



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA**  
**MECÁNICA**



**Diseño y fabricación de una máquina inyectora de plástico con  
compresión neumática para reciclaje de PLA.**

POR

**Darío Nicolás Segura Alarcón**

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

Profesores Guía:

Carlos Andrés Medina Muñoz

Daniel Alonso González Monsalves

Marzo 2024  
Concepción (Chile)

© 2024 Dario Nicolas Segura Alarcon

© 2024 Dario Nicolas Segura Alarcon

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

## **Agradecimientos**

Mis primeras palabras de agradecimiento van dirigidas obviamente a mi familia, a mi madre Valentina Alarcón por levantarse todos los días a hacer el almuerzo y esperarme con algo rico para comer cuando regresaba de clases, a mi padre Marcelo Segura por sacarse la mugre todos los días trabajando para que nunca nos falte nada, a mis hermanas Daniela y Lucía por su preocupación a lo largo de este camino recorrido y la disposición a siempre ayudar en lo que fuese posible. Y a todas las mascotas que he tenido durante estos años, por las alegrías y risas que dan, sobre todo en los periodos de estrés.

A las familias Alarcón-Cuevas y Segura-Coloma por apoyarme siempre estando en las buenas y en las malas, por todas las buenas energías, la preocupación y el cariño que me entregaron en todo este proceso, por todos los buenos momentos vividos en familia.

A mis amigos que aún mantengo desde el colegio, y los pocos que hice en la universidad, por su apoyo y lealtad durante todos estos años. Igualmente, por estar presentes en momentos de distracción como las largas noches de juego y las fiestas donde nos poníamos al día.

Agradecer también, a los profesores Carlos Medina y Daniel González por confiar en mí para realizar este proyecto, por su apoyo, orientación y gestiones realizadas desde mi Proyecto de Ingeniería Mecánica hasta la presente Memoria de Título.

Por último, agradecer a don Mario Ramírez y don Rodrigo Moreno quienes se encargaron de maquinar y llevar a la realidad todas las piezas diseñadas. Y a todos los trabajadores del taller por su buena disposición a ayudar, sus consejos y orientación respectiva al diseño de la máquina.

*Esta memoria está dedicada...*

A mi familia y amigos por su apoyo incondicional durante todos estos años.

Y una dedicatoria especial para mi segunda madre, mi querida tía Angélica que se encuentra descansando en paz. A quien siempre recordaré como una persona honesta y de carácter que no se dejaba pasar a llevar por nadie, pero a la vez era extremadamente alegre y cariñosa con sus seres queridos.

## Resumen

La producción de biopolímeros es un tema que ha cobrado interés, debido a las ventajas que estos ofrecen frente a los plásticos de origen petroquímico. Uno de los biopolímeros con aumento en su demanda durante los últimos años, es el ácido poliláctico (PLA). Este se caracteriza por ser un material no tóxico, biodegradable compostable, con potencial de uso y beneficio ambiental, en comparación con los plásticos sintéticos. Debido a esto, el PLA es el material más comúnmente utilizado en el modelado por deposición fundida FDM comúnmente conocido como impresión 3D.

Con la intención de reciclar y reutilizar los desechos de PLA que deja la impresión 3D en el laboratorio de manufactura digital de la facultad de ingeniería de la Universidad de Concepción, nace la necesidad de diseñar y fabricar una máquina inyectora de PLA bajo la hipótesis de que se fomentará la adopción de prácticas más respetuosas con el medio ambiente en la industria del plástico, al demostrar la viabilidad de una fabricación sostenible de productos con valor añadido.

La metodología implementada involucra una investigación exhaustiva sobre el reciclaje de PLA, así como sobre los procesos de inyección de plástico y el diseño de maquinaria específica para este propósito. Se establecen actividades detalladas que abarcan desde la selección de parámetros y diseño de prototipos en software hasta la identificación de materiales y herramientas necesarios para la construcción de la máquina.

