble carro.

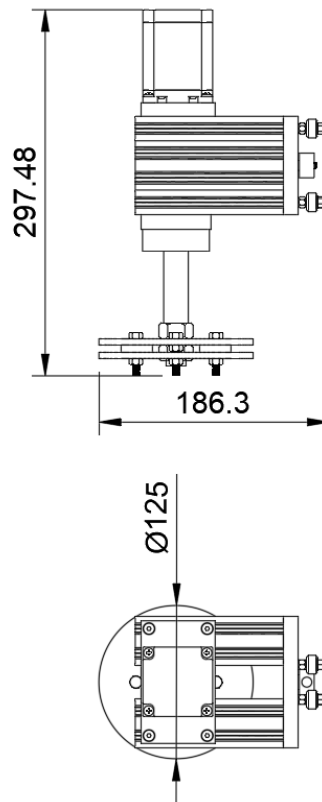


Figura 3.11: Dimensiones principales en mm carro.

3.2.4 Contenedores sistema de control

Los contenedores del sistema de control tienen la función de proteger los componentes que conforman el sistema de control. Existen seis contenedores en total, tres de ellos están acoplados en la parte posterior del riel, uno se encuentra acoplado en el lateral de riel y los otros dos se encuentran acoplados en los laterales de la base.

Los contenedores acoplados en la parte posterior del riel son: contenedor fuentes de poder, contenedor Arduino y contenedor drivers. Los tres contenedores se presentan en la Fig. 3.12.

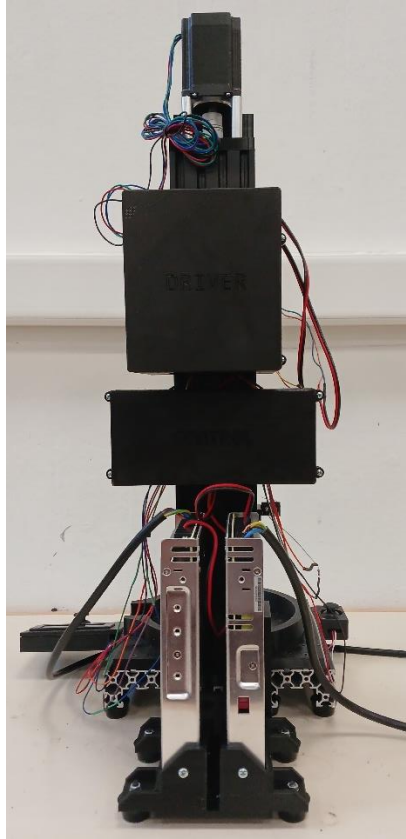


Figura 3.12: Contenedores acoplados en la parte posterior del riel.

El contenedor acoplado en la parte lateral del riel corresponde al contenedor fin de carrera. Se presenta en la Fig. 3.13.

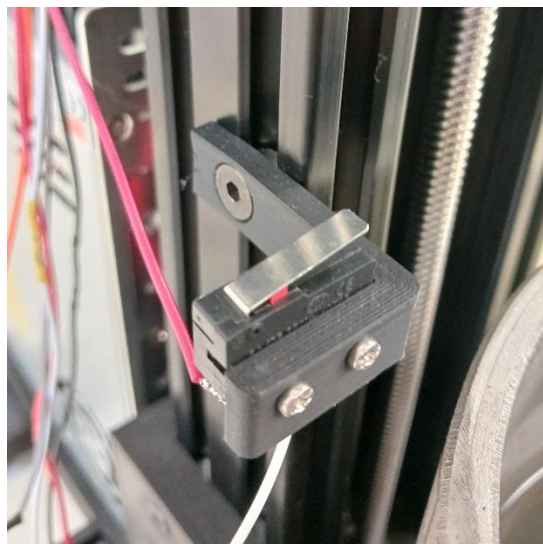


Figura 3.13: Fotografía Contenedor Fin de Carrera acoplado al Riel.

Los contenedores acoplados a los laterales de la base son: contenedor control riel y contenedor panel de ensayo. Los dos contenedores se presentan en la Fig. 3.14.

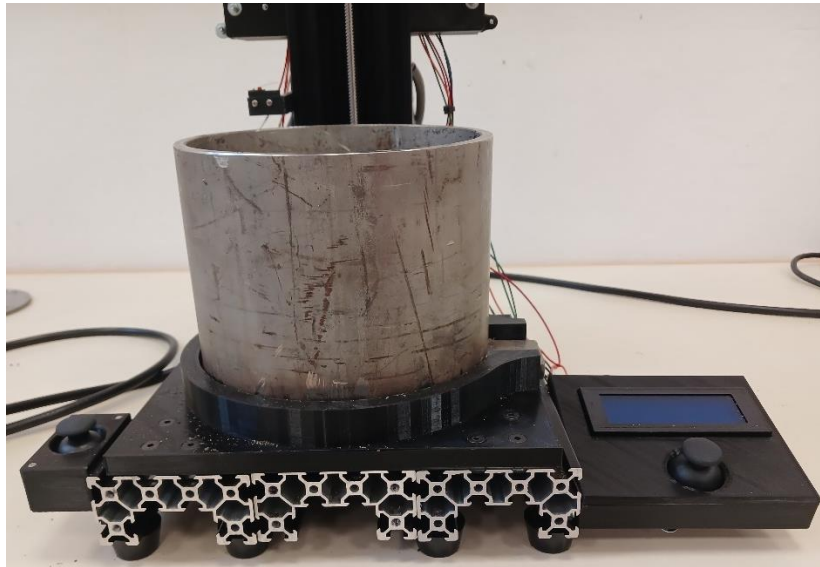


Figura 3.14: Contenedores acoplados en los laterales de la base.

Los componentes de cada contenedor y sus dimensiones se presentan en el Anexo A.2 No. 22 a No. 37.

3.3 Componentes y materiales

Los componentes y materiales de fabricación se seleccionan para que cumplan una función específica.

3.3.1 Componentes

Los componentes utilizados están mayormente vinculados al sistema de control. Se opta por el uso de un controlador Arduino debido a la disponibilidad de software gratuito para su programación, lo que posibilita a cualquier usuario realizar ajustes necesarios en el sistema de control para la ejecución de los ensayos requeridos. Los módulos y sensores incluyen un módulo joystick, una pantalla LED y un fin de carrera. Se emplean motores paso a paso y drivers compatibles con estos motores y con Arduino. Las fuentes de alimentación se eligen considerando los requisitos de los drivers y motores.

El riel utiliza un motor NEMA 23 para mover la varilla rosca que permite el desplazamiento vertical del carro. El motor posee un torque máximo de 2 [Nm].

Para determinar el motor que impulsará el porta probetas es necesario calcular el torque requerido por el sistema al rotar a la velocidad máxima estimada. De la Ley de viscosidad de Newton se sabe que:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2)$$

El toque está dado por:

$$T = F \cdot r \quad (3)$$

De (1), (2) y (3) se obtiene:

$$T = \mu \cdot \frac{dv}{dy} \cdot A \cdot r$$

Considerando pequeños espesores (y):

$$T = \mu \cdot \frac{v}{y} \cdot A \cdot r$$

Expresando la velocidad a partir de la velocidad angular se obtiene:

$$T = \mu \cdot \frac{\omega \cdot r}{y} \cdot A \cdot r \quad (4)$$

Donde:

- T = Torque [Nm]
- μ = Viscosidad dinámica [$Pa \cdot s$]
- ω = Velocidad angular [rad/s]
- r = Radio [m]
- y = espesor [r]
- A = Área de la superficie [m^2]

Utilizando la ecuación (4) se calcula el torque necesario para mover cada configuración porta probetas sumergido en el fluido límite, ya que corresponde a la lechada de mayor viscosidad que permitida por el sistema. La velocidad de angular corresponde a 500 [rpm]. El torque generado por el eje girando en contacto con el ambiente no se considera porque el torque en esta zona es despreciable en comparación al generado en la zona de contacto con el fluido. Los torques generados se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Torque necesario para mover las diversas configuraciones del porta probetas.

Configuración Porta Probetas	Torque [Nm]
Sin IAA	0,097
IAA1830	0,104
IAA4560	0,101

De acuerdo con la información proporcionada en la Tabla 3.3, se establece la necesidad de que el motor genere un torque superior a $0,104 \text{ [Nm]}$. Para cumplir con este requisito, se considera la línea de motores RTA NEMA, que ofrece gran confiabilidad en la rotación a altas velocidades durante largos periodos de tiempo. En la selección del motor, uno de los aspectos para tener en cuenta es que el torque disminuye a medida que aumenta la velocidad angular. Analizando el comportamiento del torque al aumentar la velocidad de diversos motores se decide utilizar un motor RTA NEMA 23 (103-H7126-1740) junto con una fuente de poder de 48 [V] . La variación del torque con el aumento de la velocidad de rotación del motor se presenta en la Fig. 3.15.

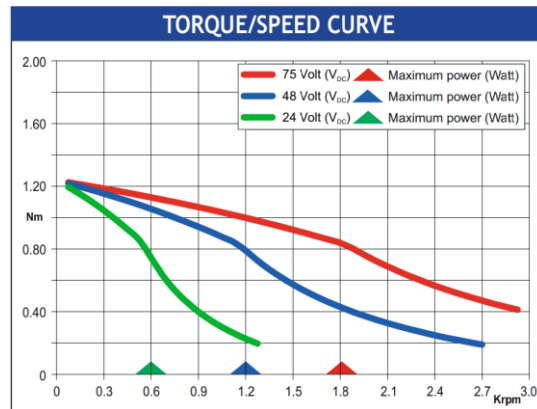


Figura 3.15: Torque generado a distintas velocidades de rotación por motor RTA NEMA 23 (Fuente: [11]).

3.3.2 Materiales

La estructura principalmente está compuesta de perfiles de aluminio y diferentes piezas fabricadas en acero inoxidable, PLA y aluminio. Las piezas que estarán en contacto con la lechada se fabrican en acero inoxidable para aumentar su vida útil, estas piezas son el contenedor, las placas superiores, la placa inferior y el eje. Los sistemas de acople que fijan estas piezas en una posición determinada son principalmente de aluminio, ya que, por su bajo costo, se espera que sean periódicamente remplazados por el usuario durante las mantenciones de la máquina.

Las piezas fabricadas en PLA mediante impresión FDM, corresponden a piezas que cumplen principalmente la función de ubicar componentes y partes de la estructura en una posición específica. Se elige este material por su bajo costo y porque su proceso de fabricación permite fabricar varias versiones de las piezas en un tiempo menor al de otros procesos de fabricación. Estas piezas son las placas riel, A, B, D; las escuadras, la base del contenedor, la tapa y los contenedores del sistema de control.

La pieza fabricada en aluminio corresponde a la placa C, la cual cumple la función de ubicar al motor que mueve el porta probetas en una posición específica. Es necesario asegurar que la placa C no se deteriore durante el período de ensayo, el cual puede variar entre 15 minutos y 20 horas según lo solicitado por el usuario. El motor escogido tiene una temperatura de funcionamiento de $80 \text{ [}^\circ\text{]}$. Al ser fabricada de PLA, la placa al estar en contacto con un objeto a esa temperatura por un tiempo prolongado tendera a deformarse. En cambio, el aluminio no se deformará y en comparación a otros metales su costo es bajo.

Los materiales posibles para fabricar las piezas y los posibles procesos de fabricación fueron comparados utilizando el software CES EduPack [12]. El principal factor de comparación fue el precio.

3.4 Sistema de control

El sistema de control debe ser capaz de desplazar verticalmente el carro a través del riel y activar el motor acoplado al porta probetas para que el sistema rote a una velocidad y tiempo determinado. Para cumplir el primer punto se utiliza un Arduino (Arduino Riel) conectado a un driver que permite controlar el motor del riel. El motor está configurado para realizar 1600 [*pasos/rev*], lo que permite un movimiento lento del carro, es decir, permite al usuario reaccionar si el carro está por impactar con algún componente. El movimiento del motor del riel el usuario lo activa moviendo la palanca del módulo joystick ubicado en el contenedor control riel. Para impedir que el porta probetas impacte con el fondo del contenedor se añade al sistema un fin de carrera, que frena el movimiento del carro cuando entra en contacto con este.

Para controlar el motor acoplado al porta probetas se utiliza otro Arduino (Arduino Ensayo). El movimiento del motor se activa mediante el panel de ensayo, que corresponde a un sistema compuesto por un módulo joystick y pantalla led. La pantalla presenta un menú con cinco configuraciones de ensayo determinadas por el usuario, es decir, cinco configuraciones de velocidad de rotación y tiempo de ensayo. El movimiento de la palanca del módulo joystick permite navegar por el menú, al presionar módulo se selecciona una opción de ensayo y empieza el funcionamiento del motor a una velocidad y tiempo determinado. La pantalla led mientras el ensayo está en curso presenta el número de ensayo, un cronómetro que mide el tiempo de ensayo cada 10 minutos y las instrucciones para cancelar el ensayo. Es posible cancelar el ensayo realizando presión sobre el módulo joystick mientras el ensayo está en curso.

Con el fin de que el carro se mantenga en una posición fija mientras se realiza el ensayo, el Arduino Ensayo envía una señal al Arduino Riel mientras el ensayo está en curso, esta señal desactiva el funcionamiento del módulo joystick que permite el funcionamiento del motor del riel. En la Tabla 3.4 se encuentra la lista de componentes, en la Fig. 3.16 se presenta el esquema de conexión del sistema y en [13] se encuentran los códigos de cada Arduino.

Tabla 3.4: Componentes sistema de control.

Componente	Cantidad
Microcontrolador Arduino UNO R3 SMD	2
DM542, driver digital 4.2A	1
Fuente de poder switching (Meanwell) 27V 14A 350W	1
Módulo Joystick	2
A-CSD 94, Driver motor paso a paso RTA 4.4A	1
Fuente de poder switching (Meanwell) 48V 7.3A 350W	1
Pantalla led 20x4	1
Fin de carrera	1
Resistencia 10 [kΩ]	1
Motor NEMA 23	1
Motor RTA NEMA 23	1

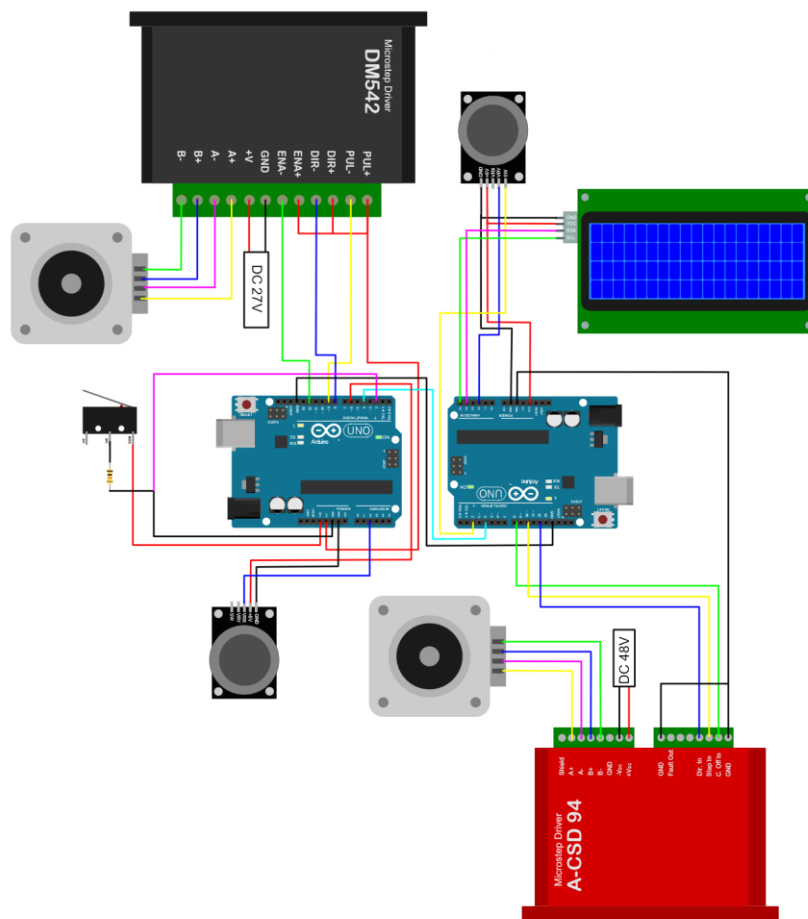


Figura 3.16: Esquema de conexión sistema de control.

3.5 Manual de usuario

El manual de usuario corresponde a la herramienta que se entrega al usuario para hacer funcionar la máquina, solucionar posibles errores y realizarle mantención. El manual de usuario completo se encuentra en el Anexo A.3. A continuación se presenta un extracto que abarca dos ítems, en los cuales se enseña a utilizar la máquina.

3.5.1 Modo de Uso (Ítem 4)

- 1.-Rellene el contenedor con 1.5 L de la lechada de estudio.
- 2.-Ubique las probetas fabricadas para en ensayo como se presenta en la siguiente imagen (Fig. 3.17):

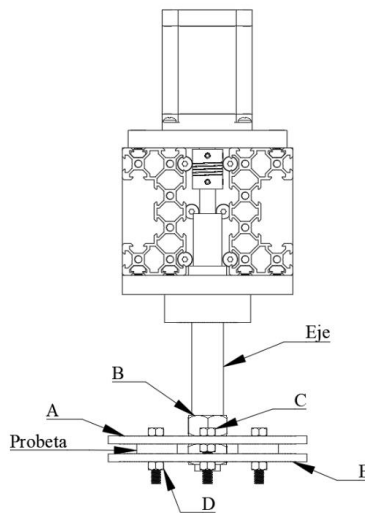


Figura 3.17: Esquema montaje Porta Probetas.

- 3.-Conecte las fuentes de poder y los Arduino.
- 4.-Mueva la palanca del control riel hasta que el carro tope con el fin de carrera (la detención del carro es automática al entrar en contacto).
- 5.-Tape contenedor como se presenta en la siguiente imagen (Fig. 3.18):

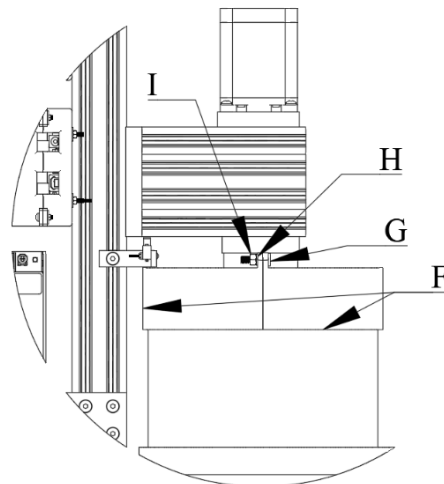


Figura 3.18: Esquema montaje tapas.

- 6.-Seleccione una configuración de ensayo moviendo y presionando la palanca del panel de ensayo.
- 7.-Espere a que finalice el ensayo.
- 8.-Destape el contenedor.
- 9.-Mueva la palanca del control riel hasta que el carro se eleve lo suficiente como para extraer las probetas.
- 10.-Desconecte las fuentes de poder y los Arduino.
- 11.-Extraiga las probetas.

3.5.2 Configuración ensayo (Ítem 6)

- 1.-Descargue el código “ArduinoEnsayo.ino” desde el QR (Fig. 19).



Figura 3.19: Enlace descarga de archivos.

- 2.-Abra el archivo desde un computador.
- 3.-Conecte el Arduino que se encuentra en el contenedor Arduino por el lado del panel de ensayo al computador utilizando un cable tipo B a USB.
- 4.-Modifique la siguiente parte del código escribiendo el tiempo de duración en segundos y la velocidad de rotación en revoluciones por minuto (Fig. 3.20).

```

18 //Motor configuracion
19 AccelStepper miMotor(1, 10, 12);
20 float pasos = 400.0; //pasos del motor
→ 21 float t[NumMenuP] = {180, 3600, 10, 10, 10}; //(tiempo en segundos)
→ 22 float v[NumMenuP] = {100, 500, 750, 1000, 10}; //(RPM)

```

Figura 3.20: Extracto código Arduino Ensayo.

- 5.-Cargue los cambios al Arduino.

3.6 Costos

Los costos asociados a los componentes para fabricar la máquina se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Costos de fabricación de máquina de desgaste abrasivo para materiales.

Función	Ítem	Cantidad	Precio (CLP)
Sistema de control	Motor RTA NEMA 23	1	193.375
Sistema de control	Motor NEMA 23	1	40.990
Sistema de control	Microcontrolador Arduino UNO R3 SMD	2	59.980
Sistema de control	DM542, driver digital 4.2A	1	32.990
Sistema de control	Fuente de poder switching (Meanwell) 24V 14,6A 350W	1	42.990
Sistema de control	Módulo Joystick	2	4.800
Sistema de control	ACSD94, Driver motor paso a paso RTA 4.4A	1	189.989
Sistema de control	Fuente de poder switching (Meanwell) 48V 7.3A 350W	1	44.990
Sistema de control	Pantalla LED 20x4	1	12.900
Sistema de control	Adaptador 9v	2	10.800
Sistema de control	Fin de carrera	2	2.000
Sistema de control	Cable USC-AB	1	4.000
Sistema de control	Pack cable macho-macho	1	2.500
Sistema de control	Cable dual 6m	1	3.000
Sistema de control	Enchufe	2	1.600
Sistema de control	Pack cable macho-hembra	1	3.000
Estructura	Rollo PLA 1kg	4	49.560
Estructura	Tuerca T M5	60	18.000
Estructura	Tuerca M5 de seguridad	25	1.250
Estructura	Tuerca M5	24	1.680
Estructura	Tuerca M6	8	3.920
Estructura	Tuerca M16	2	1.380
Estructura	Perno M3x10mm	12	648

Estructura	Perno M3x16mm	12	708
Estructura	Tuerca M3	24	552
Estructura	Golilla M3	8	112
Estructura	Perno M4x10mm	8	616
Estructura	Perno M4x16mm	8	872
Estructura	Perno M5x15mm	60	15.600
Estructura	Perno M5x20mm	20	5.500
Estructura	Perno M5x25mm	20	5.800
Estructura	Perno M5x35mm	10	3.200
Estructura	Perno M5x65mm	10	4.000
Estructura	Perno M6x30mm	8	1.336
Estructura	Perfil de aluminio tipo C 750 mm	2	51.980
Estructura	Acople flexible de aluminio 8mm a 10mm	1	3.750
Estructura	Acople flexible de aluminio 10mm a 10mm	1	3.750
Estructura	Pata de goma para perfiles 20x20	16	16.000
Estructura	Kit mini rueda policarbonato	4	13.960
Estructura	Tuerca Delrin para varilla roscada	1	3.990
Estructura	Varilla roscada 540 mm	1	14.750
Estructura	Rodamiento cónico 20 mm	1	18.601
Estructura	Espaciador de aluminio	2	1.242
Estructura	Golilla plana M5 zincada	50	2.990
Estructura	Golilla plana M8 zincada	20	3.500
Estructura	Eje Acero Inoxidable (304) 20 x 1000mm	1	36.990
Estructura	Rodamiento de bolas (8 x 16 x 5mm)	2	1.980
Estructura	Placa de Acero inoxidable 12 mm	2	90.588
Estructura	Collar de sujeción para eje de diámetro 8mm	2	1.999
Estructura	Placas Acero inoxidable 5mm	4	84.833
Despacho	Despacho		23.987
	Total		1.139.527

CAPÍTULO 4: DISEÑO EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y ANÁLISIS.

Con el objetivo de comprobar si la máquina es capaz de realizar ensayos bajo condiciones de desgaste abrasivo se diseñan dos ensayos distintos. Un ensayo de tipo factorial para analizar el efecto de diversos factores en el porcentaje de desgaste abrasivo sobre probetas de yeso realizando análisis de varianza. Y un ensayo utilizando metales para verificar que la máquina es capaz de desgastar diversos tipos de materiales.

4.1 Diseño ensayo factorial

Se diseña un ensayo factorial 2^k modificado donde se analizarán tres factores, dos de estos factores tienen dos niveles y un factor tiene tres niveles (Tabla 4.1). El factor con tres niveles corresponde a ángulo de ataque, ya que se espera que la variación del porcentaje de desgaste frente a la variación de ángulo de ataque no presente una variación lineal.

Tabla 4.1: Factores y niveles a evaluar.

Letra	Factor	Nivel bajo (-1)	Nivel medio (0)	Nivel alto (1)
A	Ángulo de ataque	Sin IAA	18 [°]	60 [°]
B	Velocidad de rotación	350 [rpm]	-	500 [rpm]
C	Concentración de partículas sólidas en la lechada	30%	-	60%

Las probetas se confeccionan mediante una mezcla específica de yeso, utilizando una proporción de dos partes de yeso por cada parte de agua. En cuanto a la lechada, está compuesta por agua y arena A (Fig. 4.1), que corresponde a arena de playa. La cantidad de agua utilizada se establece en 1500 [ml], mientras que la cantidad de arena varía según la concentración de partículas sólidas requeridas para cada ensayo. La Tabla 4.2 muestra la cantidad de arena necesaria para cada concentración de la lechada. En la Fig. 4.2 se presenta un esquema que representa la distancia entre las probetas y las partículas sólidas de la lechada (arena A) concentradas en el fondo del contenedor.

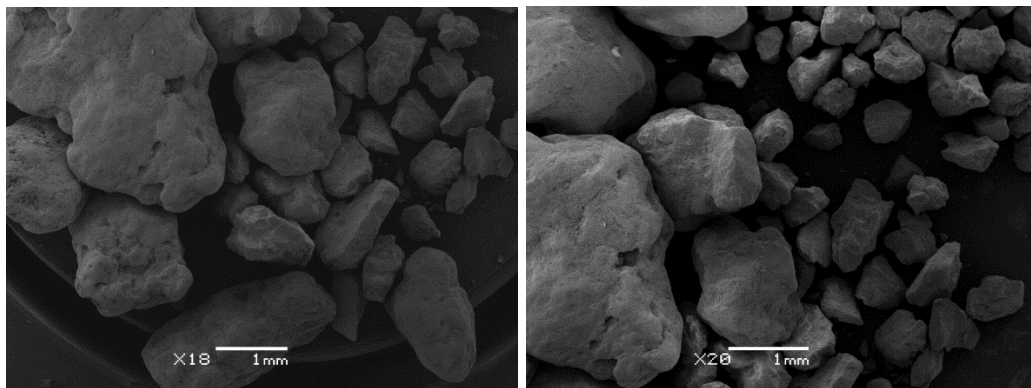


Figura 4.1: Fotografía arena A tomada bajo microscopio.