Se diseñó y fabricó una máquina inyectora de termoplásticos, preferentemente PLA, con una capacidad máxima de inyección de 100 gramos. Cuya configuración de trabajo es vertical y realiza la inyección con un cilindro neumático de doble efecto, el cual trabaja a una presión de inyección máxima de 8 bar (116 psi). La acción y retracción del émbolo de inyección se realiza por medio de una válvula de control de flujo de aire. El sistema de dosificación corresponde a una tolva prismática removible, y el sistema térmico posee un regulador de temperatura analógico capaz de mantener una temperatura constante en el cilindro de plastificación entre 30 y 400 °C durante el ciclo de operación. El sistema de cierre corresponde a una prensa plana de 4 pulgadas operada de forma manual.

La máquina fabricada cumple con su objetivo principal de reciclar y reutilizar los desechos de PLA dejados por las impresoras 3D dándoles una nueva utilidad y valor a los mismos en función de las necesidades del laboratorio, además de promover prácticas más amigables con el medioambiente.

**Palabras clave:** Ácido poliláctico, Reciclaje de PLA, Máquina inyectora de plástico.

## Abstract

The production of biopolymers has gained interest due to the advantages they offer over petrochemical-based plastics. One of the biopolymers that has seen an increase in demand in recent years is polylactic acid (PLA). This material is characterized by being non-toxic, biodegradable, compostable, and offering environmental benefits compared to synthetic plastics. Because of this, PLA is the most commonly used material in Fused Deposition Modeling (FDM), commonly known as 3D printing.

With the intention of recycling and reusing the PLA waste generated by 3D printing in the digital manufacturing lab of the Faculty of Engineering at the University of Concepción, the need arose to design and manufacture a PLA injection molding machine. The underlying hypothesis is that promoting the adoption of more environmentally friendly practices in the plastics industry can be achieved by demonstrating the viability of sustainable manufacturing of value-added products.

The methodology implemented involves thorough research on PLA recycling, plastic injection processes, and the design of specific machinery for this purpose. Detailed activities are outlined, ranging from the selection of parameters and prototype design in software to the identification of materials and tools necessary for the machine's construction.

A thermoplastics injection molding machine, primarily for PLA, was designed and manufactured with a maximum injection capacity of 100 grams. The machine operates with a vertical working configuration and performs the injection using a double-acting pneumatic cylinder, which operates at a maximum injection pressure of 8 bar (116 psi). The action and retraction of the injection plunger are controlled by an air flow control valve. The dosing system consists of a removable prismatic hopper, and the thermal system includes an analog temperature regulator capable of maintaining a constant temperature in the plastification cylinder between 30 and 400 °C during the operation cycle. The clamping system is a 4-inch flat press operated manually.

The machine successfully meets its primary objective of recycling and reusing PLA waste generated by 3D printers, giving it new utility and value according to the lab's needs, while also promoting more environmentally friendly practices.

**Keywords: Polylactic Acid, PLA Recycling, Plastic Injection Molding Machine.**

## Tabla de contenidos

|  |           |
|--|-----------|
| Resumen .....  | iii       |
| Abstract.....  | iv        |
| Tabla de contenidos.....   | v         |
| Lista de Tablas.....   | ix        |
| Lista de figuras .....   | x         |
| Glosario .....   | xii       |
| <b>1 CAPÍTULO 1: Introducción.....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Planteamiento del problema .....   | 1         |
| 1.2 Objetivos.....   | 2         |
| 1.2.1 Objetivo general .....   | 2         |
| 1.2.2 Objetivos específicos.....   | 2         |
| 1.3 Hipótesis .....  | 2         |
| 1.4 Metodología.....   | 3         |
| <b>2 CAPÍTULO 2: Marco teórico.....</b>  | <b>5</b>  |
| 2.1 Introducción al Ácido Poliláctico (PLA).....   | 5         |
| 2.2 Propiedades del Ácido Poliláctico (PLA).....   | 5         |
| 2.3 Estudios previos sobre el reciclaje del Ácido Poliláctico (PLA).....                                       | 6         |
| 2.4 Aplicaciones del Ácido Poliláctico (PLA) en ingeniería.....  | 6         |
| 2.5 Introducción al moldeo por inyección de plástico .....   | 7         |
| 2.6 Máquinas inyectoras de plástico.....   | 7         |
| 2.7 Clasificaciones de las máquinas inyectoras de plástico.....  | 8         |
| 2.7.1 Clasificación de acuerdo a la geometría .....  | 8         |
| 2.7.2 Clasificación de acuerdo al tipo de elemento de inyección.....   | 9         |
| 2.8 Características básicas de una máquina inyectora de plástico.....  | 10        |
| <b>3 CAPÍTULO 3: Definición de parámetros de trabajo y estructura de la máquina inyectora de plástico.....</b> | <b>13</b> |
| 3.1 Definición de las características de la máquina a diseñar .....  | 13        |
| 3.2 Determinación de parámetros de inyección.....  | 13        |
| 3.2.1 Presión de inyección del PLA .....   | 13        |