Tabla 4.2: Masa de arena A para cada concentración de partículas sólidas en la lechada.

Concentración de partículas sólidas en la lechada	Masa arena A [g]
30%	450
60%	900

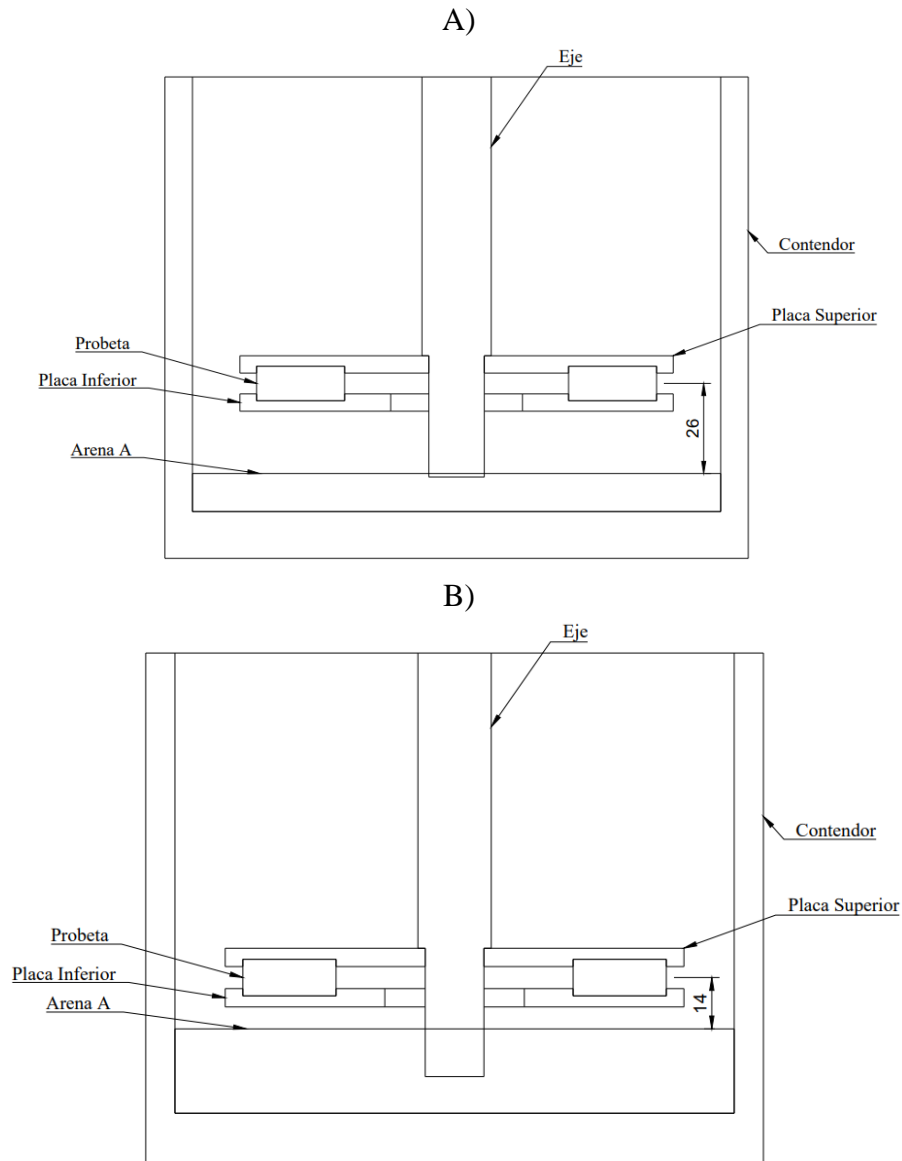


Figura 4.2: Distancia en mm entre el centro de las probetas y las partículas sólidas contenidas en la lechada concentradas en el fondo del contenedor. A) 30% de concentración. B) 60% de concentración.

Se lleva a cabo un total de 24 tratamientos con 12 configuraciones únicas, lo que implica que cada tratamiento es repetido dos veces, resultando en cuatro réplicas para cada combinación de factores. Las configuraciones de tratamientos se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Configuraciones de tratamientos.

Configuración	Cantidad de probetas [<i>unidades</i>]	Placa superior (A)	B	C
1	2	Sin IAA (-1)	-1	-1
2	2	Sin IAA (-1)	-1	1
3	2	Sin IAA (-1)	1	-1
4	2	Sin IAA (-1)	1	1
5	4	IAA1830 (0)	-1	-1
6	4	IAA1830 (0)	-1	1
7	4	IAA1830 (0)	1	-1
8	4	IAA1830 (0)	1	1
9	4	IAA4560 (1)	-1	-1
10	4	IAA4560 (1)	-1	1
11	4	IAA4560 (1)	1	-1
12	4	IAA4560 (1)	1	1

Previo al inicio del tratamiento, las probetas se marcan y se pesan en una balanza de precisión con un margen de error de $\pm 0,000005$ [g]. Posteriormente, se ubican en la placa inferior siguiendo la distribución presentada en la Fig. 4.3; resulta vital ubicar las probetas conforme a esta distribución para permitir la comparación de las zonas de desgaste al variar el ángulo de ataque. A continuación, se da comienzo al tratamiento, el cual tiene una duración de 30 [min]. Una vez concluido el proceso, se procede a limpiar las probetas utilizando una lavadora de ultrasonido con 15 [ml] de acetona durante 90 [s]. Después, se secan y vuelven a pesar para obtener el Porcentaje de Desgaste (PD), empleado como indicador para medir el desgaste abrasivo experimentado por las probetas. El PD corresponde al porcentaje de masa perdida por cada probeta (ecuación 5).

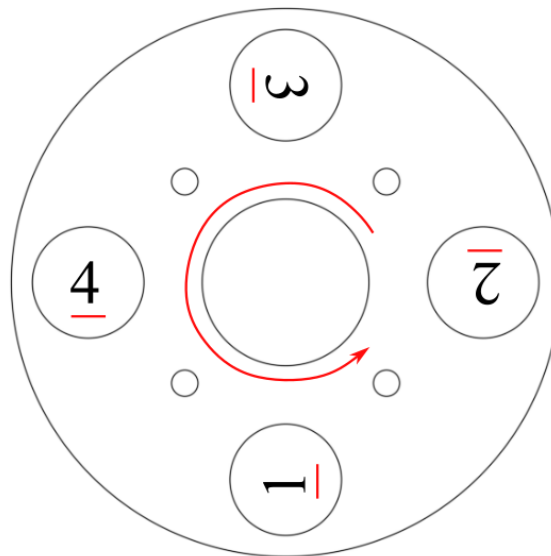


Figura 4.3: Esquema de distribución de probetas según sentido de rotación del sistema.

$$PD[\%] = \frac{\text{masa perdida [g]}}{\text{masa inicial [g]}} \cdot 100\% \quad (5)$$

4.1.1 Resultados

A pesar de haber analizado únicamente tres niveles de ángulo de ataque, se recolectaron datos de todos los ángulos posibles (sin IAA, 18 [°], 30 [°], 45 [°], 60 [°]). Todos estos datos se encuentran detallados en el Anexo A.4. Los datos utilizados en el análisis de varianza se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Porcentaje de desgaste obtenido al finaliza los tratamientos del ensayo factorial.

	350 [rpm] B (-1)		500 [rpm] B (1)	
	30% C (-1)	60% C (1)	30% C (-1)	60% C (1)
Sin IAA A (-1)	0,37	5,48	6,64	8,78
	3,44	3,42	5,87	10,88
	2,93	3,57	8,18	11,41
	1,63	7,40	8,59	7,80
18 [°] A (0)	5,10	2,91	4,39	12,64
	3,69	2,95	3,61	9,72
	0,26	3,25	3,30	11,46
	4,22	5,66	6,22	9,80
60 [°] A (1)	1,56	4,09	4,47	4,71
	3,15	5,65	1,04	5,67
	3,28	2,76	3,36	5,79
	3,14	6,41	0,61	8,53

Para dar inicio al análisis de varianza (ANOVA), se plantea la hipótesis nula (H_0) que establece que los factores de estudio no ejercen influencia sobre el PD. Con el fin de verificar esta hipótesis, se realizan tres análisis para examinar las combinaciones de niveles de los distintos factores, asemejándose a un ensayo factorial 2^k convencional. Los detalles de cada análisis se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 5: Niveles de cada factor a analizar en cada análisis.

ANOVA	Niveles A		Niveles B		Niveles C	
1	-1	0	-1	1	-1	1
2	-1	1	-1	1	-1	1
3	0	1	-1	1	-1	1

A continuación, se presentan los tres análisis de varianza en la Tabla 4.6, la Tabla 4.7 y la Tabla 4.8.

Tabla 4.6: ANOVA 1.

FV	SC	GL	CM	F0	Valor p
A	1,629	1	1,629	0,654	0,427
B	166,573	1	166,573	66,896	0,000
C	74,129	1	74,129	29,770	0,000
AB	1,441	1	1,441	0,579	0,454
AC	1,323	1	1,323	0,531	0,473
BC	16,094	1	16,094	6,463	0,018
ABC	21,922	1	21,922	8,804	0,007
Error	59,761	24	2,490		
Total	342,870	31			

Tabla 4.7: ANOVA 2.

FV	SC	GL	CM	F0	Valor p
A	32,346	1	32,346	13,304	0,001
B	60,587	1	60,587	24,920	0,000
C	60,836	1	60,836	25,022	0,000
AB	39,979	1	39,979	16,443	0,000
AC	0,116	1	0,116	0,048	0,829
BC	0,958	1	0,958	0,394	0,536
ABC	2,720	1	2,720	1,119	0,301
Error	58,351	24	2,431		
Total	255,892	31			

Tabla 4.8: ANOVA 3.

FV	SC	GL	CM	F0	Valor p
A	19,457	1	19,457	8,025	0,009
B	43,342	1	43,342	17,876	0,000
C	80,101	1	80,101	33,037	0,000
AB	26,241	1	26,241	10,823	0,003
AC	0,656	1	0,656	0,271	0,608
BC	32,045	1	32,045	13,217	0,001
ABC	9,198	1	9,198	3,794	0,063
Error	58,189	24	2,425		
Total	269,229	31			

Para desestimar la hipótesis nula (H_0), se requiere que el Valor p sea inferior a 0,05. Los factores que resultan en el rechazo de H_0 varían en cada uno de los análisis de varianza presentados. Se puede concluir que solamente dos factores ejercen efecto significativo en el PD, correspondientes a la velocidad de rotación (B) y la concentración de partículas sólidas en la lechada (C). Esto se confirma al analizar el efecto estandarizado de cada ANOVA presentado en la Fig. 4.4, la Fig. 4.5 y la Fig. 4.6.

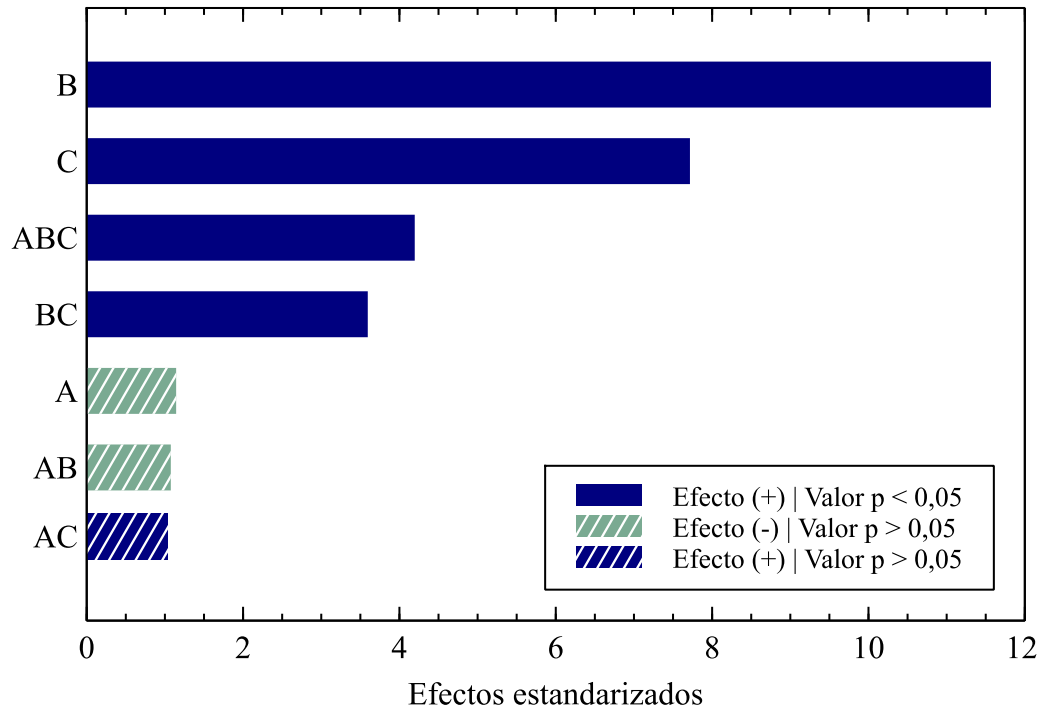


Figura 4.4: Pareto de efectos estandarizados para ANOVA 1.

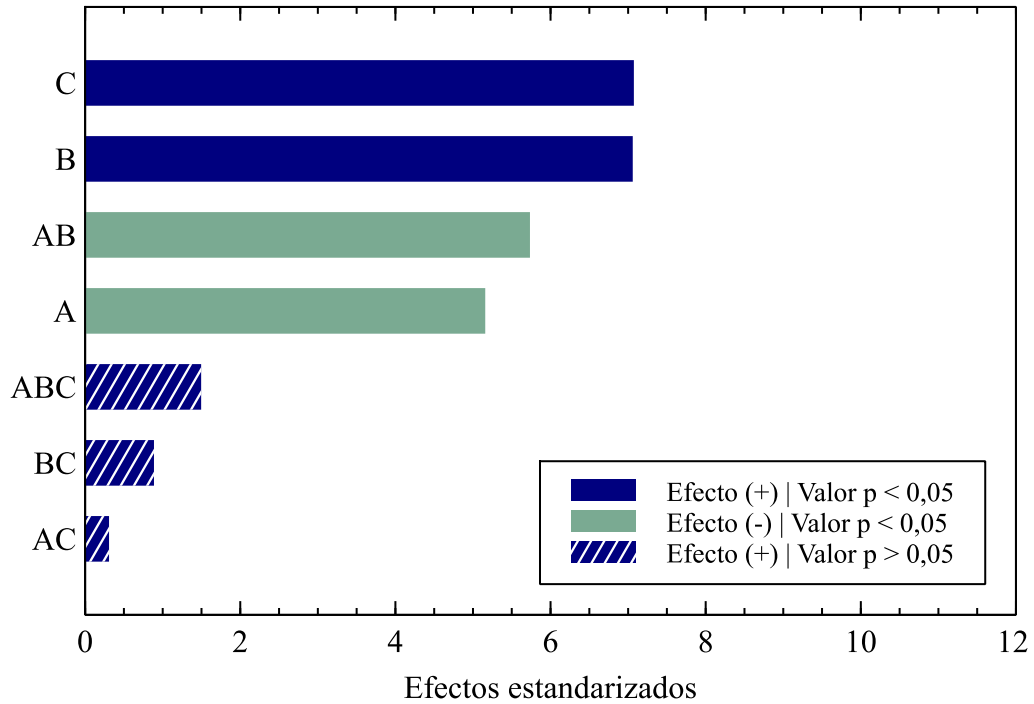


Figura 4.5: Pareto de efectos estandarizados para ANOVA 2.

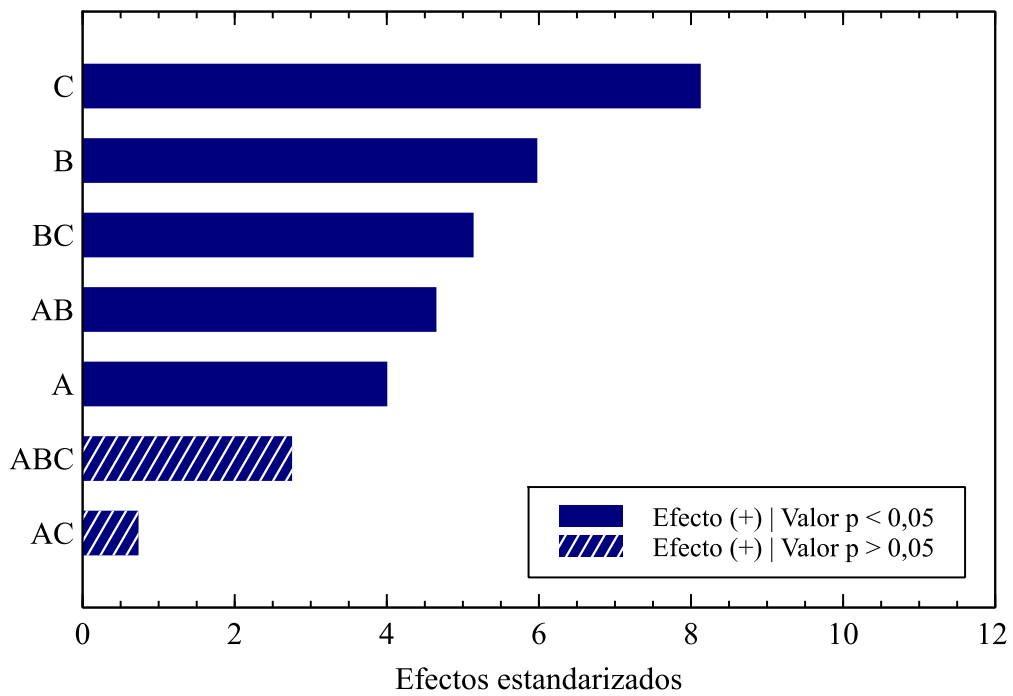


Figura 4.6: Pareto de efectos estandarizados para ANOVA 3.

La variación del ángulo de ataque (A) ocasiona cambios en la zona donde se produce el desgaste en las probetas. En la Fig. 4.7 se presentan fotografías de las probetas tomadas desde la misma zona (Fig.

4.3), mientras que en la Fig. 4.8 se muestra un esquema que representa la zona de desgaste observada en las probetas al variar el ángulo de ataque.

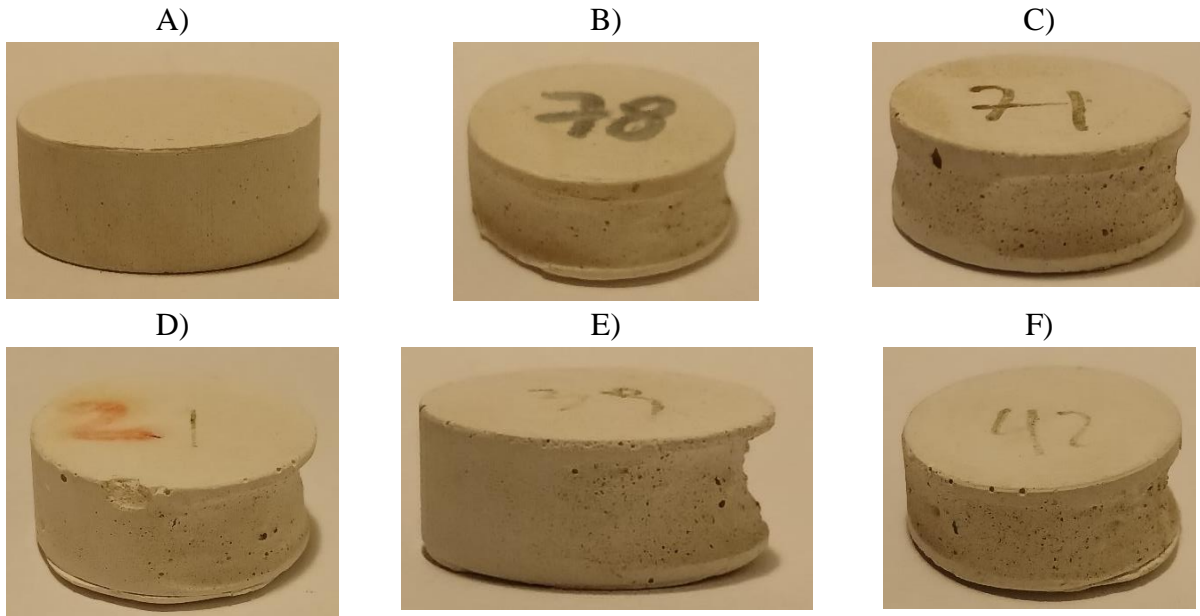


Figura 4.7: Fotografías probetas sometida a tratamiento con factores B (1) y C (-1). A) Probeta antes de ser sometida a tratamiento. B) Sin IAA. C) 18 [°]. D) 30 [°]. E) 45 [°]. F) 60 [°].

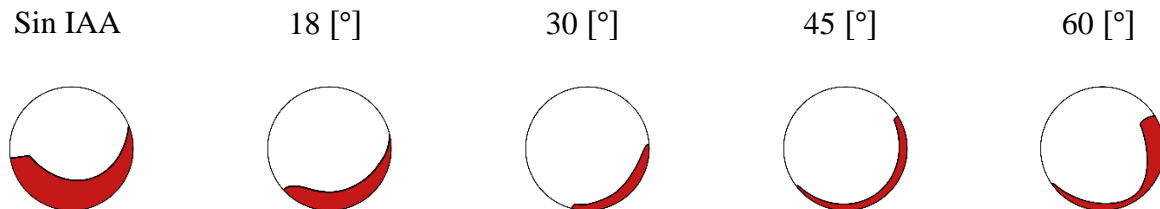


Figura 4.8: Zona en donde se produce desgaste en probetas de yeso para distintos ángulos de ataque.

4.2 Diseño de ensayo a metales

Se establece un ensayo con el fin de verificar la capacidad de la máquina para desgastar una variedad de materiales y para recopilar datos sobre cómo los diferentes ángulos de ataque afectan el porcentaje de desgaste. Se propone llevar a cabo tres tratamientos de 4 [h] de duración, manteniendo una concentración constante de partículas sólidas en la lechada y una velocidad de rotación constante, variando tanto el ángulo de ataque como el material de la probeta. A continuación, se presentan en la Tabla 4.9 las características de cada tratamiento.

Tabla 4.9: Configuración ensayos a metales.

N° de tratamiento	Placa superior	Velocidad de rotación	Concentración de partículas sólidas en la lechada	Cantidad de probetas de aluminio 6061	Cantidad de probetas de acero de bajo contenido de carbono
1	Sin IAA	500 [rpm]	65%	2	2
2	IAA1830			2	2
3	IAA4560			2	2

Los materiales utilizados para las probetas corresponden a acero de dulce o acero de bajo contenido de carbono (Tabla 4.10) y a aluminio (Tabla 4.11). Las probetas de acero de bajo contenido de carbono no presentan la forma estándar para establecida en la Fig. 3.1. La variación en la forma de las probetas de acero con bajo contenido de carbono se presenta en Fig. 4.9.

Tabla 4.10: Propiedades mecánicas acero de bajo contenido de carbono (Fuente: [14]).

Propiedad	Valor
Módulo de Young [<i>GPa</i>]	200
Dureza [<i>HB</i>]	120
Límite de elasticidad [<i>MPa</i>]	250

Tabla 4.11: Propiedades mecánicas aluminio 6061 (Fuente: [15]).

Propiedad	Valor
Módulo de Young [<i>GPa</i>]	70
Dureza [<i>HB</i>]	100-120
Límite de elasticidad [<i>MPa</i>]	225

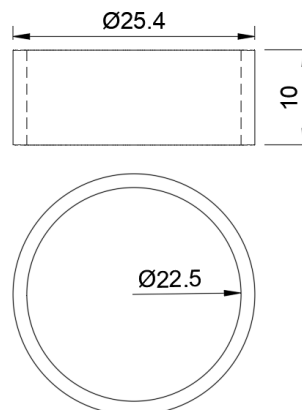


Figura 4.9: Dimensiones en mm probetas de acero con bajo contenido de carbono.

En cuanto a la lechada, está compuesta por agua y arena B (Fig. 10), la arena B corresponde a arena de cuarzo. La cantidad de agua utilizada se establece en 1600 [ml] y la cantidad de arena corresponde a 1040 [g]. La distancia entre el centro de las probetas y la arena B contenida en el fondo del contenedor se presenta en la Fig. 11. El procedimiento para realizar cada tratamiento es igual al procedimiento realizado para los tratamientos del ensayo factorial.

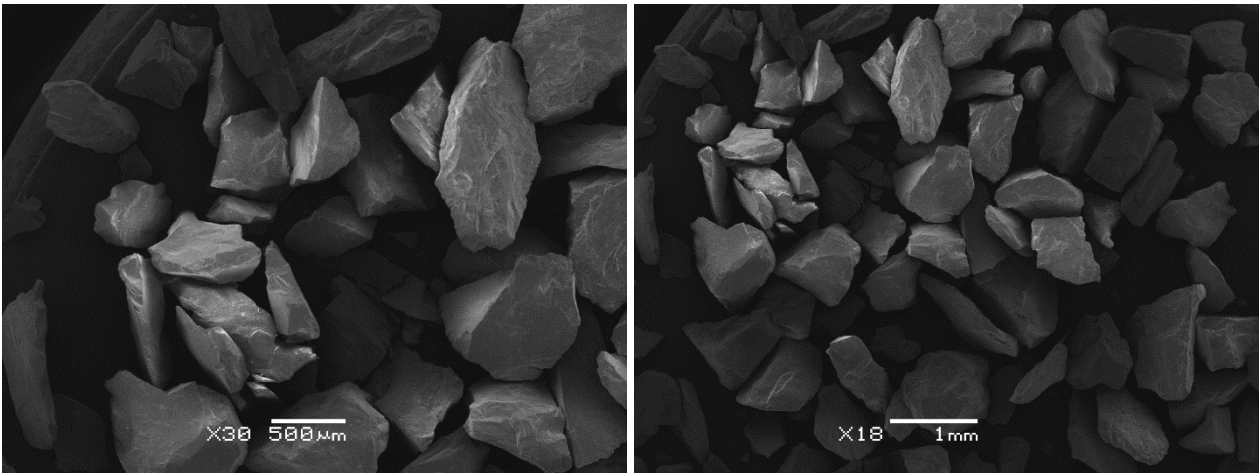


Figura 4.10: Fotografía arena B tomada bajo microscopio.

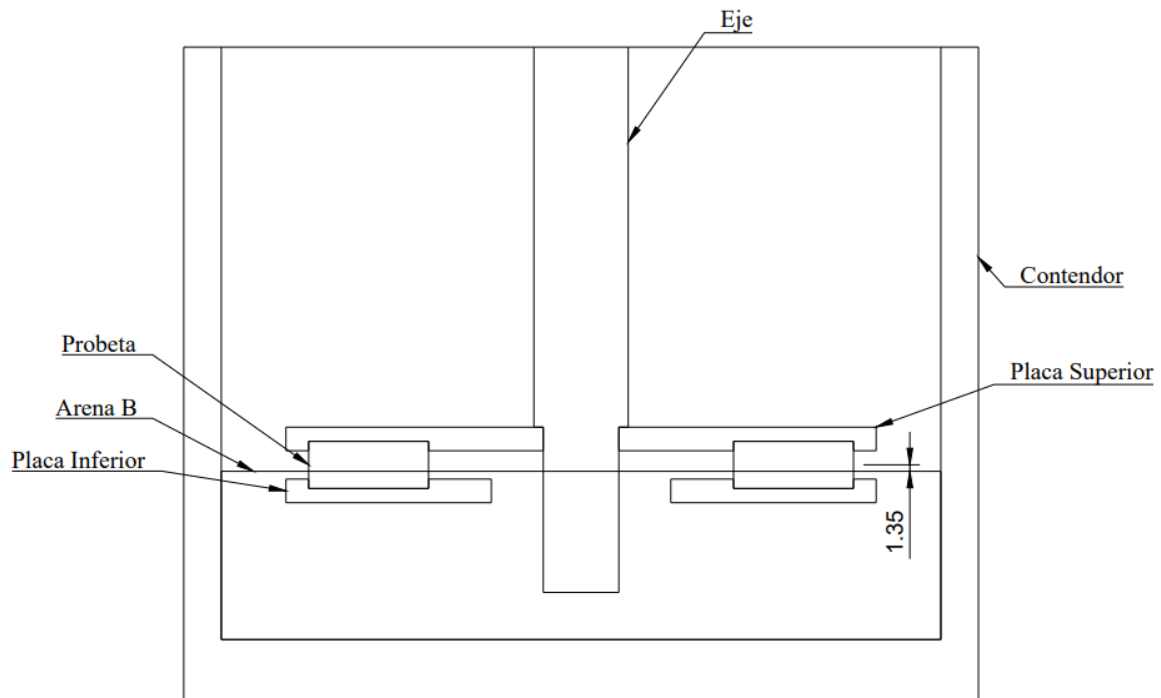


Figura 4.11: Distancia en mm entre el centro de las probetas y las partículas sólidas contenidas en la lechada concentradas en el fondo del contenedor.

Tanto para la Fig. 4.2 como para la Fig. 4.11 no se considera el desplazamiento vertical de las partículas sólidas al introducir el sistema en la lechada.

4.2.1 Resultados

Se observa que los resultados obtenidos para las probetas de aluminio (Fig. 4.12) no pueden ser comparados directamente con los resultados obtenidos para las probetas de acero de bajo contenido de carbono (Fig. 4.13) debido a la diferencia en la forma de las probetas. Esta variación en la forma implica que el porcentaje de desgaste de las probetas de acero de bajo contenido de carbono tiende a ser mayor, ya que presentan un menor volumen en comparación con las probetas de aluminio.

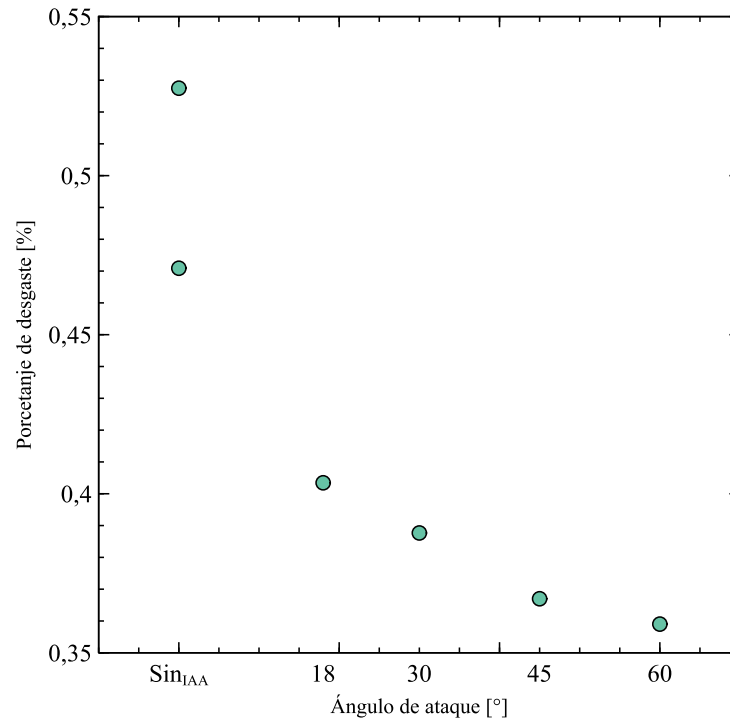


Figura 4.12: Porcentaje de desgaste para diferentes ángulos de ataque en probetas de acero de bajo contenido de carbono.

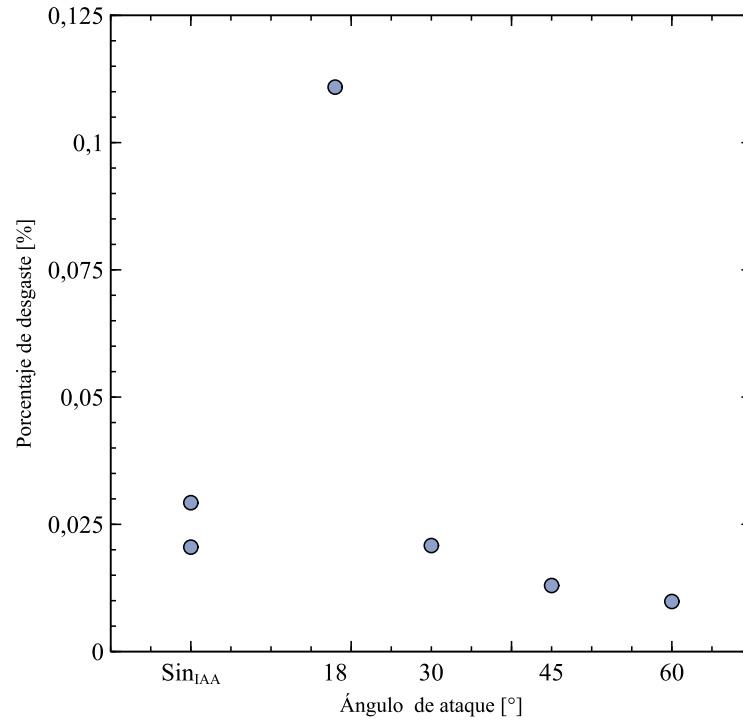


Figura 4.13: Porcentaje de desgaste para diferentes ángulos de ataque en probetas de aluminio.

La pérdida de masa observada en las probetas no muestra una disminución significativa. El desgaste se manifiesta en forma de rayaduras en la superficie (Fig. 14). Al igual que en el ensayo factorial, la ubicación del desgaste varía en función del ángulo de ataque, evidenciando un patrón de áreas afectadas tanto en las probetas de aluminio como en las de acero de bajo contenido de carbono. En la Fig. 15 se presenta un esquema que ilustra las zonas observadas con desgaste en el ensayo a metales.

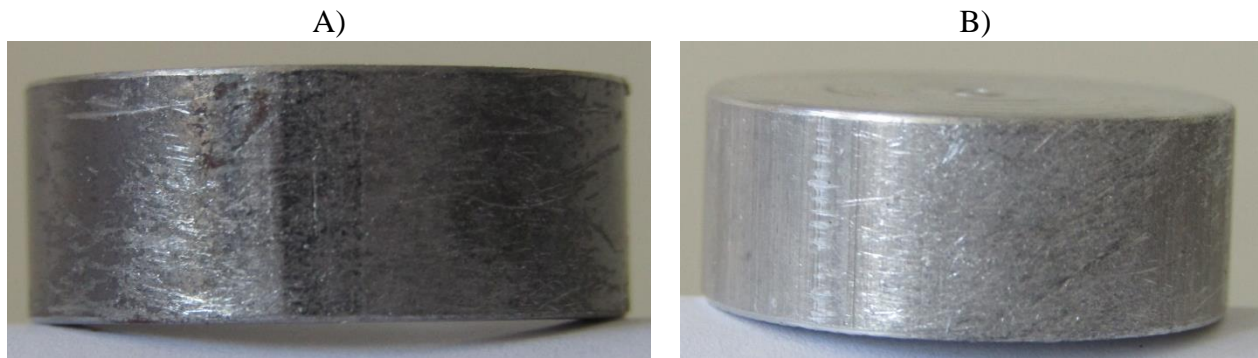


Figura 4.14: Desgaste presentado en la superficie de probetas. A) Acero con bajo contenido de carbono. B) Aluminio.

Sin IAA

18 [°]

30 [°]

45 [°]

60 [°]

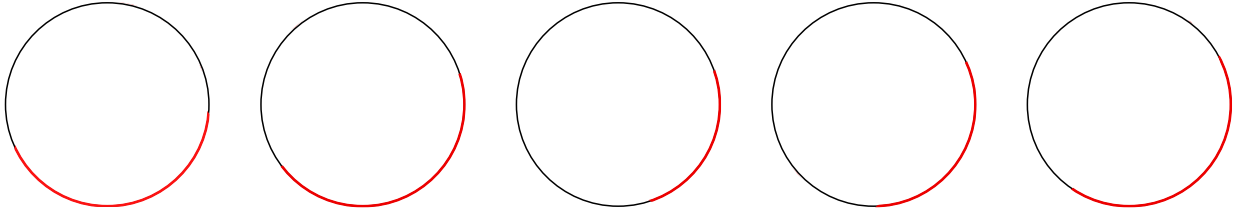


Figura 4.15: Zona en donde se produce desgaste en probetas de metal para distintos ángulos de ataque.

4.3 Desgaste presentado en componentes

Durante la realización de los ensayos, se observa desgaste en los componentes que entran en contacto con la lechada. Estos componentes incluyen el contenedor y el porta probetas, siendo este último compuesto por placas, eje y sistemas de acople.

Se puede notar que el contenedor presenta desgaste principalmente en su base interior, manifestándose como una marca circular (Fig. 16). Esta marca circular es generada por la presión del eje sobre las partículas sólidas ubicadas en el fondo y debido a la rotación del eje.



Figura 4.16: Base interior del contenedor.

Las placas del porta probetas fueron masadas antes y después de los ensayos en una balanza con un margen de error de $\pm 0,05$ [g]. Los resultados del PD se presentan en la Tabla 4.12. Se observa que la placa inferior es la placa donde el desgaste es más evidente visualmente. En la Fig. 4.17 se muestran fotografías que evidencian el desgaste en los bordes externos de la placa inferior al finalizar los ensayos.

Tabla 4.12: Porcentaje de desgaste presentada en las placas al finalizar los ensayos.

Placa	Porcentaje de desgaste [%]
Superior Sin IAA	0,024
Superior IAA1830	0,021
Superior IAA4560	0,022
Inferior	0,052



Figura 4.17: Desgaste presentado en los bordes externos de la placa inferior.

Se observa principalmente corrosión en los sistemas de acople (Fig. 18). Se puede evidenciar desgaste abrasivo en las superficies exteriores de las tuercas (Fig. 19). Respecto al eje, se identifica evidencia de desgaste abrasivo en la zona lisa, mientras que en la zona roscada se observa acumulación de material oxidado proveniente de las tuercas (Fig. 20).



Figura 4.18: Sistemas de acoples al finalizar los ensayos.



Figura 4.19: Superficie exterior tuerca M16 al finalizar los ensayos.



Figura 4.20: Parte expuesta a lechada del eje al finalizar los ensayos.

4.4 Análisis de resultados

En una primera etapa, se procede al análisis individual de los resultados de los ensayos. Para el ensayo factorial, se emplean probetas de yeso, material utilizado en estudios de desgaste abrasivo ([16], [17]). El análisis de varianza se lleva a cabo para refutar la hipótesis nula, la cual sostiene que los factores no inciden en el porcentaje de desgaste. Se requiere que el factor o factores presenten un valor de p inferior a 0,05 en los tres análisis de varianza efectuados para refutar esta hipótesis. En este contexto, los únicos factores que refutan la hipótesis nula, indicando una incidencia significativa en el porcentaje de desgaste, son el factor B (velocidad de rotación) y el factor C (concentración de partículas sólidas en la lechada). Este hallazgo también se respalda al observar los diagramas de Pareto para los efectos estandarizados de cada ANOVA (Fig. 4, Fig. 5 y Fig. 6), donde los factores B y C consistentemente muestran el mayor efecto estandarizado. Además, en [4] se respalda que los factores B y C sean determinantes para el porcentaje de desgaste.

Con relación al factor A (ángulo de ataque), este refuta la hipótesis nula en dos de los tres análisis realizados. Además, visualmente se puede apreciar que el cambio en el ángulo de ataque conlleva variaciones en las áreas con desgaste. Sin embargo, el análisis de varianza donde el factor A no refuta la hipótesis nula podría atribuirse a la cantidad insuficiente de réplicas, según [10], para realizar un análisis preciso, se recomienda emplear entre 10 y 30 réplicas dependiendo de los factores involucrados.

La observación visual de cambios en las áreas de desgaste, a pesar de la no refutación de la hipótesis nula en cierto análisis de varianza, podría indicar la necesidad de utilizar un indicador que represente la variabilidad en las zonas de desgaste al variar el ángulo de ataque. Se sugiere la elaboración de un indicador que refleje la relación entre el ángulo de ataque y las áreas afectadas por el desgaste.

En el ensayo a metales, se ejecutó un número reducido de réplicas debido a los costos asociados con la fabricación de las probetas. La generalización de los resultados en el porcentaje de desgaste no puede ser garantizado debido a la escasez de réplicas, lo que impide asegurar la representatividad de los datos obtenidos, ya que al utilizar un número reducido de replicas se puede introducir un sesgo en el análisis debido a la falta de representatividad de la muestra [18]. Sin embargo, al analizar el efecto del ángulo de ataque en las probetas de acero de bajo contenido de carbono, se observa una tendencia similar a la documentada en [19], donde también se evaluaron probetas del mismo material con variación en el ángulo de ataque. A partir del ensayo a metales, se deduce la capacidad de la máquina para desgastar una variedad de materiales.

Con relación al desgaste observado en los componentes, se postula que la corrosión manifestada en los sistemas de acople puede atribuirse al hecho de que los componentes no fueron desmontados sistemáticamente al concluir cada tratamiento, lo que implicó que estuvieran húmedos durante períodos prolongados. Respecto al desgaste en las placas, se identifica un mayor desgaste en la placa inferior en comparación con las placas superiores. El porcentaje de desgaste no refleja adecuadamente la magnitud del desgaste visible en la placa inferior en contraste con las superiores. Esta diferencia podría atribuirse a la presencia constante de la placa inferior en todos los tratamientos, a diferencia de las placas superiores que se intercambiaban. Además, la placa inferior se encuentra a proximidad al fondo del contenedor por lo que se espera que presente un mayor porcentaje de desgaste, lo cual se respalda en [20], un estudio sobre desgaste en máquinas de flujo giratorio que evidencia que las probetas cercanas al fondo muestran mayor desgaste que las ubicadas a mayor altura. Se estima que los únicos componentes que requieren un reemplazo periódico son los sistemas de acople, ya que el contenedor, el eje y las placas experimentan un desgaste considerablemente menor en comparación con estos.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIÓN

El objetivo de diseñar y fabricar una máquina capaz de evaluar el desgaste abrasivo en diferentes materiales se logró mediante una serie de objetivos específicos, que abarcaron desde el ensamblaje de la estructura hasta la verificación de la capacidad de desgaste de la máquina en distintos tipos de materiales.

En relación con el ensamblaje de los componentes, se verificó la correcta funcionalidad de la máquina al ponerla en marcha y analizar el comportamiento de la estructura. Esta logró su objetivo al asegurar el funcionamiento adecuado de la máquina.

El sistema de control, equipado con un microcontrolador Arduino, permitió una fácil configuración para cualquier usuario con conocimientos básicos de programación. La interfaz, diseñada para usuarios sin experiencia en programación o ensayos de materiales, facilita la realización de ensayos preconfigurados. Para mejoras futuras, se propone modificar el botón de cancelación de ensayos, ya que su funcionamiento actual podría ocasionar errores debido a la necesidad de un solo clic para cancelar un ensayo, sugiriendo un proceso que requiera un clic inicial y otro de confirmación. Asimismo, se recomienda la sustitución del microcontrolador Arduino por un Controlador Lógico Programable (PLC) en caso de utilizar este diseño de máquina para aplicaciones industriales.

El sistema demostró su capacidad para impulsar partículas sólidas, como se evidenció en el ensayo factorial, especialmente en los tratamientos con una concentración del 30% de partículas sólidas en la lechada. A pesar de la distancia significativa entre las probetas y las partículas sólidas, se logró un desgaste visible y cuantificable en las probetas.

Se confirma que la velocidad de rotación y la concentración de partículas sólidas en la lechada son factores influyentes en el porcentaje de desgaste. Sin embargo, se sugiere llevar a cabo un mayor número de réplicas para un análisis más preciso de la influencia del ángulo de ataque en el porcentaje de desgaste.

Finalmente, se destaca la capacidad de la máquina para provocar desgaste abrasivo en materiales diversos, como evidencian los ensayos realizados en probetas de yeso, acero de bajo contenido de carbono y aluminio. En resumen, el proyecto alcanza su objetivo general al proporcionar una máquina capaz de generar desgaste abrasivo en materiales diversos, operable incluso por usuarios sin experiencia previa en ensayos de materiales.

Para futuros trabajos, se propone la realización de análisis de diversos materiales utilizando la máquina diseñada. Durante el desarrollo, se llevaron a cabo pruebas en plásticos como PLA y ABS; sin embargo, la falta de estudios sobre la resistencia al desgaste abrasivo en estos materiales sugiere la necesidad de explorar su comportamiento frente a este tipo de desgaste. Además, se recomienda realizar un análisis de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para evaluar el comportamiento del fluido frente a los IAA, verificando que el impacto del flujo en la probeta se realiza con el ángulo de ataque esperado.

Referencias

- [1] E. Rabinowicz, *Friction and Wear of Materials*, John Wiley & Sons, 1995.
- [2] H. Yu, *Wind Erosion Prevention and Repair of Composite Material Components*, Switzerland: Trans Tech Publications, 2011.
- [3] W. González, «Introducción a la ciencia de los materiales,» Prensa de la Universidad de Princeton, New Jersey , 2004.
- [4] H. Clark, «Particle velocity and size effects in laboratory slurry erosion measurement» Tribology International, Budapest, 2002.
- [5] P. Kumar, «Slurry Erosion Test Rig,» Maharishi Markandeshwar University , Ambala, 2017.
- [6] C. Walker, *Comparison of some laboratory wear tests and field wear in slurry pumps*, Artarmon: Weir Minerals Australia Ltd, 2013.
- [7] X. Yongsong, «Elastomers and plastics for resisting erosion attack of abrasive/erosive,» National Research Council Canada, Vancouver, 2019.
- [8] M. Liang, «Modeling of erodent particle trajectories in slurry flow,» Mining and Environment Portfolio National Research Council Canada, Vancouver, 2015.
- [9] H. J. Amarendra, «Synergy of cavitation and slurry erosion in the slurry pot tester,» Department of Metallurgical and Materials Engineering, 2012.
- [10] R. d. I. V. H. Gutiérrez, *Análisis y diseño de experimentos*, Santa Fe: Mc Graw Hill, 2008.
- [11] RTA, 103-H7126-1740, PAVIVA: SANYO DENKI CO.
- [12] C. EduPack, *Base de Datos Nivel 2 Materiales*, GRANTA.
- [13] N. Quintana, «<https://github.com/NataliaQuintana/M-quina-de-desgaste-abrasivo-para-materiales.git>,» 18 10 2023. [En línea]. Available: <https://github.com/NataliaQuintana/M-quina-de-desgaste-abrasivo-para-materiales.git>. [Último acceso: 19 10 2023].
- [14] Material Properties, «Propiedades Acero Dulce,» [En línea]. Available: <https://material-properties.org/es/acero-dulce-densidad-resistencia-dureza-punto-de-fusion/>. [Último acceso: 2023].
- [15] GGD Metals, «Aluminio 6061,» [En línea]. Available: <https://www.ggdmetals.com.br/es/produto/6061-t6/>. [Último acceso: 2023].

- [16] T. Lindquist, «Influence of surface hardener on gypsum abrasion resistance and water sorption,» *The Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 90, n° 5, pp. 441-446, 2003.
- [17] S. Killedar, «A Comparative Evaluation of Abrasion Resistance of Three Commercially Available Type IV Dental Stone, Dried using Three Different Drying Techniques - An In vitro Study,» *Journal of Pharmacy & Bioallied Sciences*, vol. 13, n° 1, p. 580–585, 2021.
- [18] C. Manterola, «Los Sesgos en Investigación Clínica,» *International Journal of Morphology*, vol. 33, n° 3, pp. 1156-1164, 2015.
- [19] S. More, «CFD Simulation and Experimental Results Validation of Slurry,» Velagapudi Ramakrishna Siddhartha Engineering College, Vijayawada, 2020.
- [20] N. Ojala, «HIGH SPEED SLURRY-POT EROSION WEAR TESTING,» Tampere University of Technology, Tampere, 2015.
- [21] Q. Nguyen, «Slurry erosion characteristics and erosion mechanisms,» National University of Singapore, Singapore, 2014.
- [22] RTA, *Stepping Motors*, RTA.

Anexo

A.1 Carta Gantt

RESULTADO	OBJETIVOS	ACTIVIDADES	HITO	INICIO DE LA ACTIVIDAD (semana)	DURACIÓN DE LA ACTIVIDAD (semanas)	LOGRO DE HITO (semana)	
Resultado 1 Fabricación de máquina de desgaste abrasivo para material	Objetivo 1.- Ensamblar máquina.	1.- Fabricar piezas plásticas mediante impresión 3D.		1	5		
		2.- Ajustar diseños de piezas plásticas.	Hito 1 - Entrega Avance I.	1	5	2	
		3.- Fabricar piezas metálicas.		1	4		
			4.- Ensamblar estructura.		2	5	
	Objetivo 2.- Configurar sistema de control.	1.- Realizar conexiones eléctricas Motor-Riel.			2	1	
		2.- Programar Motor-Riel.			2	1	
		3.- Realizar conexiones eléctricas Motor-Eje.			7	1	
		4.- Programar Motor-Eje.			7	1	
		5.- Diseñar contenedor para componentes del sistema de control.			2	8	
			6.- Fabricar contenedor mediante impresión 3D.	Hito 2 - Finalización fabricación estructura.	8	1	9
Resultado 2 Validación de Hipótesis	Objetivo 3.- Calibrar máquina	1.- Fabricar probetas.	Hito 3 - Entrega de Avance II.	4	9	9	
		2.- Realizar ensayos.		9	6		
		3.- Organizar resultados obtenidos.		9	6		
		4.- Analizar resultados.	Hito 4 - Finalización de ensayos.	14	1	15	
			Hito 5 - Entrega Informe Final.			16	

Figura 6.1: Extracto Carta Gantt.