|  |    |
|--|----|
| 3.2.2 Presión de inyección máxima .....  | 14 |
| 3.2.3 Fuerza de inyección máxima .....   | 14 |
| 3.2.4 Temperatura de trabajo del PLA .....   | 14 |
| 3.2.5 Determinación del área proyectada en el molde .....                              | 15 |
| 3.2.6 Determinación de la fuerza de cierre máxima .....                                | 15 |
| 3.2.7 Determinación del área total del molde .....                                     | 15 |
| 3.3 Selección de componentes de la estructura de la máquina inyectora de plástico..... | 16 |
| 3.3.1 Selección del sistema de inyección .....   | 16 |
| 3.3.2 Selección del tipo de unidad de cierre .....                                     | 16 |
| 3.3.3 Determinación de tipo de configuración de trabajo de la máquina .....            | 17 |
| 3.3.4 Selección del sistema de alimentación .....                                      | 17 |
| 3.3.5 Selección del sistema de fundición.....  | 18 |
| 3.3.6 Selección de la unidad de potencia.....  | 18 |
| 4 CAPÍTULO 4: Dimensionamiento de piezas y selección de materiales .....               | 19 |
| 4.1 Diseño conceptual de la máquina inyectora de PLA .....                             | 19 |
| 4.2 Diseño de las placas de fijación de la estructura .....                            | 19 |
| 4.3 Diseño del émbolo de inyección.....  | 21 |
| 4.3.1 Cálculo de la tolerancia del émbolo basado en la dilatación térmica .....        | 23 |
| 4.4 Diseño del cilindro de plastificación .....  | 24 |
| 4.5 Diseño de la boquilla de inyección.....  | 26 |
| 4.6 Diseño de la tolva de alimentación.....  | 26 |
| 4.7 Diseño de la placa de fijación del cilindro de plastificación .....                | 27 |
| 4.8 Diseño de bujes guías .....  | 27 |
| 4.9 Diseño de las columnas de soporte.....   | 28 |
| 4.10 Diseño de los resortes .....  | 31 |
| 4.11 Selección de la unidad de cierre .....  | 35 |
| 5 CAPÍTULO 5: Sistemas de control térmico y de presión .....                           | 36 |
| 5.1 Selección del sistema térmico de la máquina inyectora .....                        | 36 |
| 5.2 Selección de los elementos del circuito eléctrico .....                            | 38 |
| 5.3 Diseño de caja de conexiones eléctricas.....                                       | 40 |
| 5.4 Selección de elementos neumáticos .....  | 41 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5.5   | Diseño de soporte para válvula de control de flujo de aire .....   | 43 |
| 6     | CAPÍTULO 6: Costos de fabricación de la máquina inyectora de PLA .....   | 44 |
| 7     | CAPÍTULO 7: Construcción y montaje de la máquina inyectora de plástico con compresión neumática de tipo vertical.....  | 46 |
| 7.1   | Construcción de los elementos estructurales de la máquina inyectora.....   | 46 |
| 7.1.1 | Maquinado de las columnas de soporte .....   | 46 |
| 7.1.2 | Maquinado de la boquilla de inyección y el cilindro de plastificación .....  | 46 |
| 7.1.3 | Maquinado del émbolo de inyección.....   | 47 |
| 7.1.4 | Maquinado de la placa base y la placa de fijación del cilindro neumático .....   | 47 |
| 7.1.5 | Maquinado de la placa de fijación del cilindro de plastificación .....   | 48 |
| 7.1.6 | Maquinado de la tolva de alimentación.....   | 48 |
| 7.1.7 | Impresiones 3D de caja para conexiones eléctricas y soporte para fijación de válvula de control de flujo de aire ..... | 49 |
| 7.2   | Montaje de la máquina inyectora de plástico .....  | 49 |
| 7.2.1 | Montaje de la estructura base de la máquina inyectora .....  | 49 |
| 7.2.2 | Montaje de circuito neumático .....  | 50 |
| 7.2.3 | Montaje del circuito eléctrico .....   | 51 |
| 7.2.4 | Montaje del sistema de cierre del molde .....  | 52 |
| 8     | CAPÍTULO 8: Pruebas de inyección .....   | 53 |
| 8.1   | Prueba de inyección sin molde .....  | 53 |
| 8.1.1 | Comentarios tras la prueba de inyección sin molde .....  | 54 |
| 8.1.2 | Puesta a punto de la máquina inyectora de plástico .....   | 55 |
| 8.2   | Pruebas de inyección con molde .....   | 56 |
| 8.2.1 | Primera prueba de inyección con molde.....   | 56 |
| 8.2.2 | Segunda prueba de inyección con molde .....  | 58 |
| 9     | CAPÍTULO 10: Conclusiones y recomendaciones.....   | 59 |
| 9.1   | Conclusiones.....  | 59 |
| 9.2   | Recomendaciones para trabajos futuros. ....  | 59 |
| 10    | Bibliografía.....  | 60 |
| 11    | ANEXO A: Manuales de uso de la máquina.....  | 62 |
| 12    | ANEXO B: Selección de pernos de fijación del cilindro neumático .....  | 65 |