A.2 Planos

Los planos serán presentados siguiendo el orden presentado a continuación:

No. 1 Máquina de desgaste abrasivo

 No. 2 Base

 No. 3 Base Contenedor

 No. 4 Contenedor

 No. 5 Tapa

No. 6 Riel

 No. 7 Placa A

 No. 8 Placa B

No. 9 Escuadra A

No. 10 Escuadra B

No. 11 Carro

 No. 12 Placa Riel

 No. 13 Placa C

 No. 14 Placa D

 No. 15 Porta Probetas

 No. 16 Eje

 No. 17 Placa Superior Sin IAA

 No. 18 Placa Superior IAA1830

 No. 19 Placa Superior IAA4560

 No. 20 Probeta

 No. 21 Placa Inferior

No. 22 Contenedor Fuentes de Poder

 No. 23 Soporte Fuentes de Poder

No. 24 Contenedor Arduino

 No. 25 Base Contenedor Arduino

 No. 26 Tapa Contenedor Arduino

No. 27 Contenedor Driver

No. 28 Base Contenedor Driver

No. 29 Tapa Contenedor Driver

No. 30 Contenedor Panel de Control

No. 31 Base Contenedor Panel de Control

No. 32 Tapa Contenedor Panel de Control

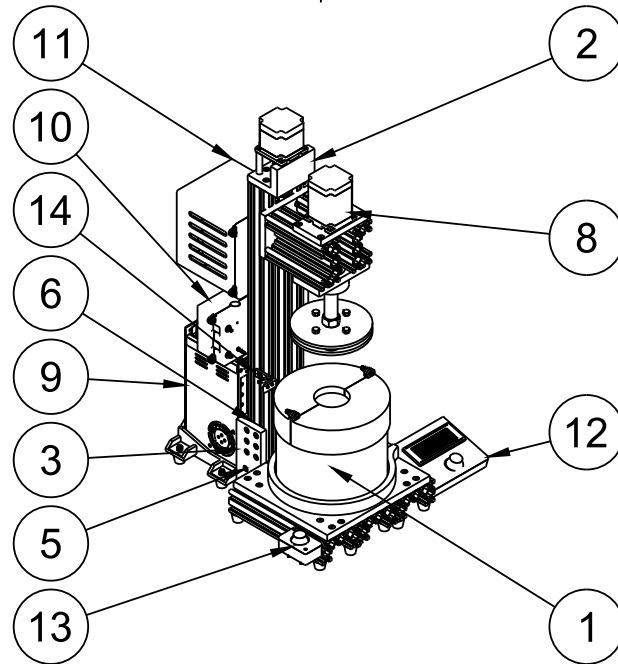
No. 33 Contenedor Control Riel

No. 34 Base Contenedor Control Riel

No. 35 Tapa Contenedor Control Riel

No. 36 Contenedor Fin de Carrera

No. 37 Soporte Fin de Carrera



Lista de piezas		
elemento	número de pieza	ctd
1	Base	1
2	Riel	1
3	Escuadra A	1
4	Escuadra B	1
5	Perno M5x15	26
6	Tuerca T M5 para perfiles V-Slot 20x20	26
7	Perno M5x20	4
8	Carro	1
9	Contenedor Fuentes de Poder	1
10	Contenedor Arduino	1
11	Contenedor Driver	1
12	Contenedor Panel de Ensayo	1
13	Contenedor Control Riel	1
14	Contenedor Fin de Carrera	1



Universidad de Concepción

FECHA:
11-10-2023

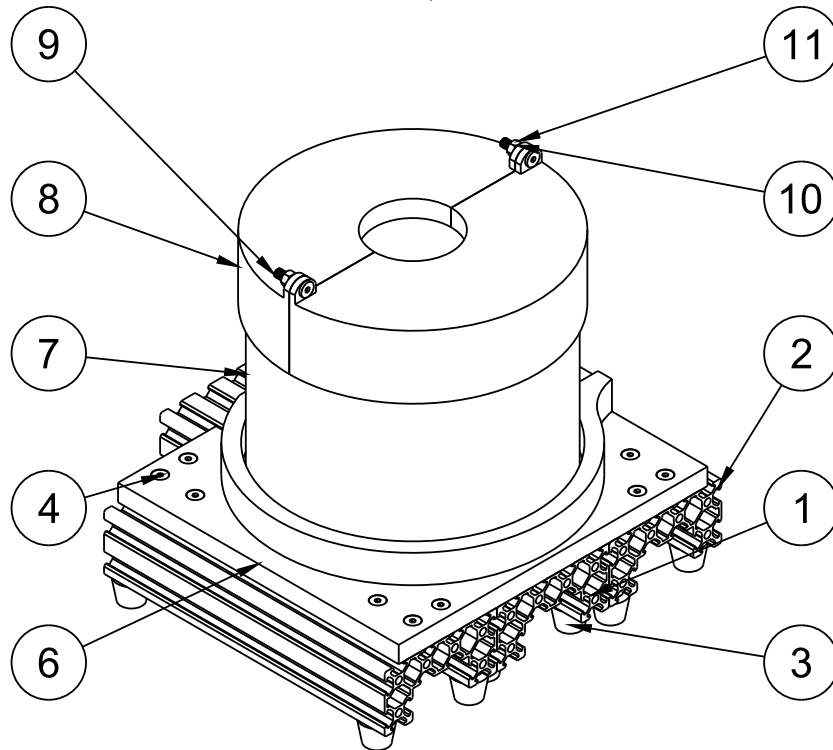
TÍTULO:
Máquina de Desgaste Abrasivo para Materiales

DISEÑO:
Natalia Quintana

ESCALA:
1:9

UNIDADES:
mm

No. 1



Lista de piezas

elemento	número de pieza	ctd
1	Perfil de aluminio V-slot tipo C 240 mm	1
2	Perfil de aluminio V-slot tipo C 200 mm	2
3	Pata de goma para perfiles 20 x 20	12
4	Perno M5x15	32
5	Tuerca T M5 para perfiles V-Slot 20x20	32
6	Base contenedor	1
7	Contenedor	1
8	Tapa	2
9	Perno M5x20	2
10	Golilla M5	2
11	Tuerca M5	2



Universidad de Concepción

FECHA:
11-10-2023

TÍTULO:

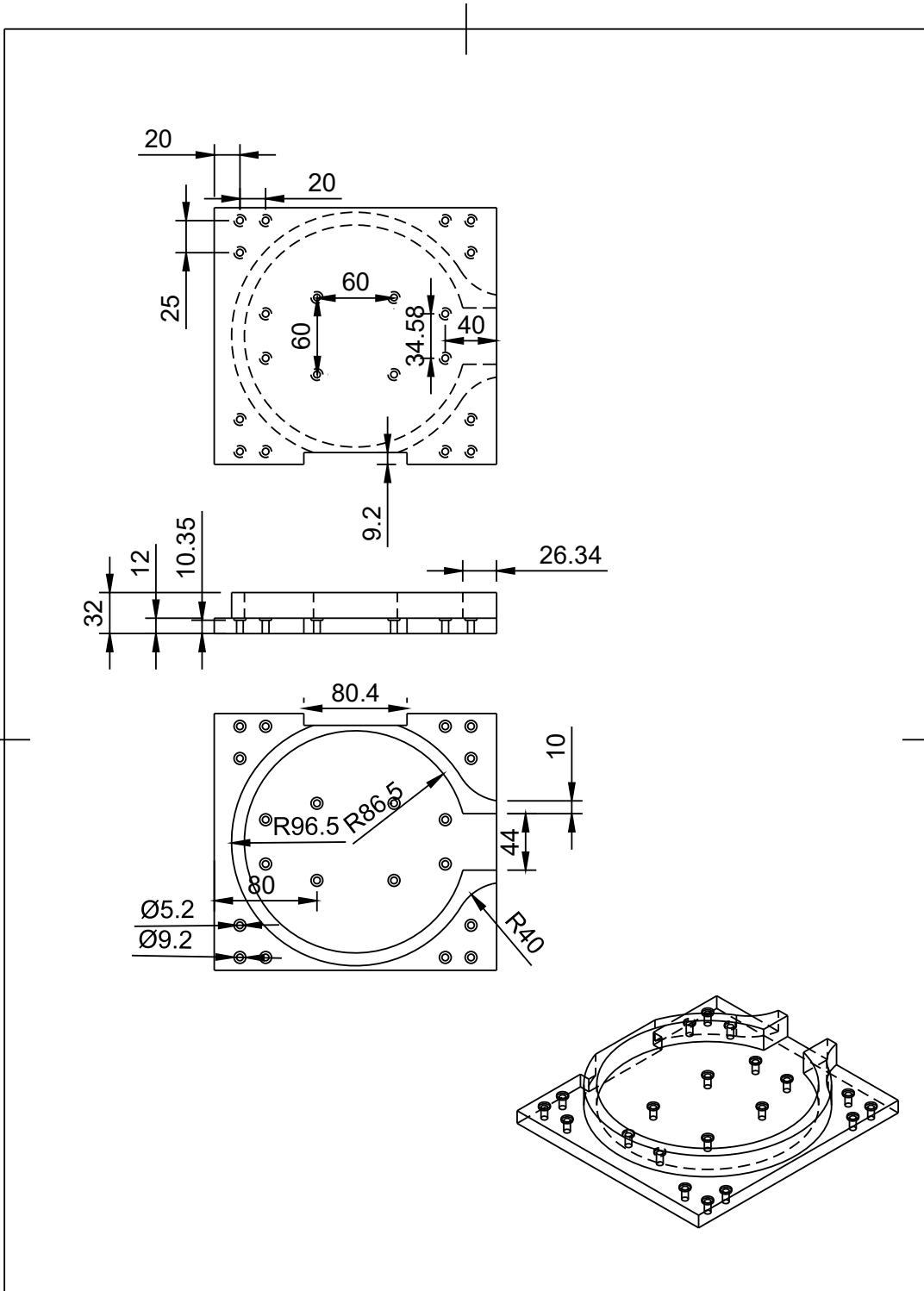
Base


DISEÑO:
Natalia Quintana

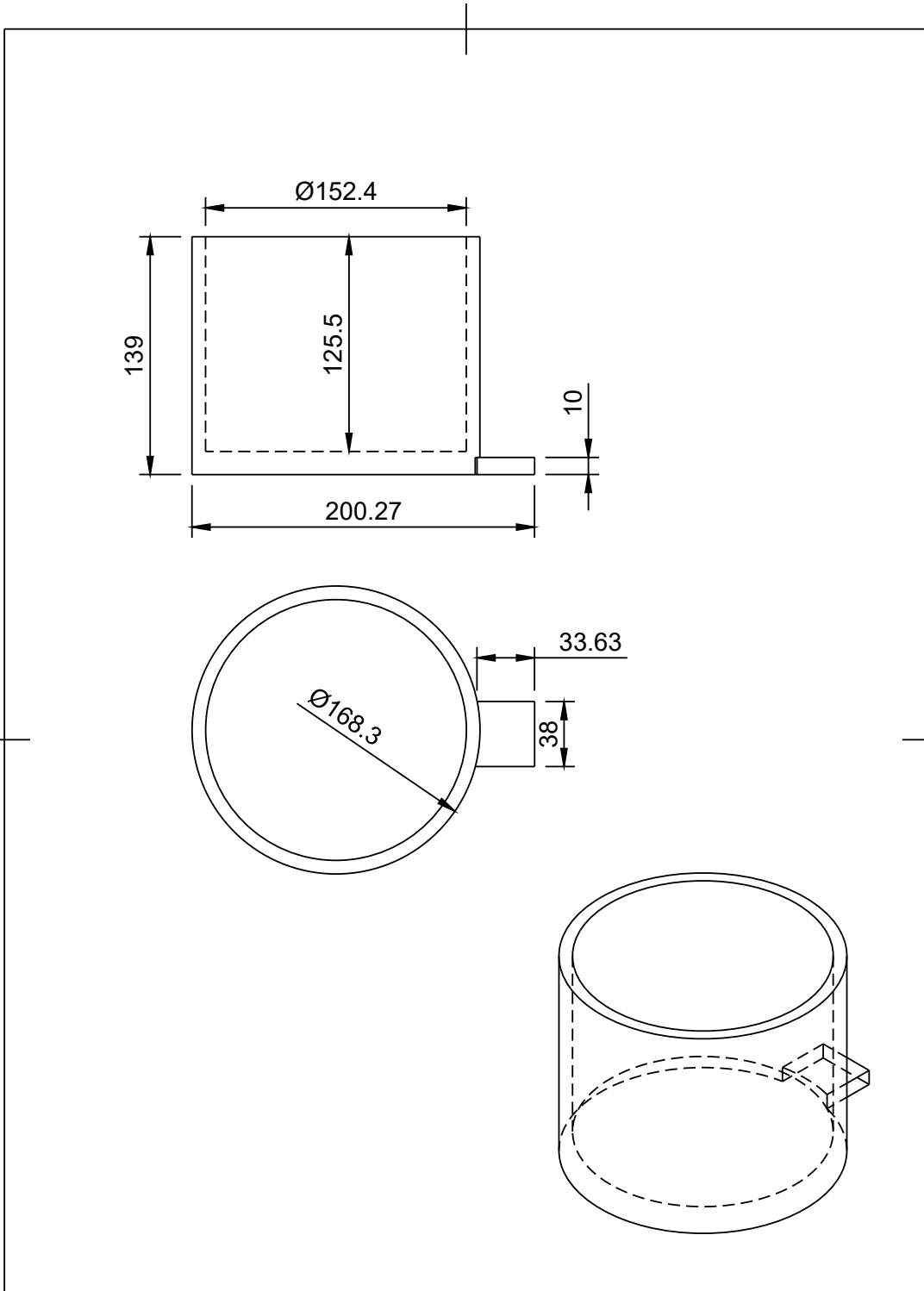
ESCALA:
1:5


UNIDADES:
mm

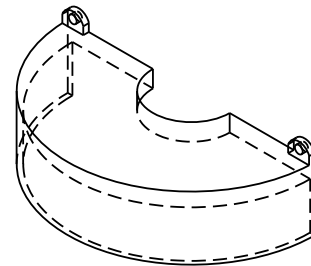
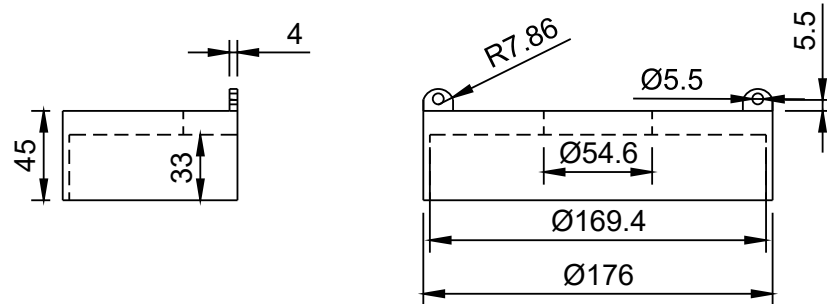
No. 2



	Universidad de Concepción		
	FECHA: 11-10-2023	TÍTULO: Base Contenedor	MATERIAL: Plástico PLA
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:5	UNIDADES: mm
			No. 3

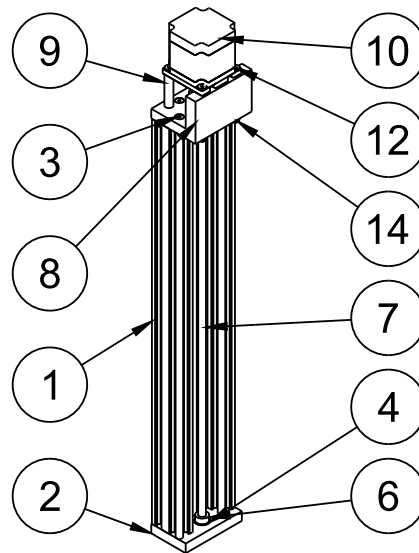


	Universidad de Concepción			
	FECHA: 11-10-2023	TÍTULO: Contenedor	MATERIAL: Acero inoxidable 304L	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:3	UNIDADES: mm	No. 4



Universidad de Concepción

FECHA: 11-10-2023	TÍTULO: Tapa	MATERIAL: Plástico PLA
DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:3	UNIDADES: mm
		No. 5

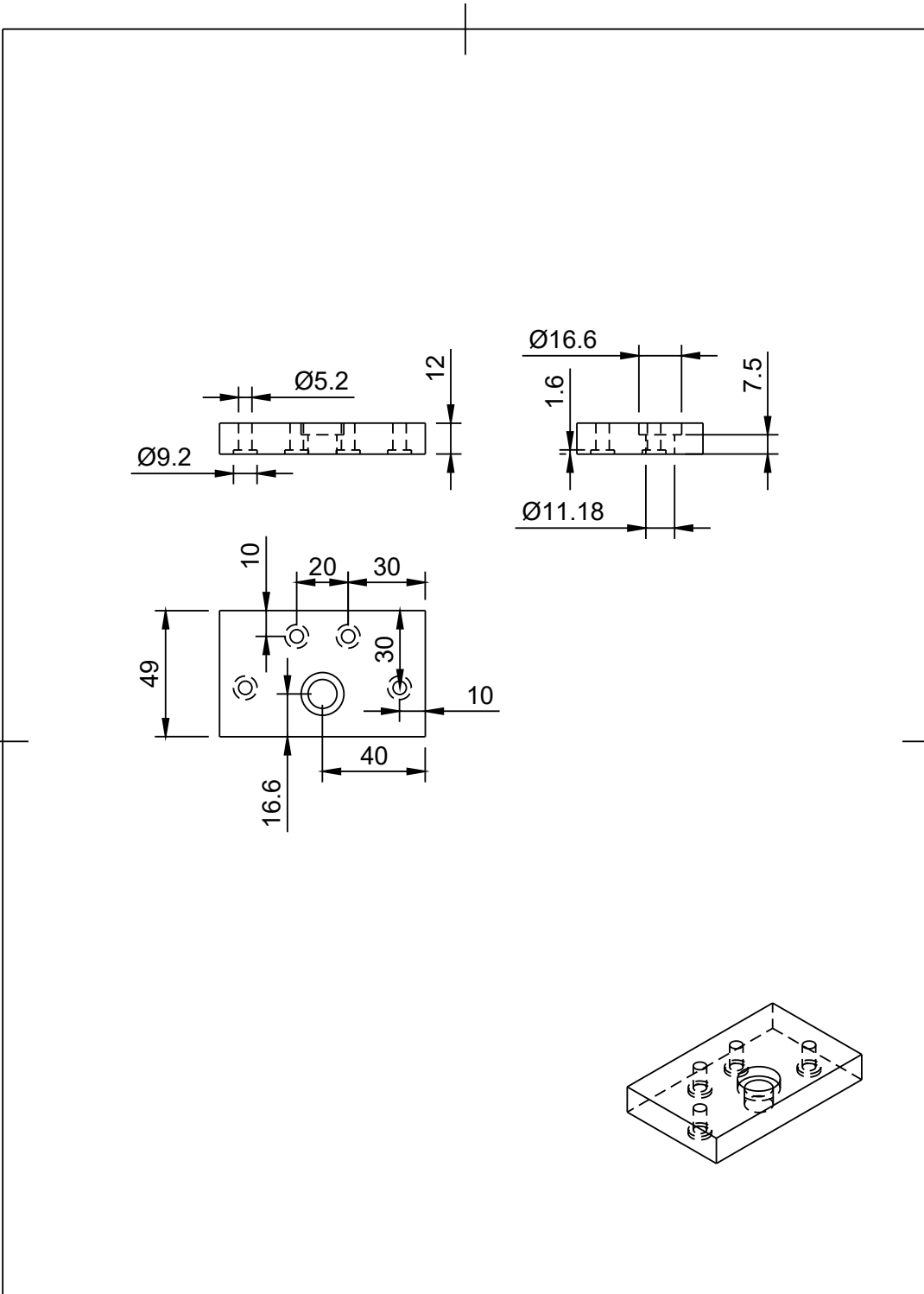



Lista de piezas		
elemento	número de pieza	ctd
1	Perfil de aluminio V-slot tipo C 530 mm	1
2	Placa A	1
3	Perno M5x20	8
4	Rodamiento 8mm	2
5	Golilla M8	2
6	Collar de sujeción	2
7	Varilla Rosca M8	1
8	Placa B	1
9	Espaciador de aluminio	2
10	Motor NEMA 23	1
11	Acople flexible de aluminio 8mm a 10mm	1
12	Perno M5x65	4
13	Golilla M5	2
14	Tuerca M5	2

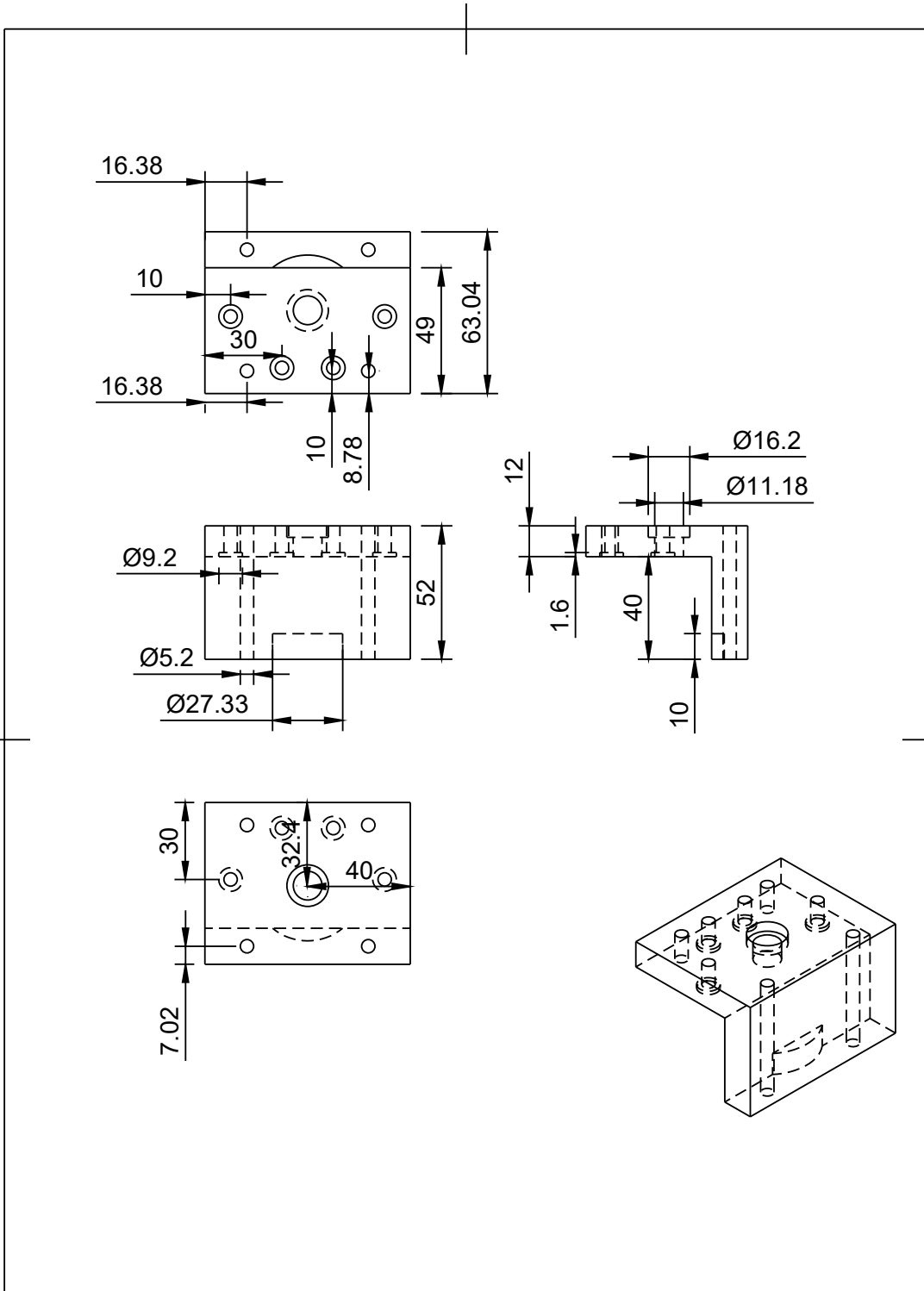



Universidad de Concepción

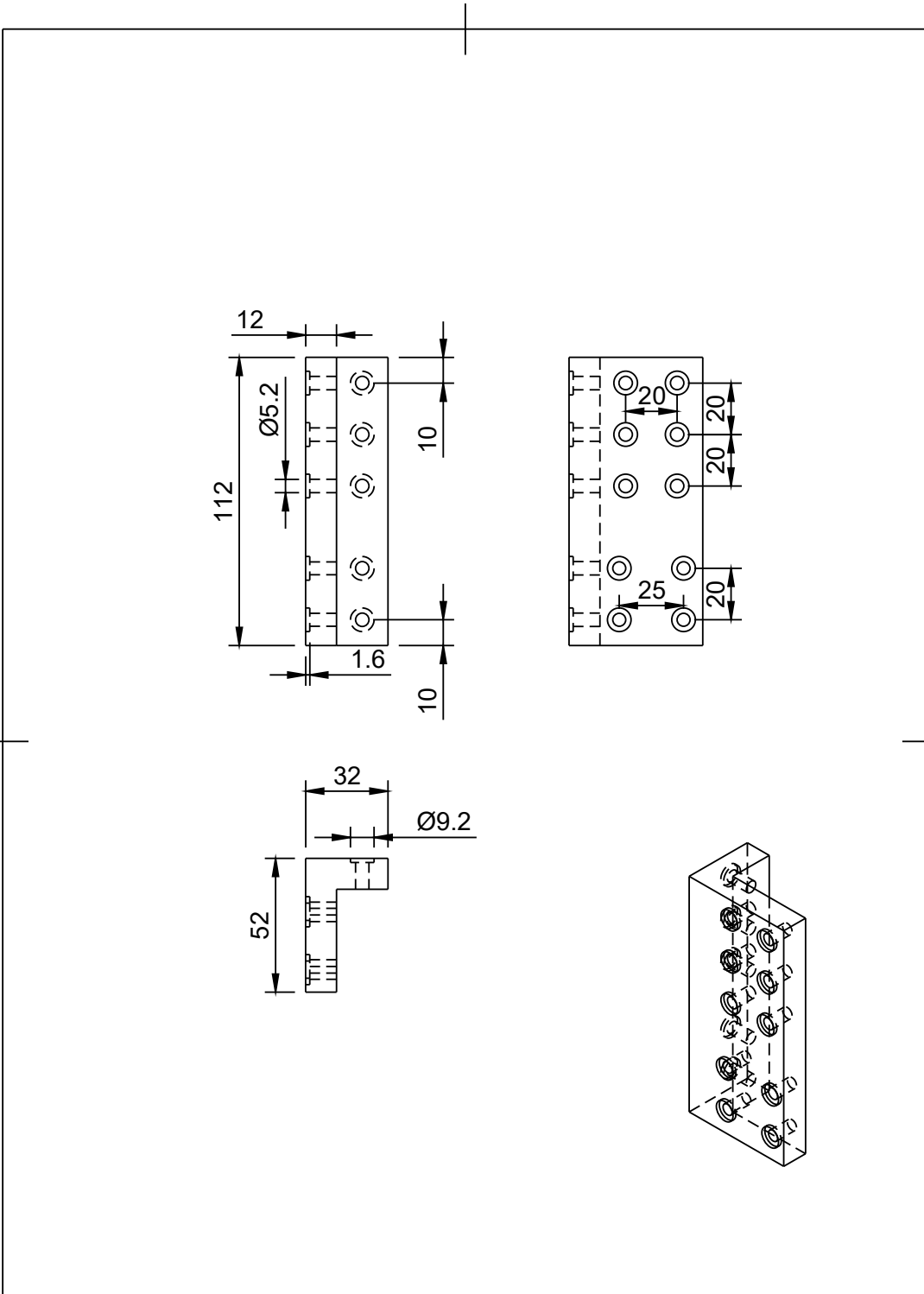
FECHA: 11-10-2023	TÍTULO: Riel		
DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:10	UNIDADES: mm	No. 6




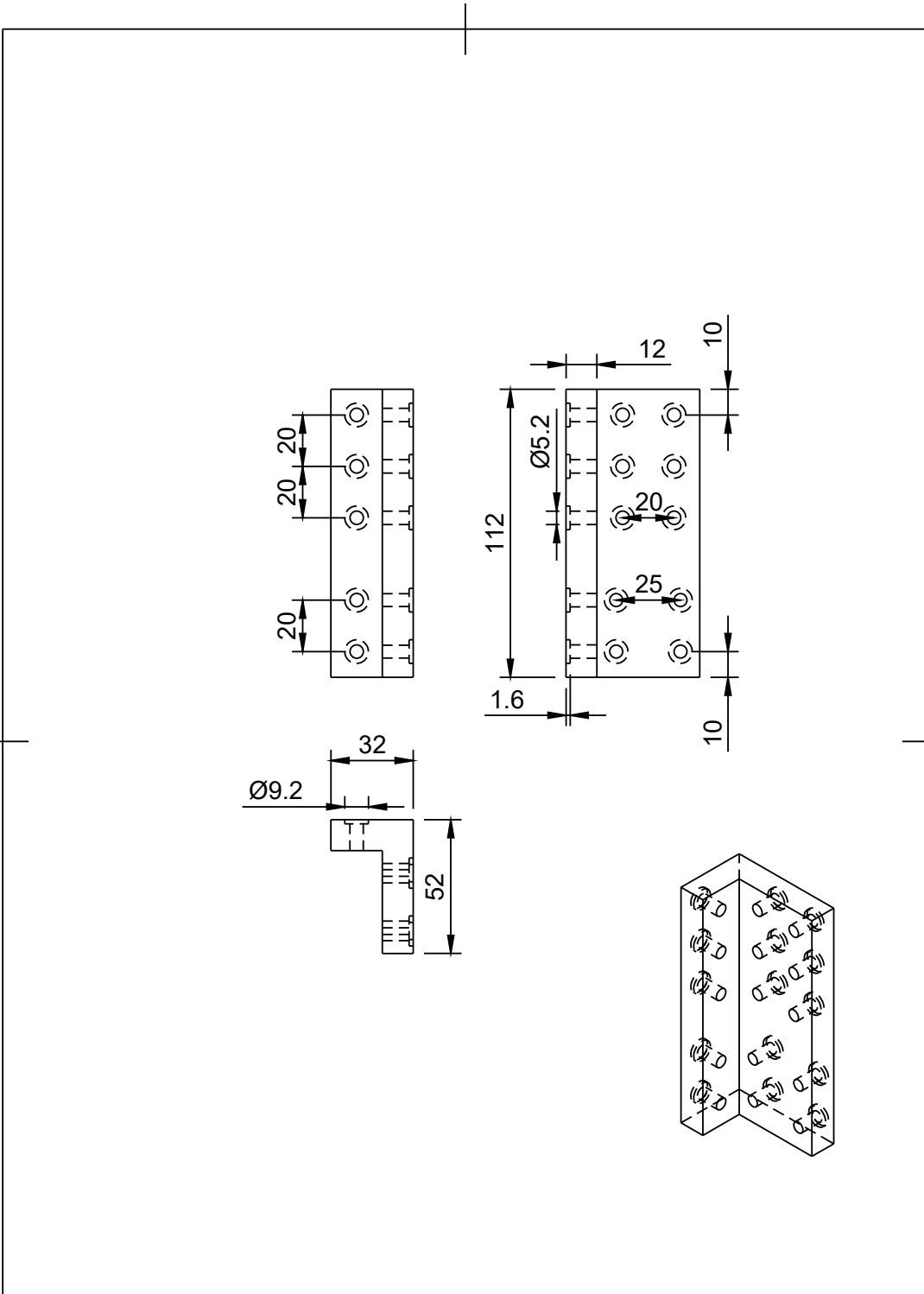
	Universidad de Concepción		
	FECHA: 11-10-2023	TÍTULO: Placa A	MATERIAL: Plástico PLA
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm
			No. 7




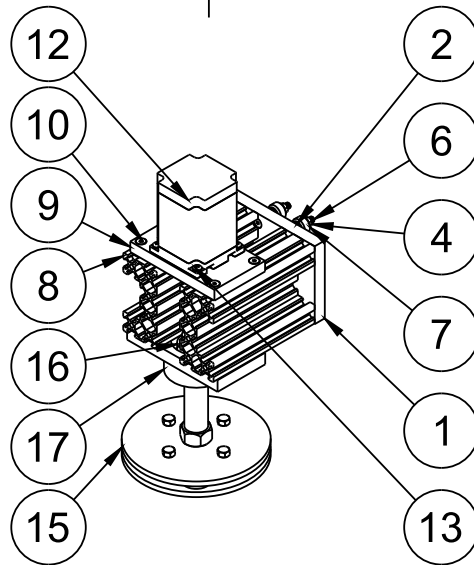
	Universidad de Concepción			
	FECHA: 11-10-2023	TÍTULO: Placa B	MATERIAL: Plástico PLA	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm	No. 8



	Universidad de Concepción			
	FECHA: 11-10-2023	TÍTULO: Escuadra A	MATERIAL: Plástico PLA	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm	No. 9



	Universidad de Concepción			
	FECHA: 11-10-2023	TÍTULO: Escuadra B	MATERIAL: Plástico PLA	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm	No. 10



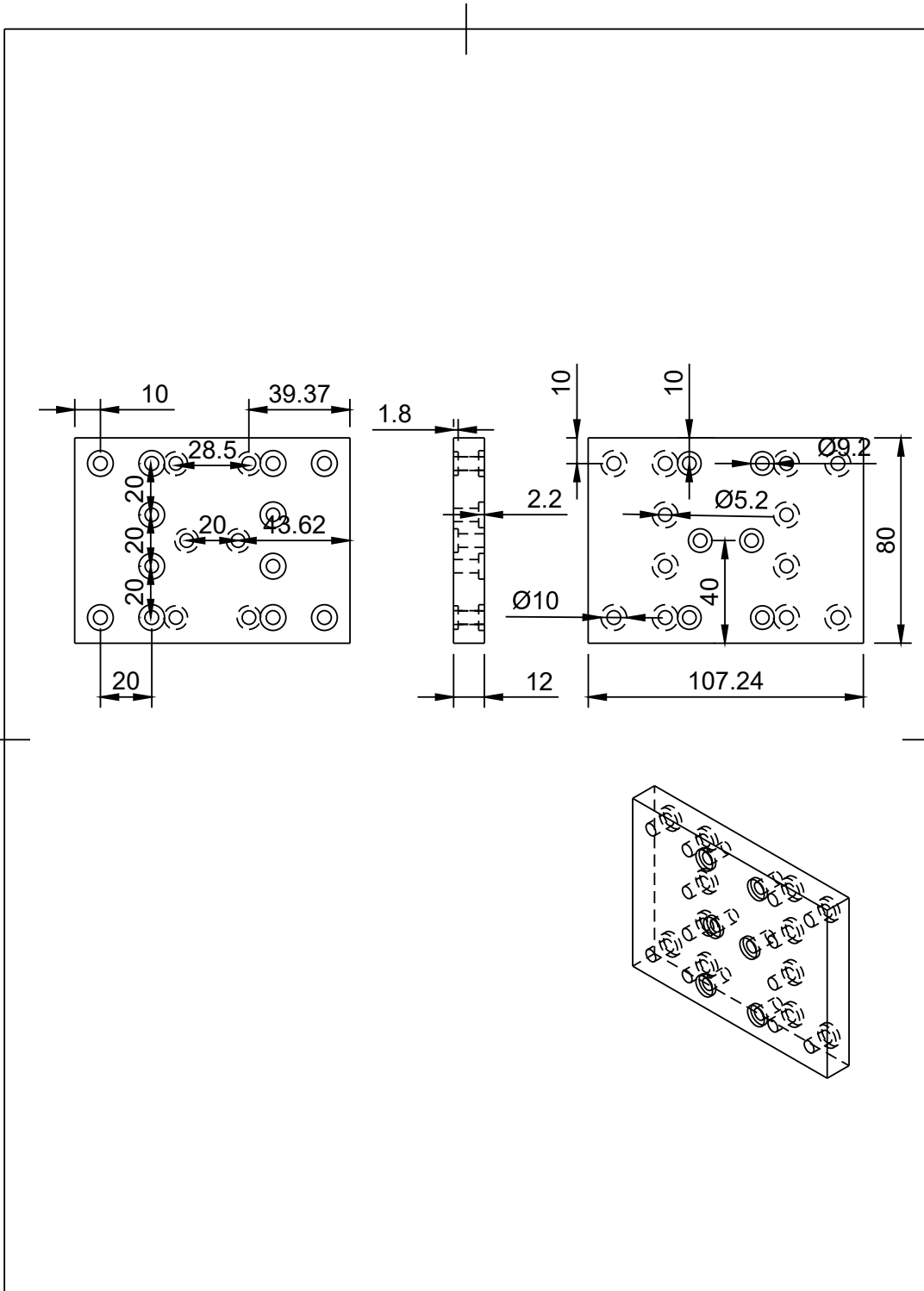
Lista de piezas


elemento	número de pieza	ctd
1	Placa Riel	1
2	Golilla M5	10
3	Tuerca Delrin	1
4	Tuerca M5	10
5	Perno M5x25	14
6	Perno M5x35	4
7	Rueda	4
8	Perfil de aluminio V-slot tipo C 120 mm	2
9	Placa C	1
10	Perno M5x15	12
11	Tuerca T M4 para perfiles V-Slot 20x20	12
12	Motor RTA NEMA 23	1
13	Perno M4x10	4
14	Acople flexible de aluminio 5mm a 10mm	1
15	Porta Probetas	1
16	Rodamiento cónico 20mm	1
17	Placa D	1

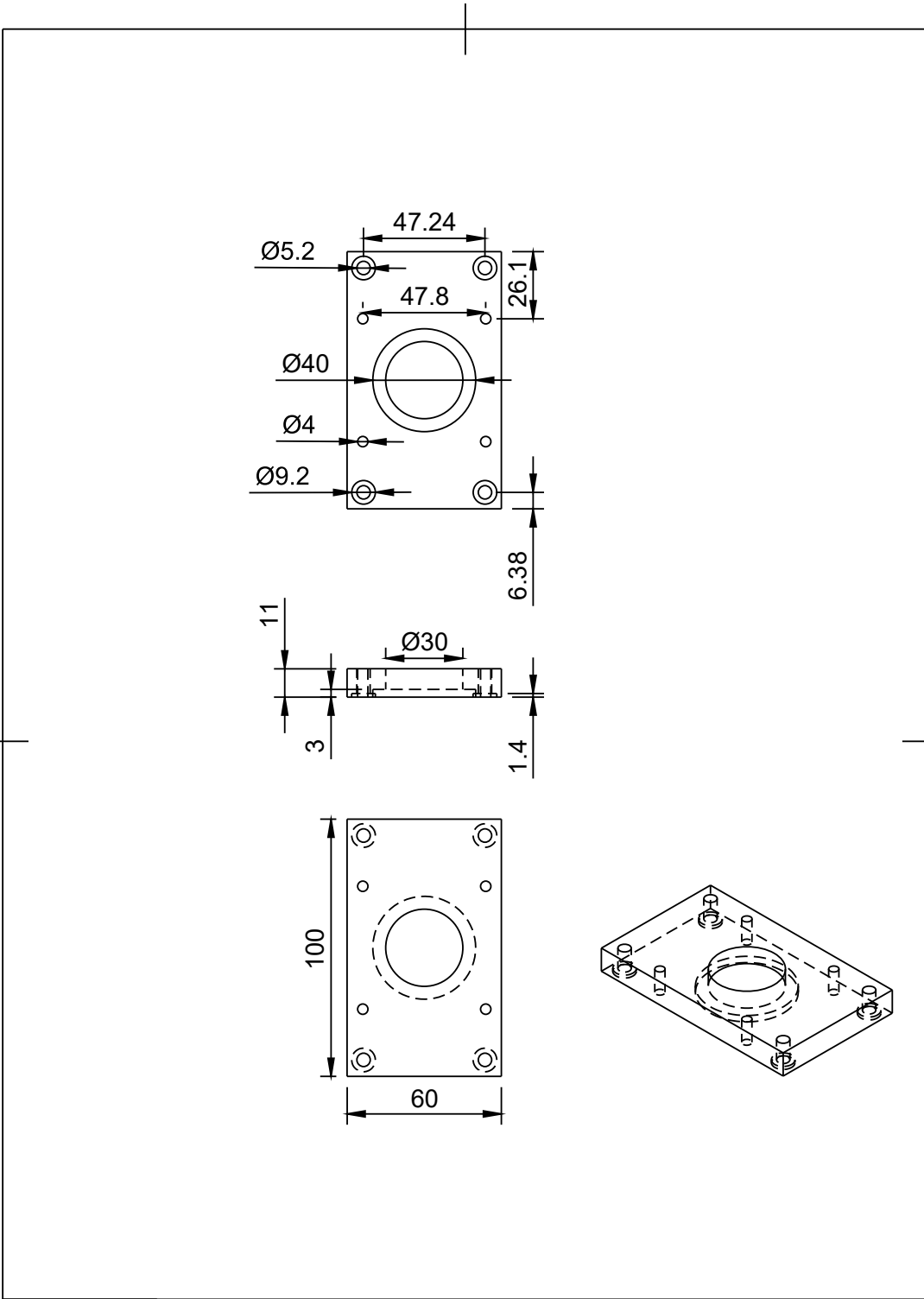


Universidad de Concepción

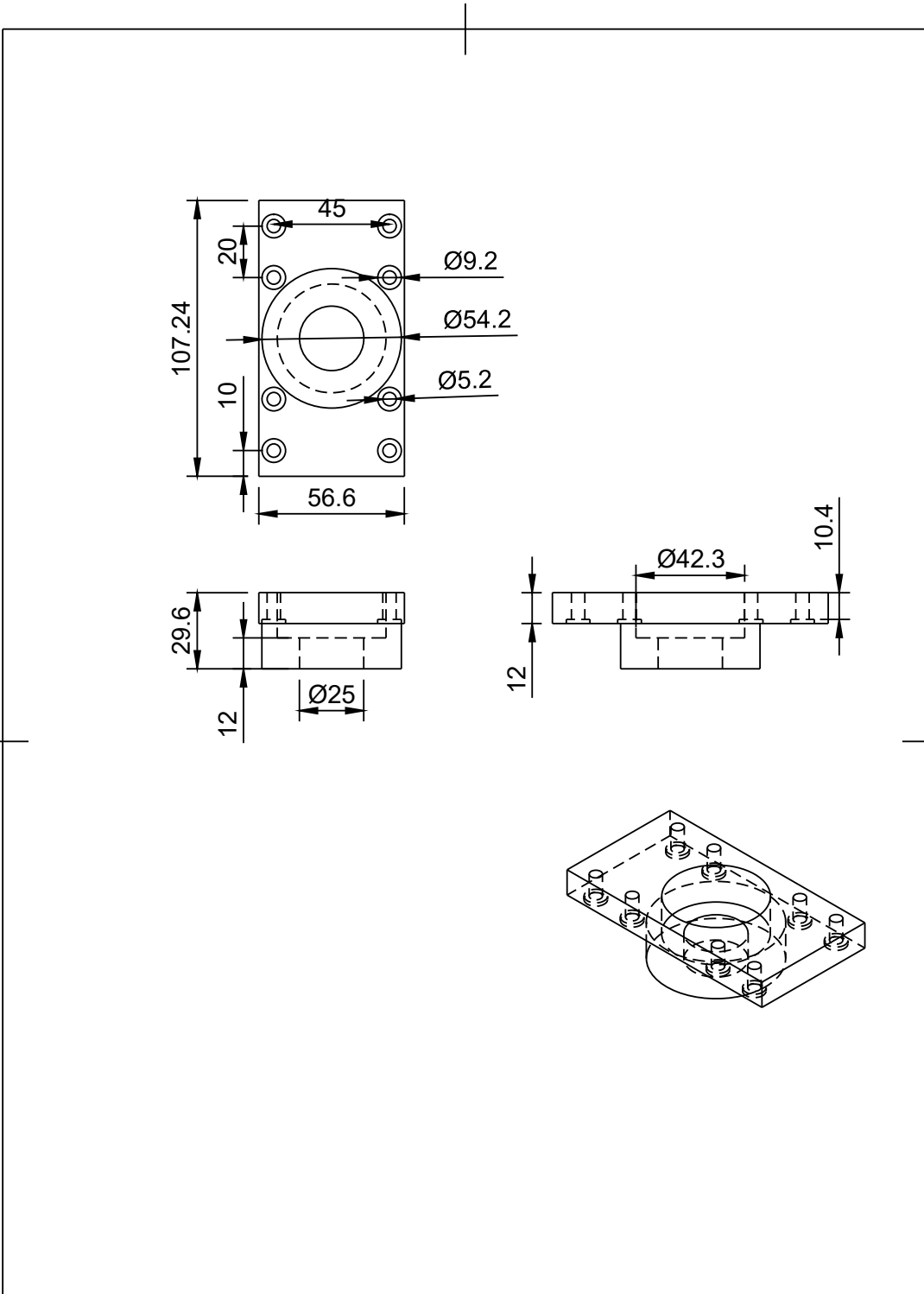
FECHA: 11-10-2023	TÍTULO: Carro		
DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:5	UNIDADES: mm	No. 11



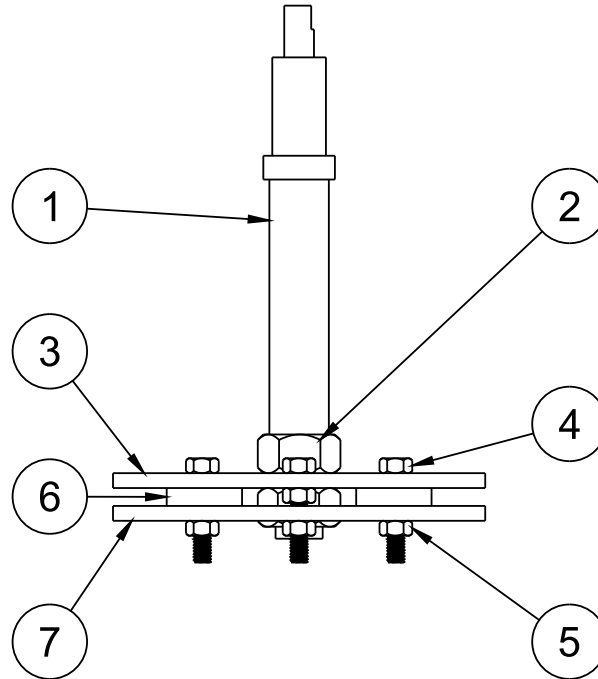
	Universidad de Concepción			
	FECHA: 12-10-2023	TÍTULO: Placa Riel	MATERIAL: Plástico PLA	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm	No. 12



	Universidad de Concepción			
	FECHA: 12-10-2023	TÍTULO: Placa C	MATERIAL: Aluminio 6063	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm	No. 13



	Universidad de Concepción			
	FECHA: 12-10-2023	TÍTULO: Placa D	MATERIAL: Plástico PLA	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm	No. 14



Lista de piezas		
elemento	número de pieza	ctd
1	Eje	1
2	Tuerca M16	2
3	Placa Superior	1
4	Perno M6x30	4
5	Tuerca M6	8
6	Probeta	4
7	Placa Inferior	1



Universidad de Concepción

FECHA:
12-10-2023

TÍTULO:

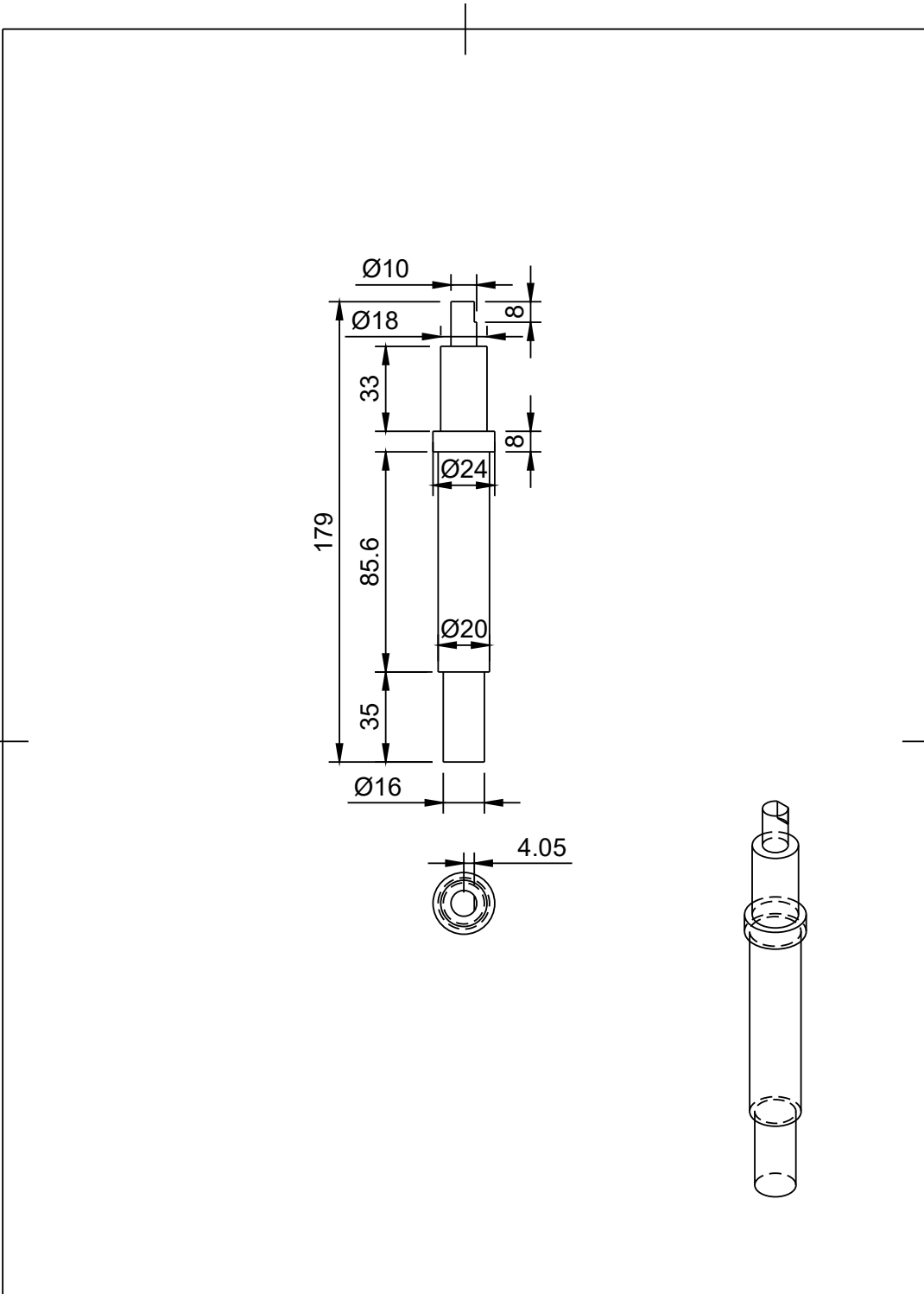
Porta Probetas


DISEÑO:
Natalia Quintana

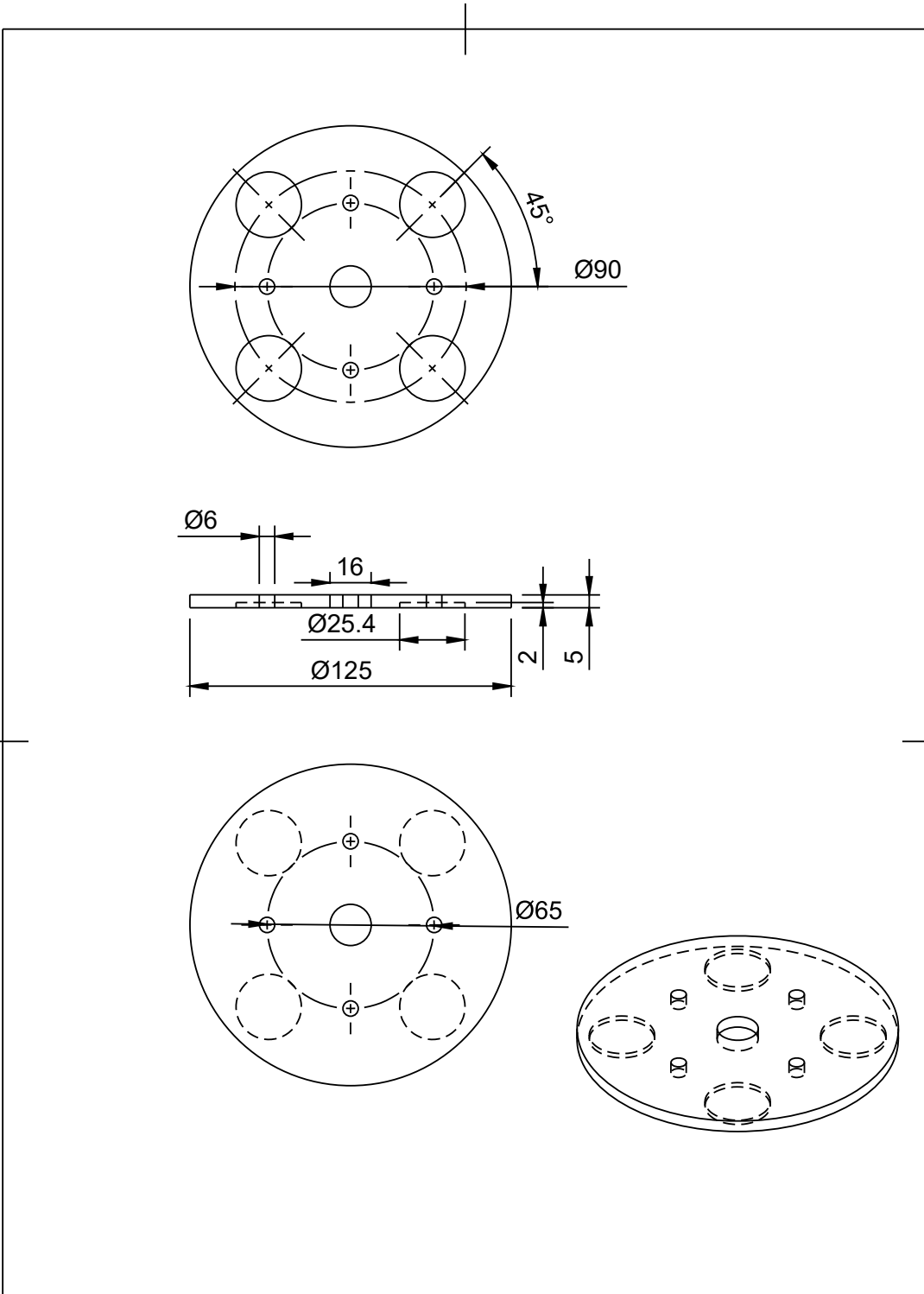
ESCALA:
1:3

UNIDADES:
mm

No. 15

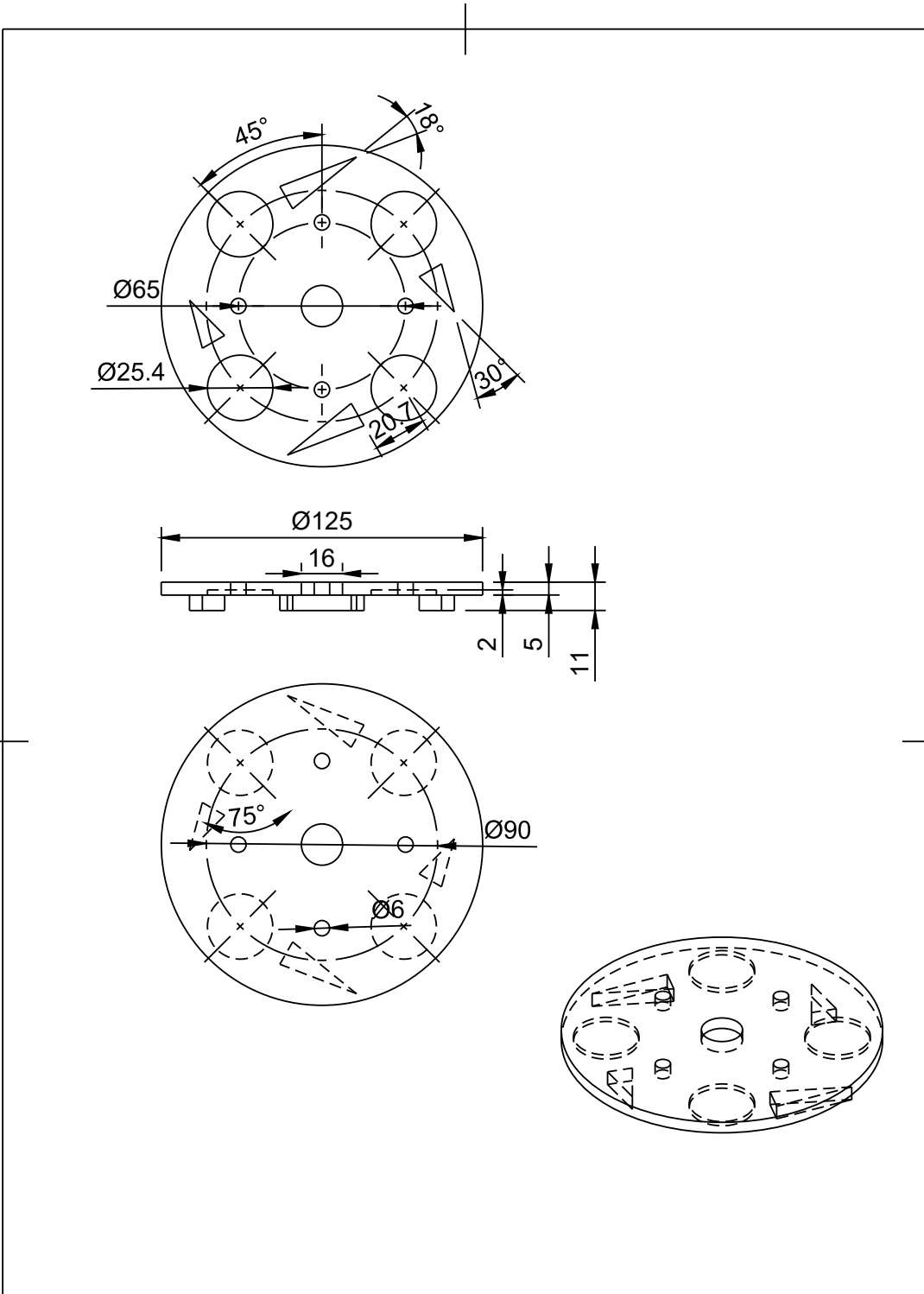



	Universidad de Concepción			
	FECHA: 12-10-2023	TÍTULO: Eje	MATERIAL: Acero inoxidable 304L	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm	No. 16

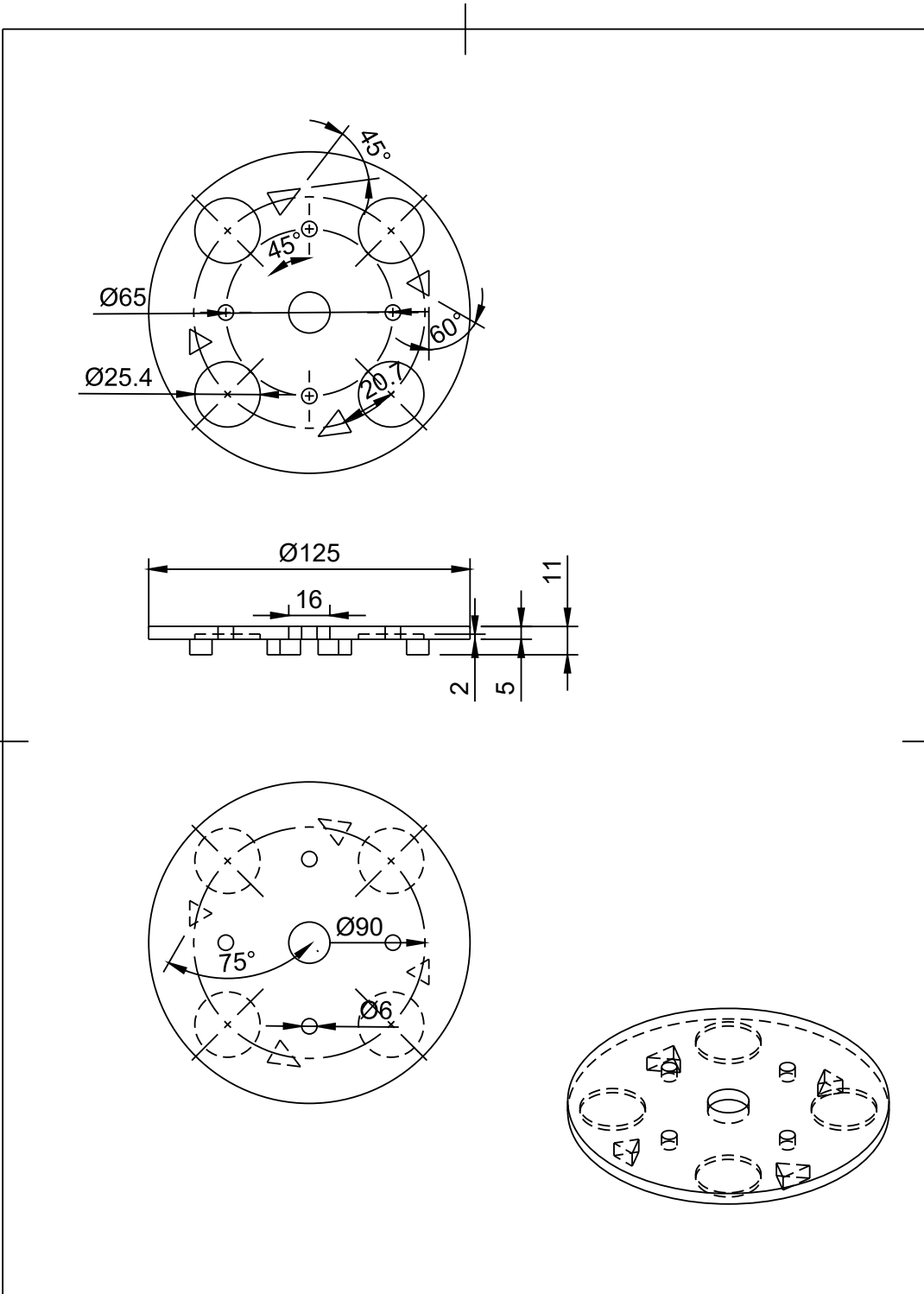



Universidad de Concepción

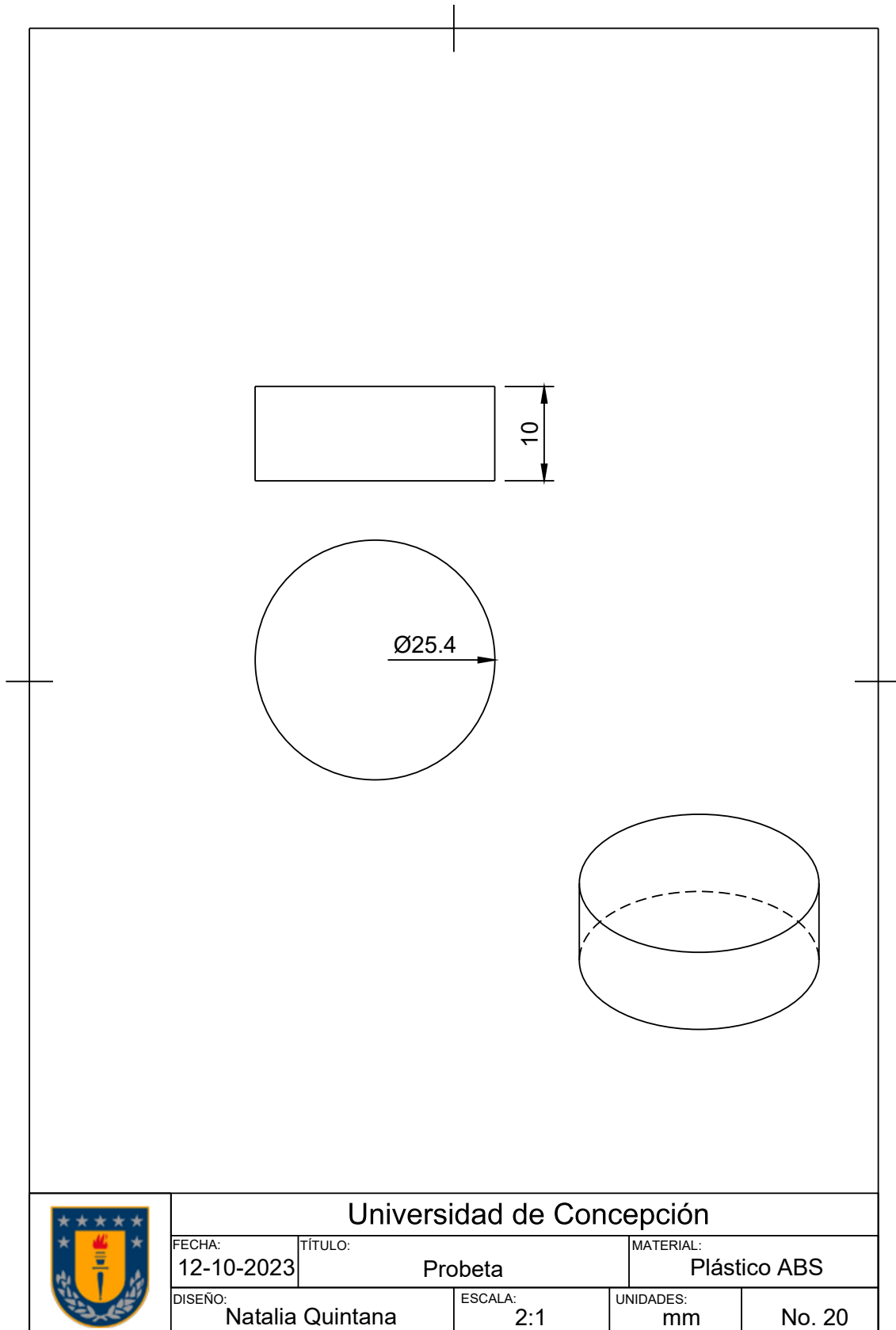
FECHA: 12-10-2023	TÍTULO: Placa Superior Sin IAA	MATERIAL: Acero inoxidable 304L
DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm
		No. 17

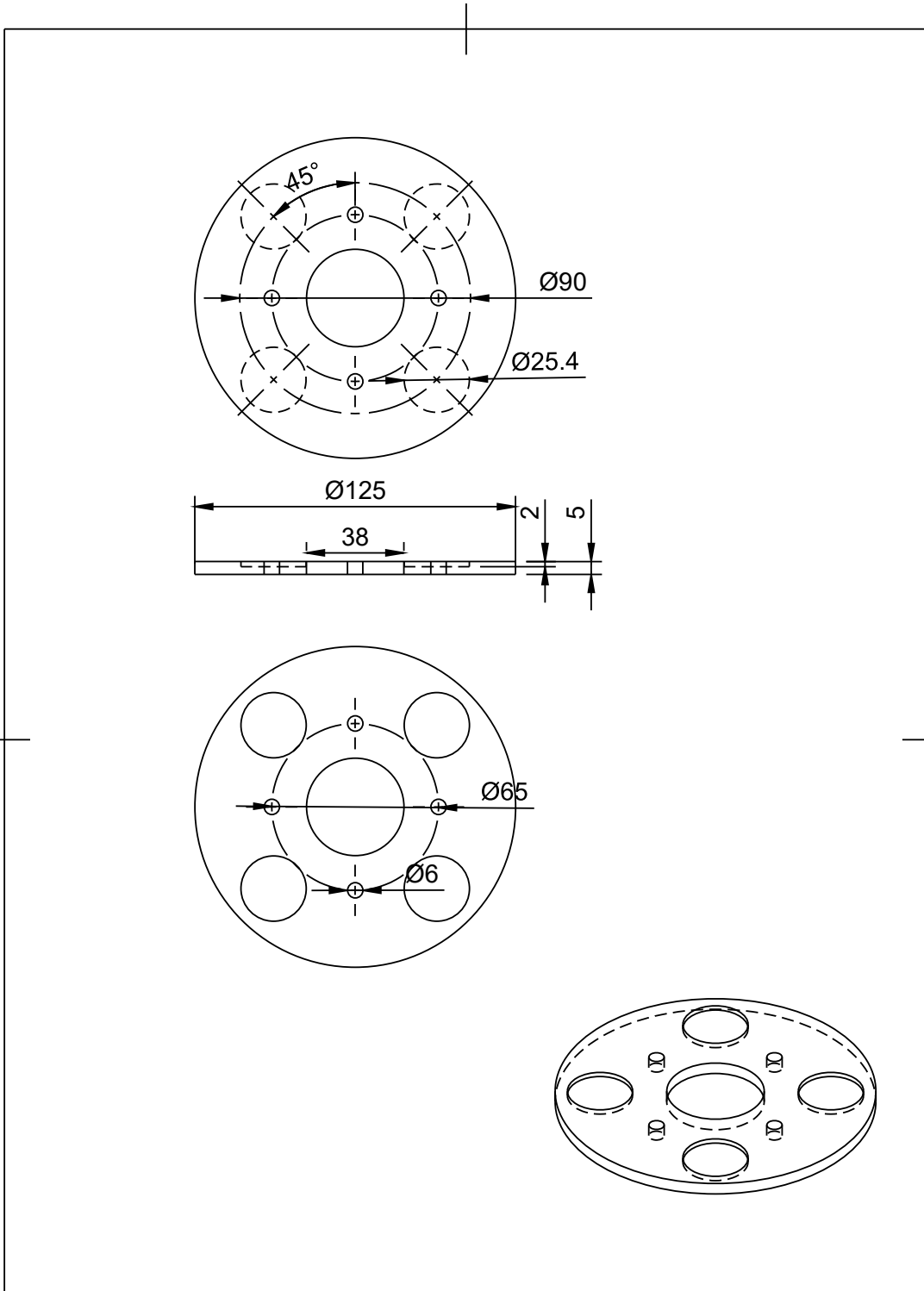



	Universidad de Concepción			
	FECHA: 12-10-2023	TÍTULO: Placa Superior IAA1830	MATERIAL: Acero inoxidable 304L	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm	No. 18

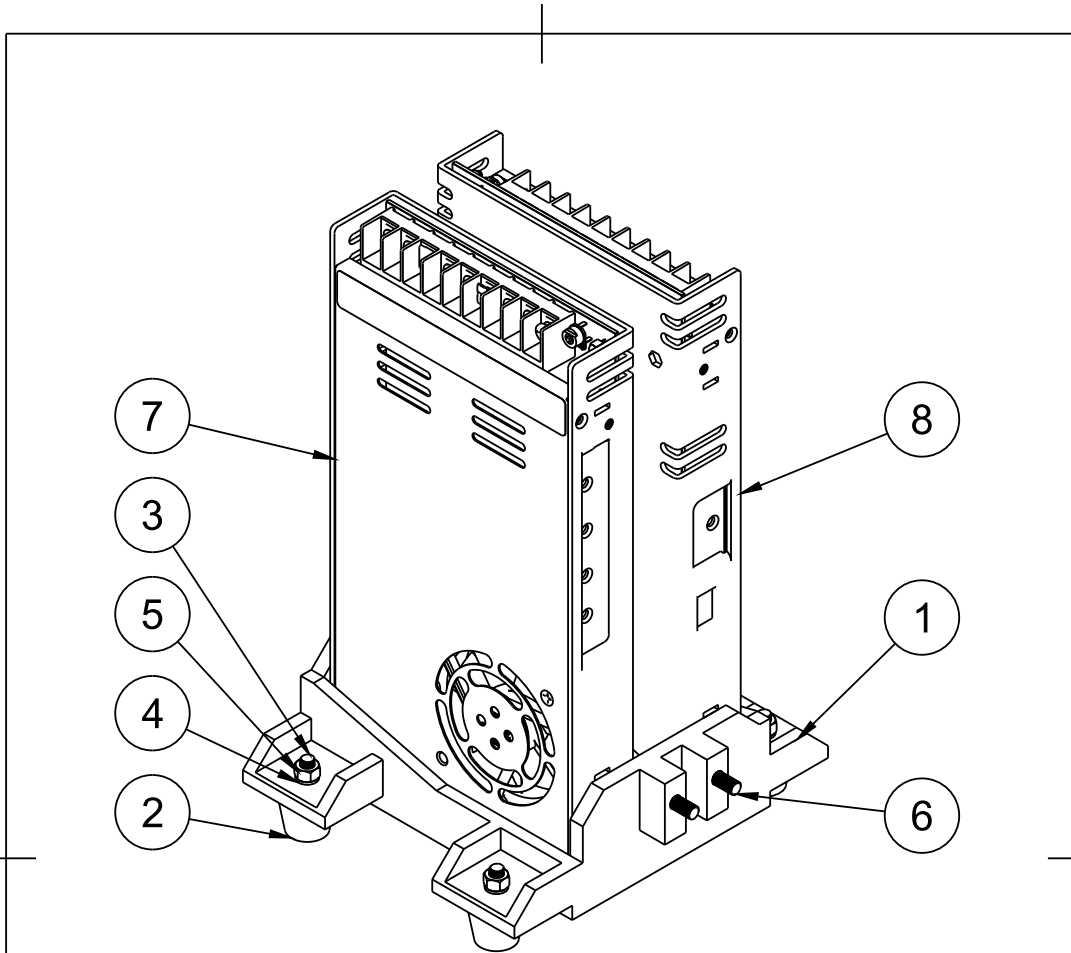


	Universidad de Concepción			
	FECHA: 12-10-2023	TÍTULO: Placa Superior IAA4560	MATERIAL: Acero inoxidable 304L	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm	No. 19





	Universidad de Concepción			
	FECHA: 12-10-2023	TÍTULO: Placa Inferior	MATERIAL: Acero inoxidable 304L	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm	No. 21



Lista de piezas

elemento	número de pieza	ctd
1	Soporte Fuentes de Poder	1
2	Pata de goma para perfiles 20 x 20	4
3	Perno M5x15	4
4	Golilla M5	4
5	Tuerca M5	4
6	Perno M5x25	2
7	Fuente de poder switching (Meanwell) 27V 14,6A 350W	1
8	Fuente de poder switching (Meanwell) 48V 7.3A 350W	1
9	Perno M4x15	2



Universidad de Concepción

FECHA:
12-10-2023

TÍTULO:

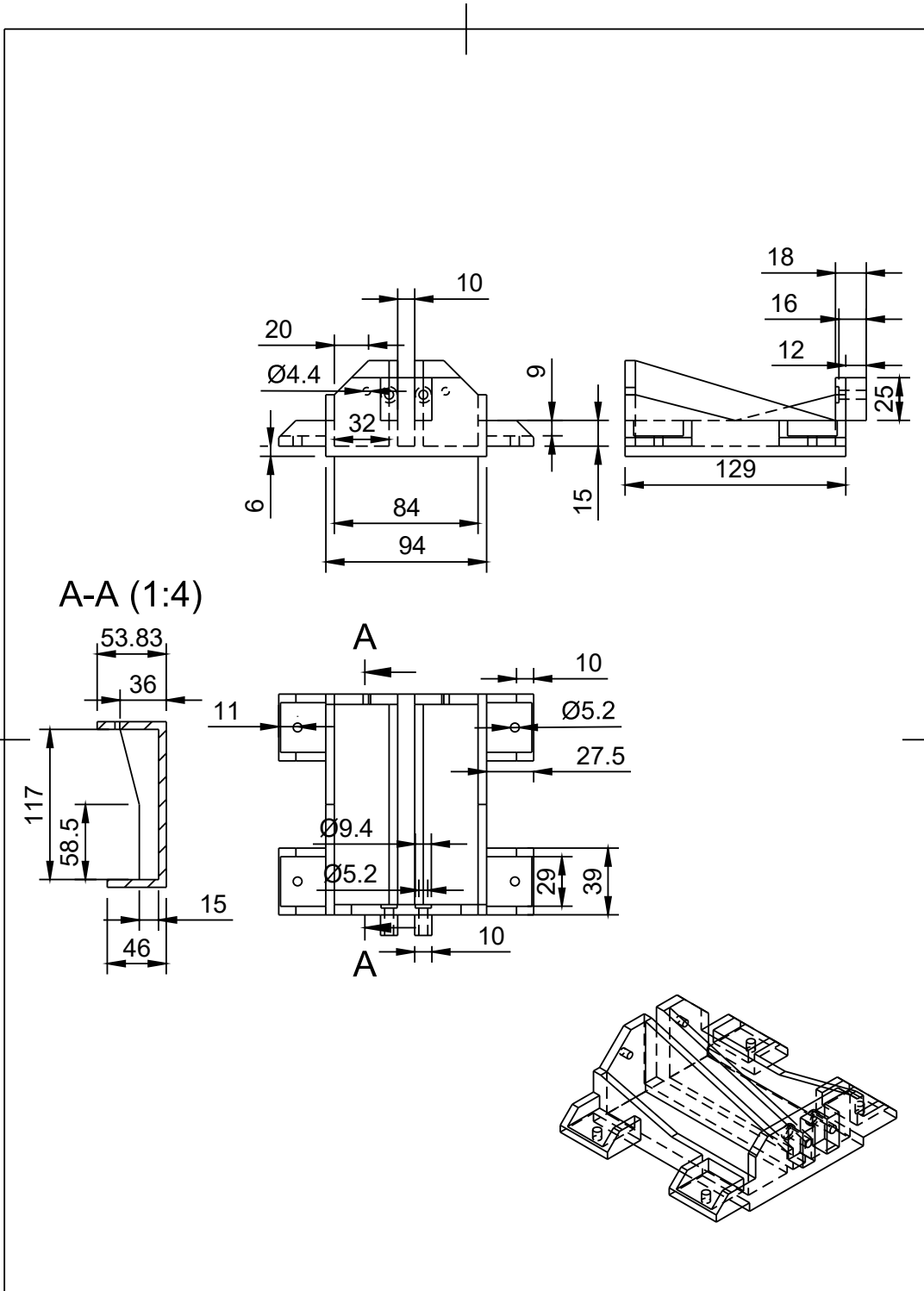
Contenedor Fuentes de Poder

DISEÑO:
Natalia Quintana


ESCALA:
1:2

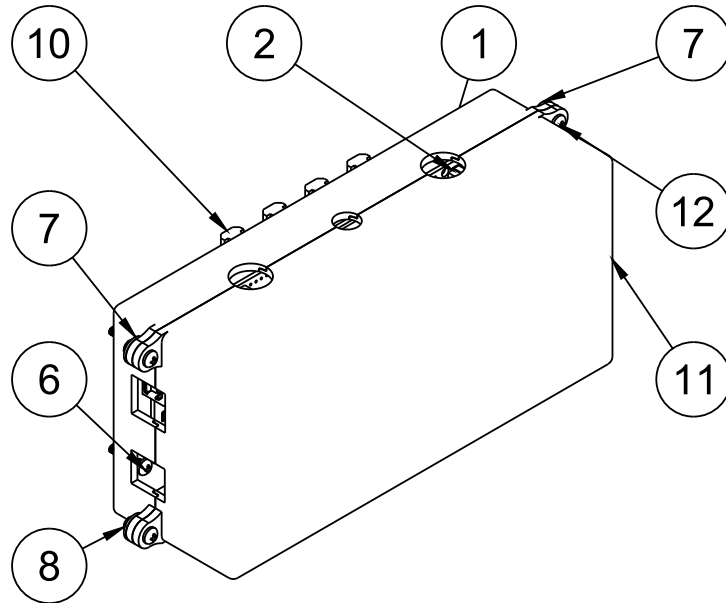
UNIDADES:
mm

No. 22



A-A (1:4)