|   |    |
|---|----|
| 13 ANEXO C: Cálculo de las tolerancias entre agujeros y columnas.....   | 66 |
| 14 ANEXO D: Selección del electrodo a utilizar en las soldaduras .....  | 69 |
| 15 ANEXO E: Selección de tuercas hexagonales para ajuste de placa.....  | 71 |
| 16 ANEXO F: Selección de pernos de fijación de la prensa plana .....    | 73 |
| 17 ANEXO G: Ensamblaje de la estructura base la maquina inyectora ..... | 74 |
| 18 ANEXO H: Tablas y figuras .....                                      | 76 |

## Lista de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Propiedades físicas del PLA y sus distintas configuraciones. (Fuente [4]).....   | 5  |
| Tabla 2: Propiedades térmicas del PLA. ....   | 14 |
| Tabla 3: Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga del émbolo de inyección.<br>.....                                    | 22 |
| Tabla 4: Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga del cilindro de<br>plastificación.....                               | 24 |
| Tabla 5: Constantes A y m para estimar la resistencia de tensión mínima de alambres para<br>fabricar resortes comunes. (Fuente [13])..... | 33 |
| Tabla 6: Costos de materiales de la estructura de la máquina. ....  | 44 |
| Tabla 7: Costos de mano de obra.....  | 45 |
| Tabla 8: Costos totales de la máquina inyectora. ....   | 45 |
| Tabla 9: Recomendaciones para inyectar PLA reciclado. ....  | 58 |