	Universidad de Concepción			
	FECHA: 12-10-2023	TÍTULO: Soportes Fuentes de Poder	MATERIAL: Plástico PLA	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:3	UNIDADES: mm	No. 23



Lista de piezas

elemento	número de pieza	ctd
1	Base Contenedor Arduino	1
2	Arduino UNO	2
3	Perno M2x20	6
4	Golilla M2	6
5	Tuerca M2	8
6	Perno M3x15	4
7	Golilla M3	8
8	Tuerca M3	6
9	Perno M5x8	8
10	Tuerca T M5 para perfiles V-Slot 20x20	8
11	Tapa Contenedor Arduino	1
12	Perno M3x10	4



Universidad de Concepción

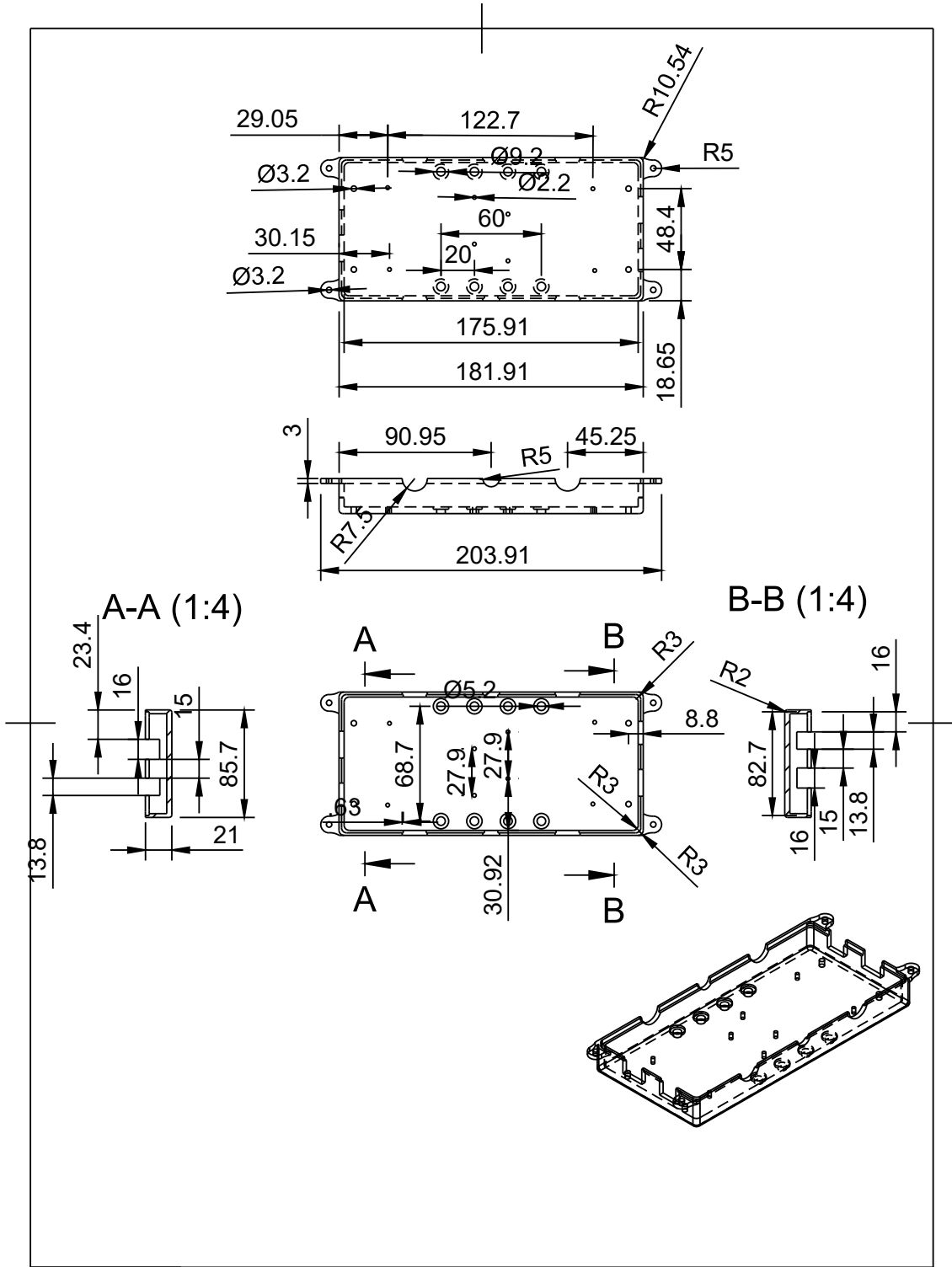
FECHA:
12-10-2023

TÍTULO:

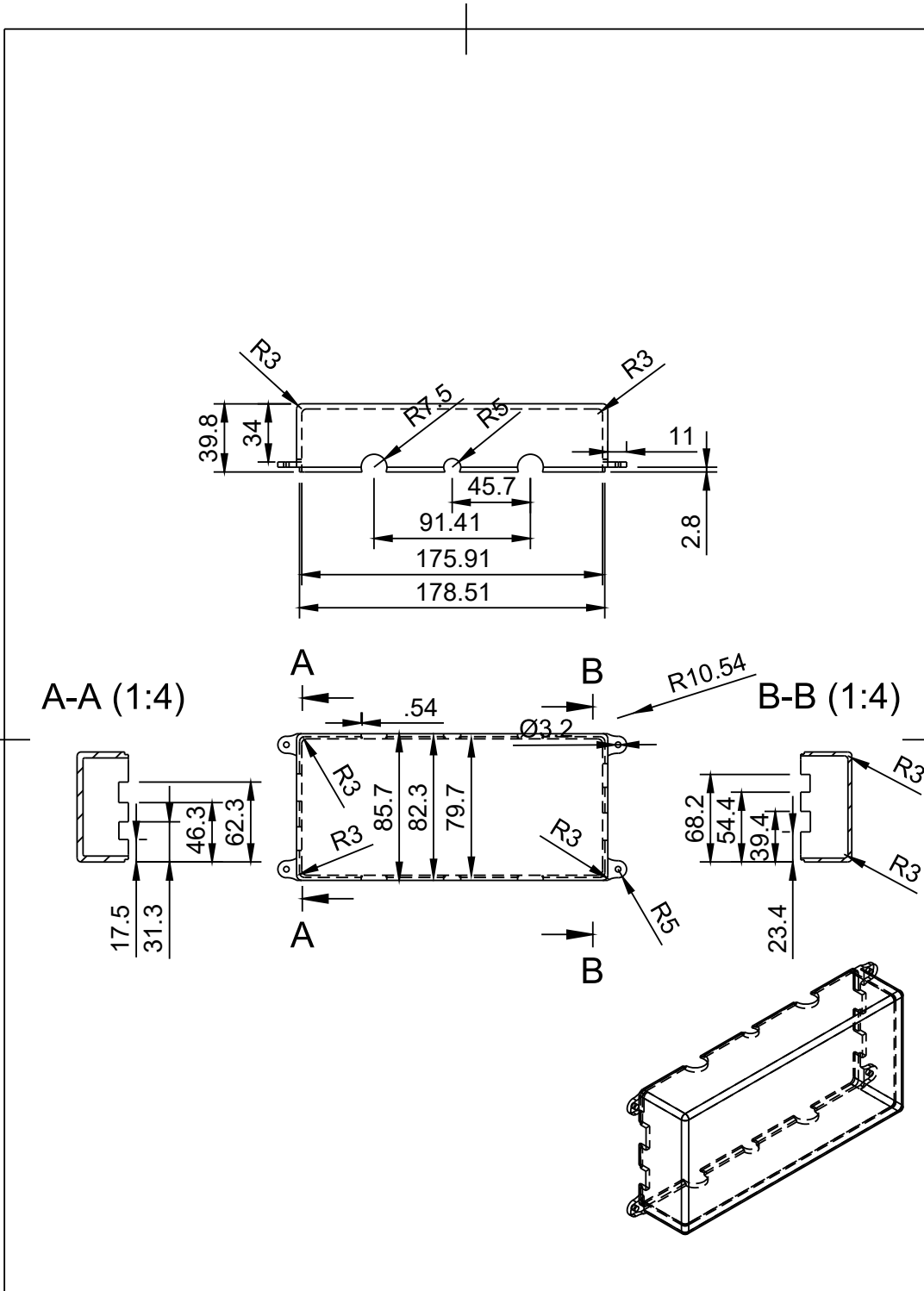
Contenedor Arduino


DISEÑO:
Natalia QuintanaESCALA:
1:3UNIDADES:
mm

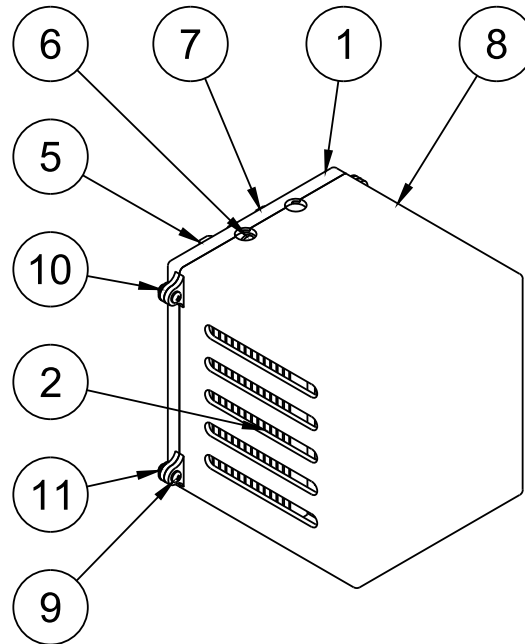
No. 24



	Universidad de Concepción			
	FECHA: 12-10-2023	TÍTULO: Base Contenedor Arduino	MATERIAL: Plástico PLA	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:3	UNIDADES: mm	No. 25



	Universidad de Concepción			
	FECHA: 13-10-2023	TÍTULO: Tapa Contenedor Arduino	MATERIAL: Plástico PLA	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:3	UNIDADES: mm	No. 26



Lista de piezas		
elemento	número de pieza	ctd
1	Base Contenedor Driver	1
2	Driver DM542	1
3	Driver ACSD94	1
4	Perno M4x10	4
5	Tuerca T M4 para perfiles V-Slot 20x20	4
6	Perno M5x8	4
7	Tuerca T M5 para perfiles V-Slot 20x20	4
8	Tapa Contenedor Driver	1
9	Perno M3x10	4
10	Golilla M3	4
11	Tuerca M3	4



Universidad de Concepción

FECHA:
15-10-2023

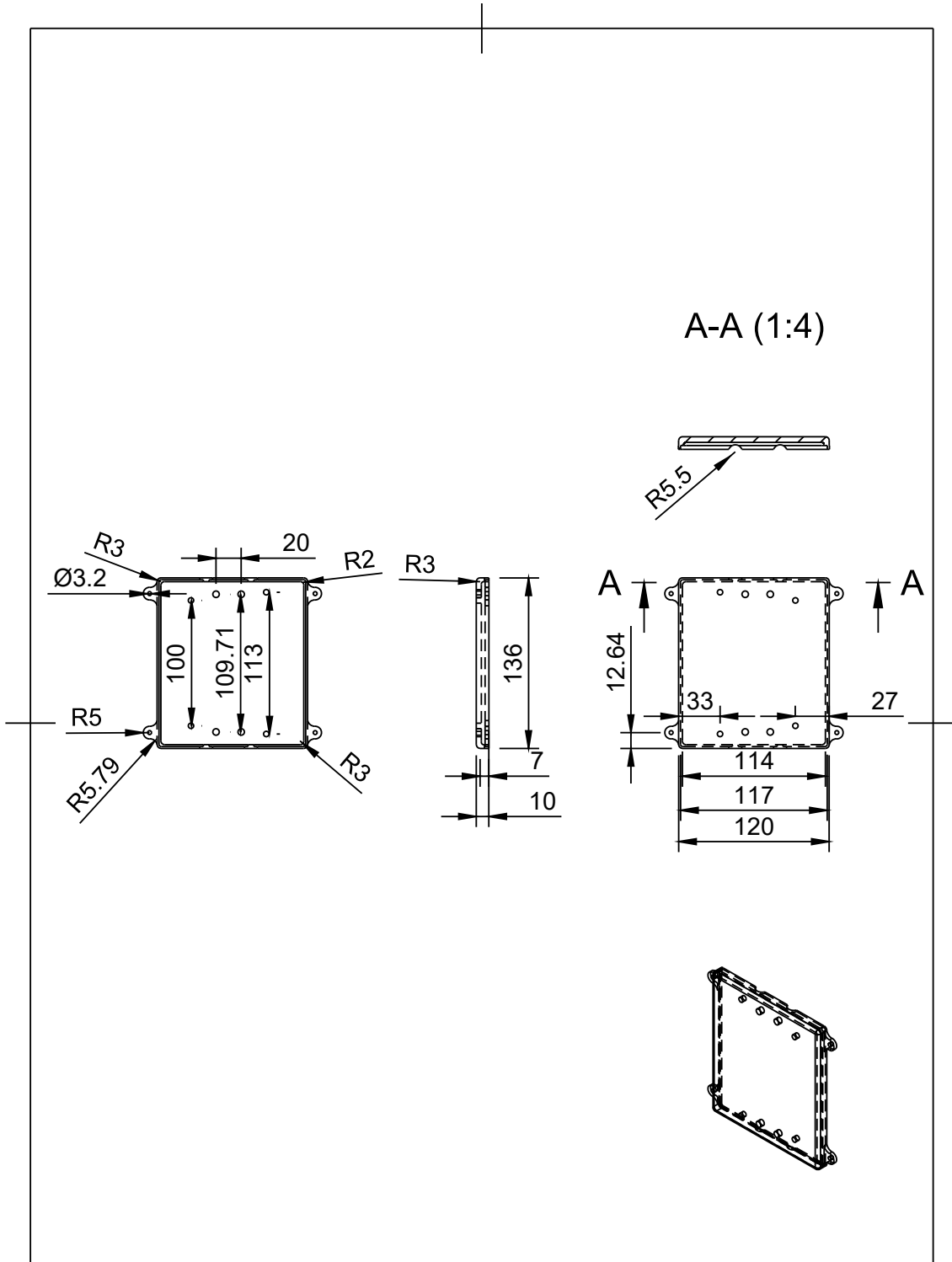
TÍTULO:
Contenedor Driver


DISEÑO:
Natalia Quintana

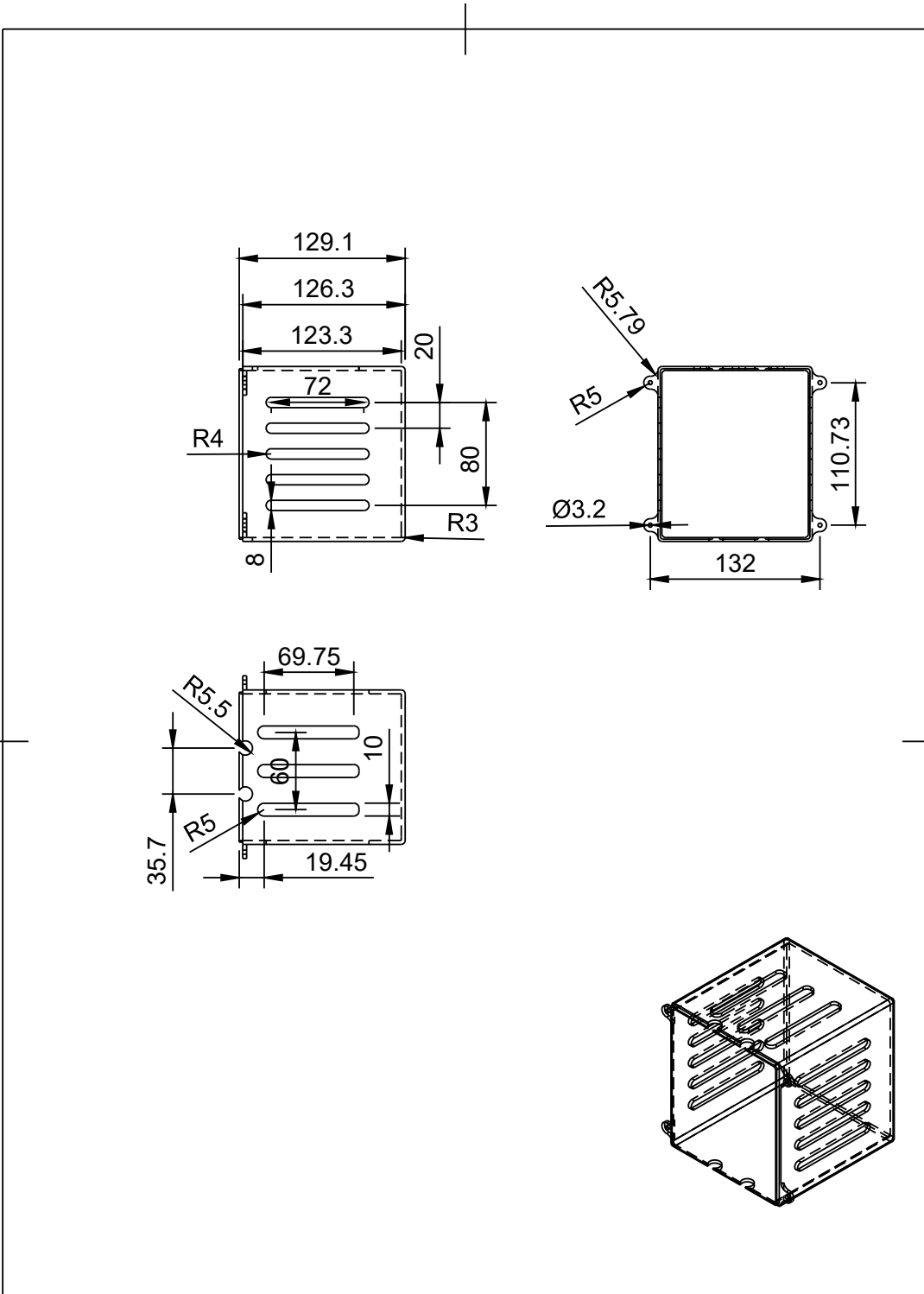
ESCALA:
1:3


UNIDADES:
mm

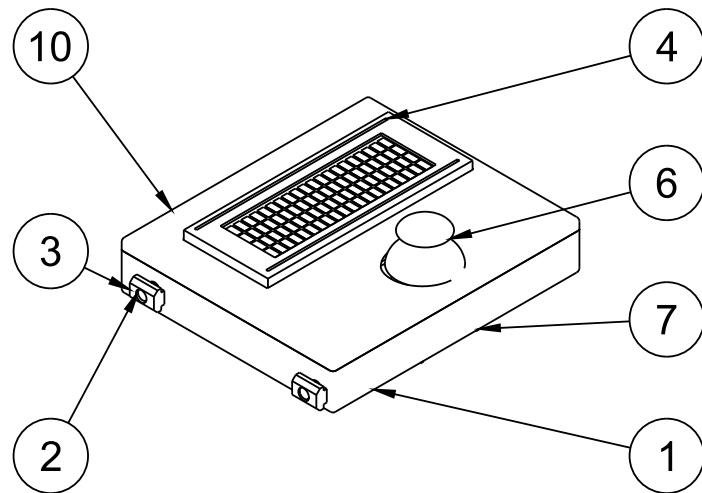
No. 27



	Universidad de Concepción			
	FECHA: 15-10-2023	TÍTULO: Base Contenedor Driver	MATERIAL: Plástico PLA	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:5	UNIDADES: mm	No. 28



	Universidad de Concepción			
	FECHA: 15-10-2023	TÍTULO: Tapa Contenedor Driver	MATERIAL: Plástico PLA	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:5	UNIDADES: mm	No. 29



Lista de piezas		
elemento	número de pieza	ctd
1	Base Contenedor Panel de Ensayo	1
2	Perno M5x8	2
3	Tuerca T M5 para perfiles V-Slot 20x20	2
4	Pantalla LCD 20x4	1
5	Perno M3x20	3
6	Módulo Joystick Arduino	1
7	Perno M3x15	6
8	Golilla M3	7
9	Tuerca M3	7
10	Tapa Contenedor Panel de Ensayo	1



Universidad de Concepción

FECHA:
15-10-2023

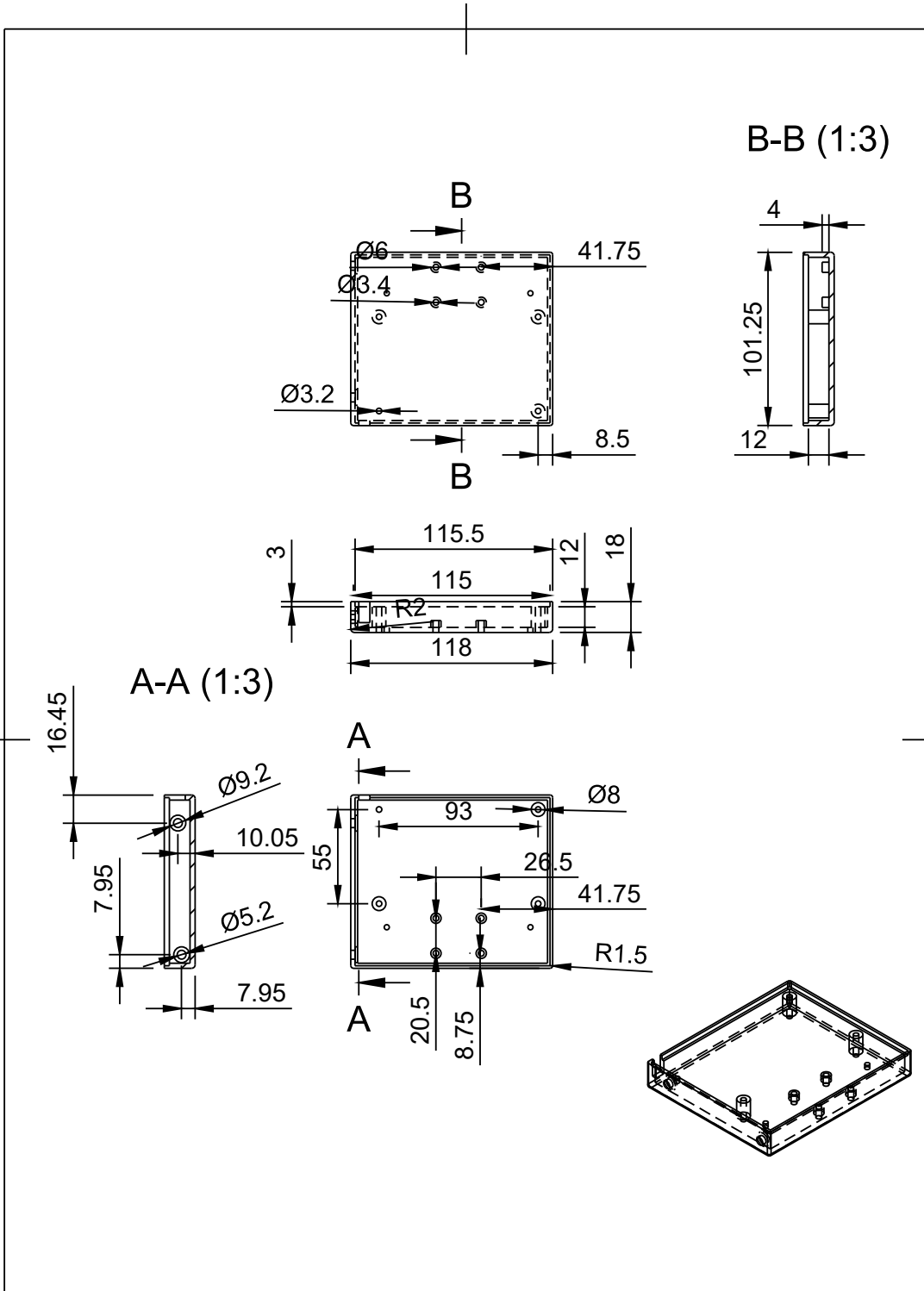
TÍTULO:
Contenedor Panel de Ensayo


DISEÑO:
Natalia Quintana

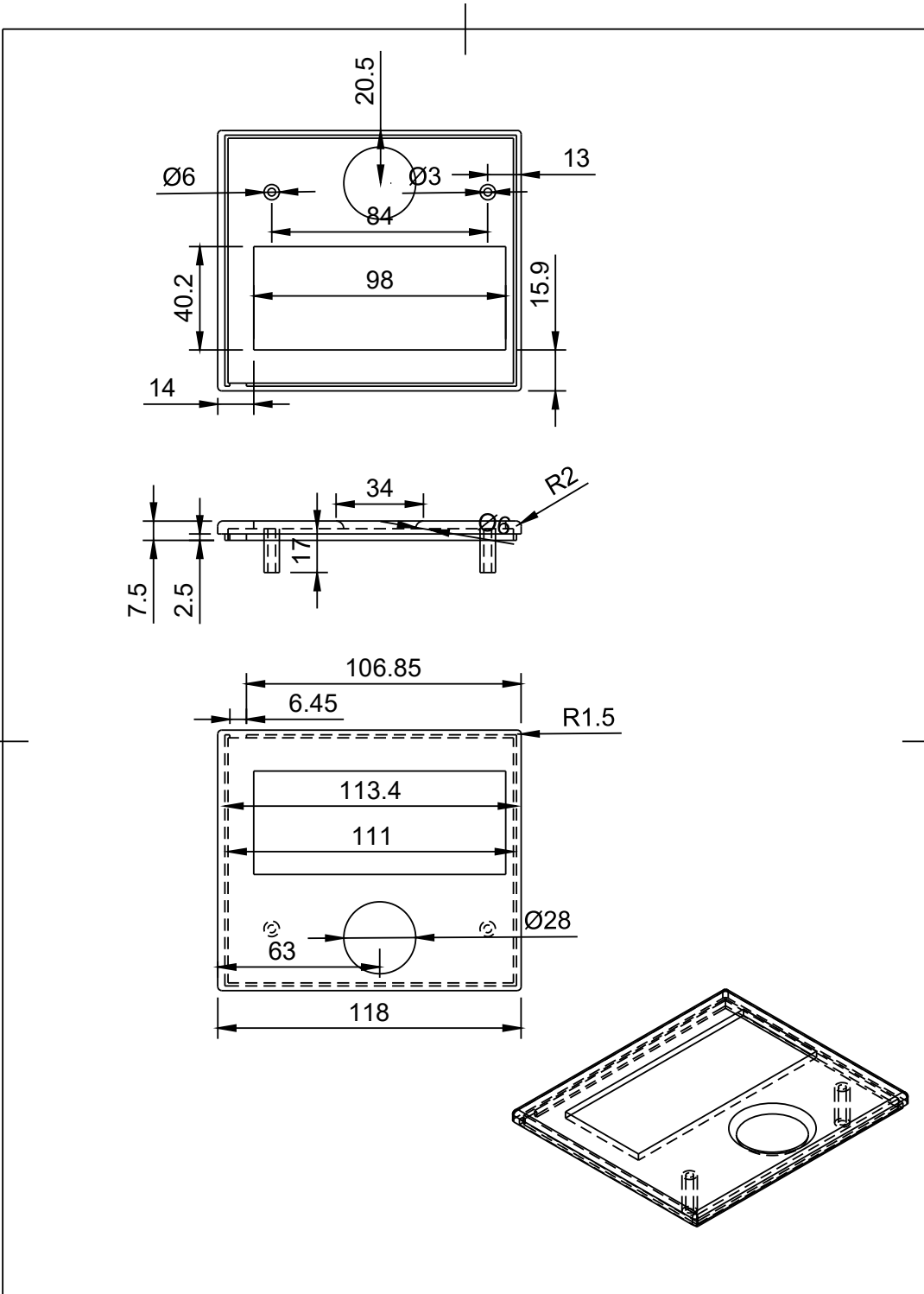
ESCALA:
1:2


UNIDADES:
mm

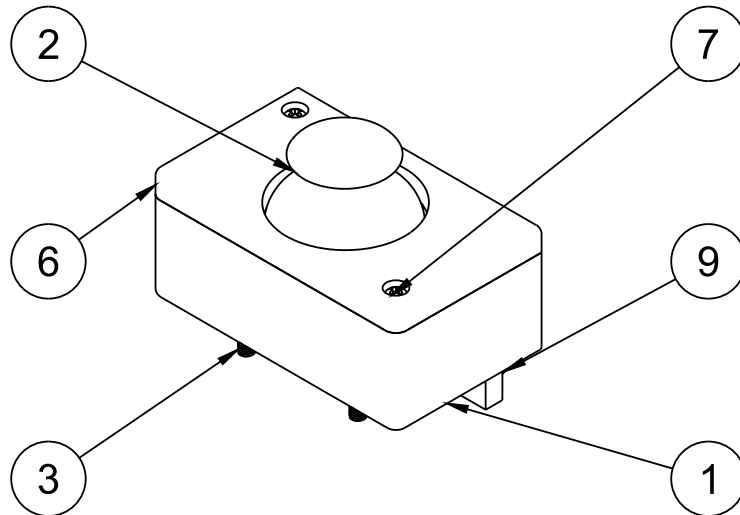
No. 30



	Universidad de Concepción			
	FECHA: 15-10-2023	TÍTULO: Base C. Panel de Control	MATERIAL: Plástico PLA	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:3	UNIDADES: mm	No. 31



	Universidad de Concepción			
	FECHA: 15-10-2023	TÍTULO: Tapa C. Panel de Control	MATERIAL: Plástico PLA	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:2	UNIDADES: mm	No. 32



Lista de piezas		
elemento	número de pieza	ctd
1	Base Contenedor Control Riel	1
2	Módulo Joystick Arduino	1
3	Perno M3x15	4
4	Golilla M3	2
5	Tuerca M3	2
6	Tapa Contenedor Control Riel	1
7	Perno M2x20	2
8	Perno M5x8	2
9	Tuerca T M5 para perfiles V-Slot 20x20	2



Universidad de Concepción

FECHA:
12-10-2023

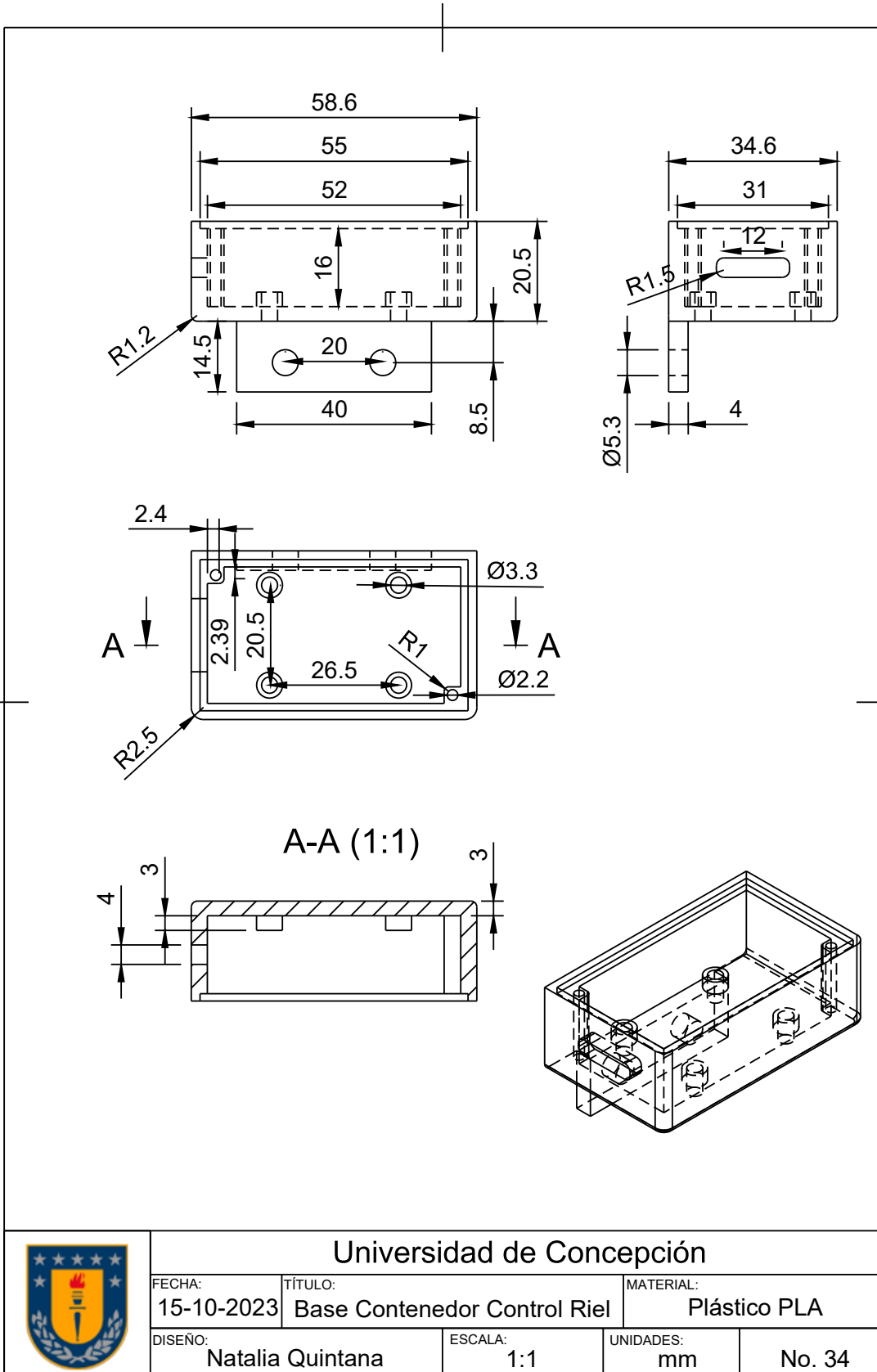
TÍTULO:
Contenedor Control Riel

DISEÑO:
Natalia Quintana

ESCALA:
1:1

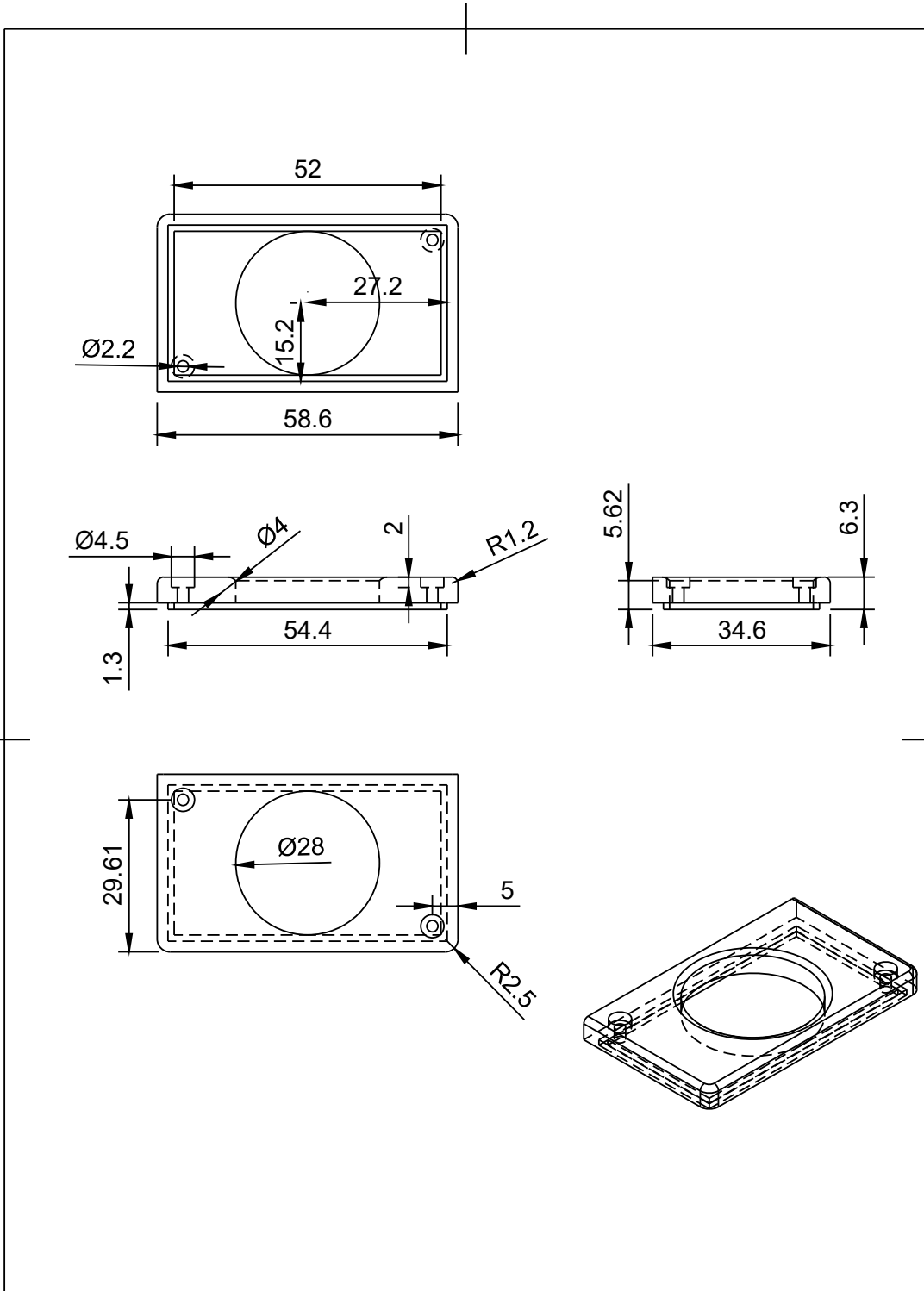
UNIDADES:
mm


No. 33

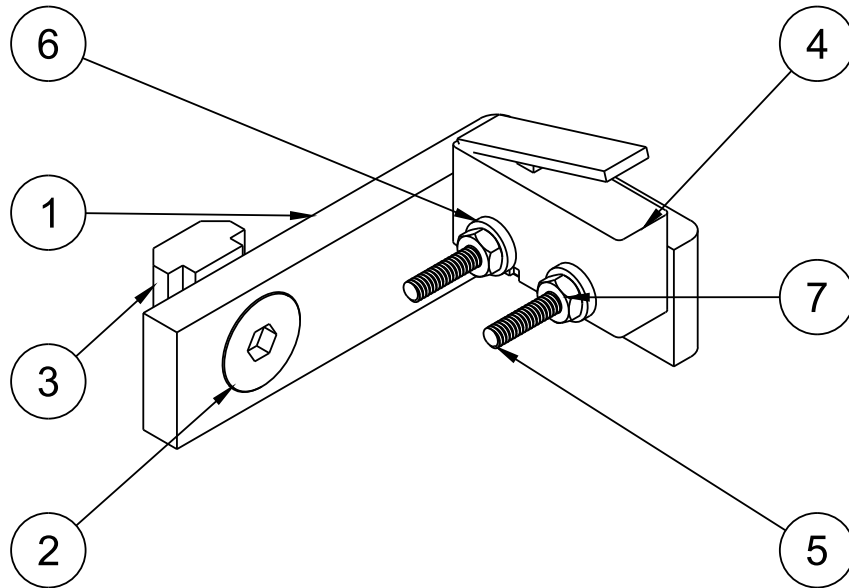


Universidad de Concepción

FECHA: 15-10-2023	TÍTULO: Base Contenedor Control Riel	MATERIAL: Plástico PLA
DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
		No. 34



	Universidad de Concepción			
	FECHA: 15-10-2023	TÍTULO: Tapa Contenedor Control Riel	MATERIAL: Plástico PLA	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm	No. 35



Lista de piezas		
elemento	número de pieza	ctd
1	Soporte Fin de Carrera	1
2	Perno M5x8	1
3	Tuerca T M5 para perfiles V-Slot 20x20	1
4	Fin de Carrera	1
5	Perno M2x20	2
6	Golilla M2	2
7	Tuerca M2	2



Universidad de Concepción

FECHA:
12-10-2023

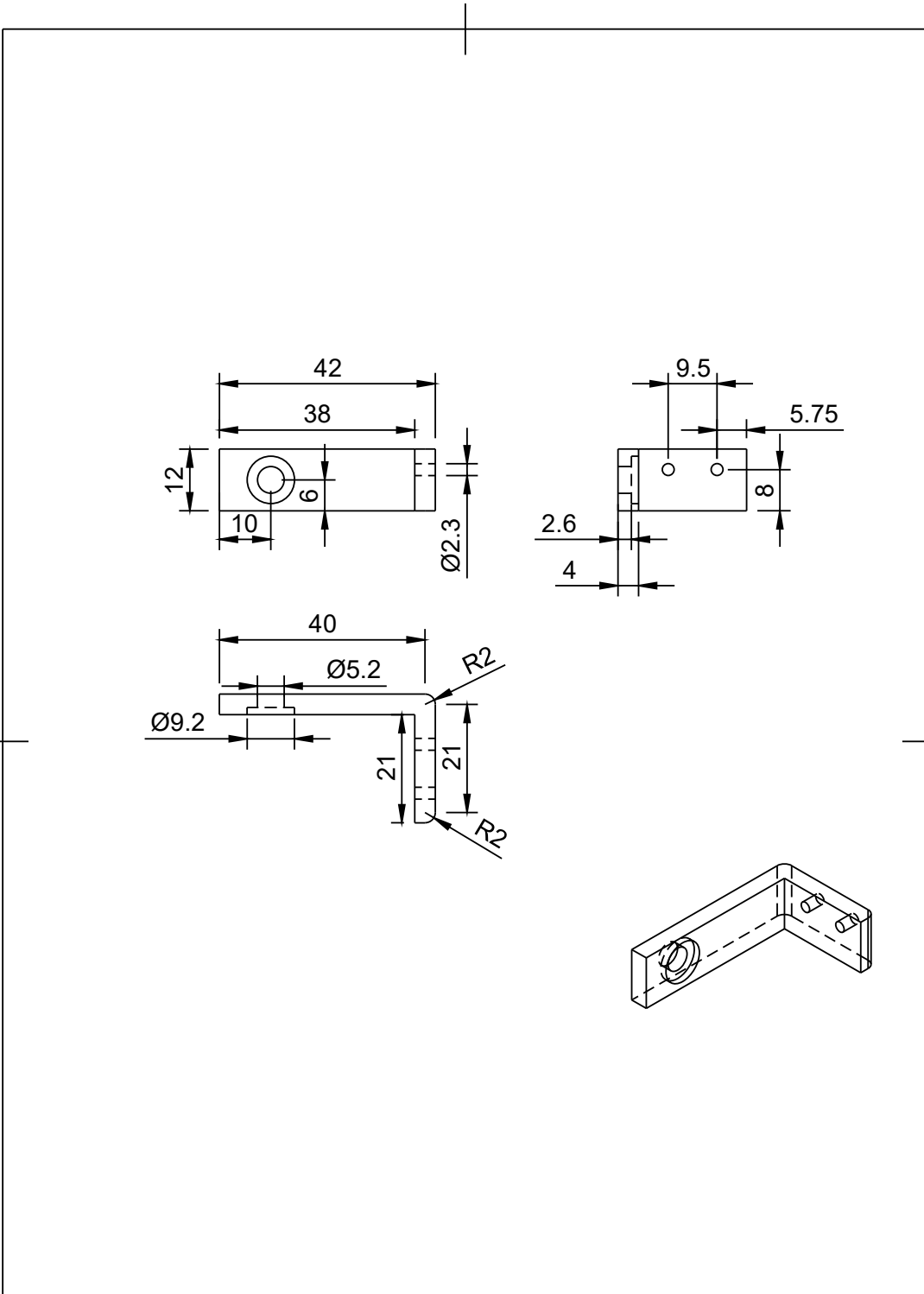
TÍTULO:
Contenedor Fin de Carrera


DISEÑO:
Natalia Quintana

ESCALA:
1:1

UNIDADES:
mm

No. 36



	Universidad de Concepción			
	FECHA: 12-10-2023	TÍTULO: Soporte Fin de Carrera	MATERIAL: Plástico PLA	
	DISEÑO: Natalia Quintana	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm	No. 37

A.3 Manual de usuario

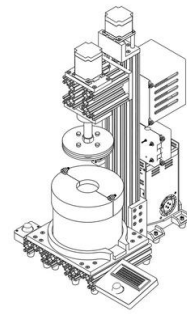
Se presenta el manual de usuario de la forma que será visto impreso.



MANUAL DE USUARIO

MÁQUINA DE DESGASTE ABRASIVO PARA MATERIAL

MODELO 1



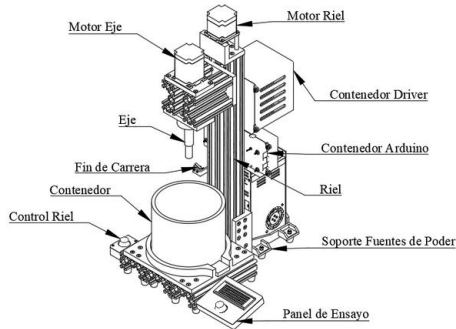
Índice

1	Características.....	4
2	Componentes principales.....	4
3	Piezas y acoples.....	5
4	Modo de uso.....	6
5	Precauciones durante el ensayo.....	7
6	Configuración ensayo.....	7
7	Limpieza y mantenimiento.....	8
8	Solución a problemas.....	8

1 Características

La Máquina de Degradación Abrasiva para Material esta diseñada para realizar ensayos utilizando probetas cilíndricas de una pulgada de diámetro y 10 mm de alto. Los ensayos se realizan a una velocidad de rotación y tiempo determinado por el usuario.

2 Componentes principales



4

3 Piezas y acoples



A.1

A.2

A.3

B

C

D

E

F

G

H

I

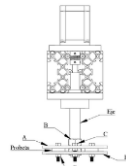
Letra	Nombre	Cantidad
A.1	Placa Superior Sin IAA	1
A.2	Placa Superior IAA1830	1
A.3	Placa Superior IAA4560	1
B	Tuerca M16	2
C	Perno M 6x30mm	4
D	Tuerca M6	8
E	Placa Inferior	1
F	Tapa	2
G	Perno M5x20mm	2
H	Gollilla M5	2
I	Tuerca M5	2

5

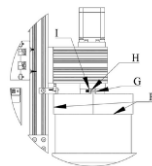
4 Modo de uso

- 1.-Rellene el Contenedor con 1.5 L de la lechada de estudio.
- 2.-Ubique las Probetas fabricadas para en ensayo como se presenta en la siguiente imagen:

Nota: Las versión de la Placa Superior a utilizar en ensamble depende del objetivo del ensayo. Las Placas con IAA inducen que la lechada impacte a las Probetas con un ángulo de ataque específico.



- 3.-Conecte las fuentes de poder y los Arduino.
- 4.-Mueva la palanca del Control Riel hasta que el Carro tope con el Fin de Carrera (la detección del Carro es automática al entrar en contacto).
- 5.-Tape Contenedor como se presenta en la siguiente imagen:



- 6.-Seleccione una configuración de ensayo moviendo y presionando la palanca del Panel de Ensayo.
- 7.-Espere a que finalice el ensayo.
- 8.-Destape el Contenedor.
- 9.-Mueva la palanca del Control Riel hasta que el Carro se eleve lo suficiente como para extraer las Probetas.
- 10.-Desconecte las fuentes de poder y los Arduino.
- 11.-Extraiga las Probetas.

6

5 Precauciones durante el ensayo

- Durante el ensayo es posible cancelar el ensayo presionando la palanca del Panel de Control. Es necesario cancelar el ensayo con el fin de cuidar la máquina cuando:
- El Motor Eje presenta una temperatura superior a 80°.
 - El Motor Eje realiza un ruido fuera de lo común.
 - Si se escucha algún componente suelto dentro del Contenedor, por ejemplo, se desprende una tuerca M6.
 - Se activa el movimiento vertical del Carro.

⚠ De no poder cancelar el ensayo desde el Panel de Control, es posible frenar el movimiento de la Máquina desconectando los Arduino.

6 Configuración ensayo

Por defecto la Máquina viene cargada con cinco configuraciones de ensayo, pero es posible modificar estas configuraciones. Para realizar la modificación se deben seguir los siguientes pasos:

- 1.-Descargue el código "ArduinoEnsayo.ino" desde el QR.



Nota: En el QR se encuentran varios archivos con información complementaria sobre la Máquina.

- 2.-Abra el archivo en un computador.
- 3.-Conecte el Arduino que se encuentra en el Contenedor Arduino por el lado del Panel de Ensayo al computador utilizando un cable tipo B a USB.
- 4.-Modifique la siguiente parte del código escribiendo el tiempo de duración en segundos y la velocidad de rotación en revoluciones por minuto.

```

18 //Motor configuración
19 Accionador motor(1, 10, 12);
20 float pasos = 400.0; //pasos del motor
21 float v[numerov] = {120, 350, 10, 10}; //tiempo en segundos
22 float v[numerov] = {100, 500, 750, 1000, 10}; //RPM
    
```

- 5.-Cargue los cambios al Arduino.

7

7

Limpieza y mantenimiento

La limpieza de todas las piezas (excepto componentes electrónicos) se puede realizar con agua y lava loza. Se recomienda aspirar la superficie de Máquina una vez terminado el ensayo, también se puede aspirar el interior de los contenedores de componentes electrónicos.

Las acciones recomendadas de mantenimiento son las siguientes:

- **Cambio de sistemas de acople:** Se recomienda cambiar los sistemas de acople presentados en ítem 2 cada 50 horas de funcionamiento o cada vez que se observe deterioro.
- **Lubricación varilla rosca del Riel:** Es necesario lubricar la varilla rosca del Riel al menos una vez cada 50 horas de funcionamiento. Se debe aplicar una capa fina de lubricante en toda la extensión de la varilla.
- **Lubricación del rodamiento del Eje:** Es necesario lubricar el rodamiento del Eje al menos una vez cada 50 horas de funcionamiento.



La limpieza y el mantenimiento se deben realizar con la Máquina desenchufada.

8

Solución a problemas

A continuación se presentan problemas posibles y sus soluciones:

Problema	Solución
Motor Eje vibra pero no gira.	La causa es que el motor no está recibiendo la cantidad de corriente necesaria para funcionar. Se soluciona aumentando el amperaje desde el Driver o cambiando de enchufe el conector de la fuente de poder.
Se rompió una pieza de la Máquina.	En el QR presente en el ítem 6 se encuentra un archivo con los planos de ensamble y de cada pieza de la Máquina. Además de un archivo .step con todas las piezas para realizar la fabricación de estas.
La Máquina presenta un ruido fuera de lo común al rotar el Eje.	El ruido fuerte repentino al rotar el Eje se debe a falta de lubricación. Para solucionar este problema se recomienda lubricar el rodamiento.

Contacto Diseñador
 Natalia Quintana Ulloa
 nat.quintana.ulloa@gmail.com

A.4 Datos ensayo factorial

Tabla 6.1: Porcentaje de desgaste obtenido de los tratamientos del ensayo factorial.

	350 [rpm]		500 [rpm]	
	30%	60%	30%	60%
Sin IAA	0,37	5,48	6,64	8,78
	3,45	3,42	5,87	10,88
	2,93	3,57	8,18	11,41
	1,63	7,40	8,59	7,80
18 [°]	5,10	2,91	4,39	12,64
	3,69	2,95	3,61	9,72
	0,26	3,25	3,30	11,46
	4,22	5,66	6,22	9,80
30 [°]	2,01	5,90	3,05	5,54
	4,08	2,45	6,33	2,71
	0,28	4,32	4,53	5,69
	3,08	2,79	3,49	6,94
45 [°]	1,60	1,97	7,59	3,46
	3,16	4,24	4,95	8,21
	2,62	2,25	8,05	13,98
	2,84	5,94	7,16	10,02
60 [°]	1,56	4,09	4,47	4,71
	3,15	5,65	1,04	5,67
	3,27	2,76	3,36	5,79
	3,14	6,41	0,61	8,53