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Prototipos creados con impresoras 3D en el Laboratorio de Manufactura Digital.                       | 6  |
| Figura 2: Molde utilizado en el Laboratorio de Manufactura Digital.  | 8  |
| Figura 3: Disposiciones de trabajo de las máquinas inyectoras .  | 8  |
| Figura 4: Tipos de máquina inyectora de émbolo. (Fuente [11])  | 9  |
| Figura 5: Máquina de émbolo con preplasticación. (Fuente[11])  | 9  |
| Figura 6: Máquina de tornillo recíproco. (Fuente [11])   | 10 |
| Figura 7: Esquema del área proyectada de una pieza en el molde.  | 15 |
| Figura 8: Cilindro neumático de doble efecto seleccionado.   | 16 |
| Figura 9: Prensa plana de banco.   | 17 |
| Figura 10: Configuración de trabajo vertical.  | 17 |
| Figura 11: Tolva prismática.   | 17 |
| Figura 12: Resistencias eléctricas tipo banda.   | 18 |
| Figura 13: Diseño conceptual de la máquina inyectora de PLA.   | 19 |
| Figura 14: Diseño de la placa base y la placa para fijación del cilindro neumático.                            | 20 |
| Figura 15: Viga con apoyos fijos y carga central. (Fuente [13])  | 20 |
| Figura 16: Relación esfuerzo-tiempo para esfuerzo repetido. (Fuente [13])                                      | 21 |
| Figura 17: Diseño del émbolo de inyección.   | 23 |
| Figura 18: Diseño del cilindro de plastificación.  | 25 |
| Figura 19: Diseño de la boquilla de inyección.   | 26 |
| Figura 20: Diseño de la tolva de alimentación.   | 26 |
| Figura 21: Diseño de la placa de fijación del cilindro de plastificación.                                      | 27 |
| Figura 22: Diseño de los bujes guías   | 27 |
| Figura 23: a) DCL considerando la suma de pesos sobre las columnas, b) DCL cuando actúa el cilindro neumático. | 28 |
| Figura 24: Diseño de las columnas de soporte.  | 31 |
| Figura 25: Resortes de compresión seleccionados.   | 35 |
| Figura 26: Prensa plana morsa modelo MOCM0140.   | 35 |
| Figura 27: Calefactor de boquilla.   | 38 |
| Figura 28: Cable de poder de 3 hebras.   | 38 |
| Figura 29: Interruptor basculante de 4 pines.  | 38 |
| Figura 30: Controlador de temperatura REX-C100.  | 39 |
| Figura 31: Relé SSR-40 DA con su disipador de calor.   | 39 |
| Figura 32: Termocupla tipo k.  | 39 |
| Figura 33: Esquema de conexiones del circuito eléctrico.   | 40 |
| Figura 34: Diseño de la caja de conexiones eléctricas.   | 40 |
| Figura 35: Válvula reguladora de presión de aire modelo SR200-06.  | 41 |
| Figura 36: Válvula de control de flujo de aire 5/2 modelo M5B210-08.   | 41 |
| Figura 37: Regulador de caudal en tipo codo 90°.   | 42 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 38: Conector tipo T con reducción de 10 a 8 mm. ....   | 42 |
| Figura 39: Válvula de bola seleccionada. ....   | 42 |
| Figura 40: Manguera neumática de 8 mm de poliuretano. ....  | 43 |
| Figura 41: Diseño del soporte para la válvula de control de flujo de aire. ....                       | 43 |
| Figura 42: Columnas de soporte de acero ASTM A36. ....  | 46 |
| Figura 43: Boquilla de inyección y cilindro de plastificación de acero AISI 1045. ....                | 47 |
| Figura 44: Émbolo de inyección de acero AISI 1045. ....   | 47 |
| Figura 45: Placa base y placa de fijación del cilindro neumático de acero ASTM A36. ....              | 47 |
| Figura 46: Placa de fijación del cilindro de plastificación de acero ASTM A36. ....                   | 48 |
| Figura 47: Tolda de alimentación de acero AISI 1020. ....   | 48 |
| Figura 48: Caja de conexiones eléctricas y soporte de válvula de control impresas en PLA. ....        | 49 |
| Figura 49: Ensamblaje de la estructura base la máquina inyectora. ....                                | 49 |
| Figura 50: Conexión entre la red de aire del taller y la válvula de bola del circuito neumático. .... | 50 |
| Figura 51: Ajuste del émbolo de inyección en vástago del cilindro neumático. ....                     | 50 |
| Figura 52: Conexión entre válvula de control de flujo de aire y cilindro neumático. ....              | 51 |
| Figura 53: Elementos del circuito eléctrico ajustados en la caja de conexiones. ....                  | 51 |
| Figura 54: Ajuste de calefactores boquilla y termocupla en el cilindro de plastificación. ....        | 52 |
| Figura 55: Ajuste de la prensa plana en la placa base. ....   | 52 |
| Figura 56: Material dentro del cilindro de plastificación a los 10 y 15 minutos respectivamente. .... | 53 |
| Figura 57: Prueba de inyección de PLA sin molde. ....   | 54 |
| Figura 58: PLA solidificado en el émbolo de inyección y filtración de PLA en unión roscada. ....      | 54 |
| Figura 59: Nuevos bujes guías y nuevo émbolo de inyección. ....                                       | 55 |
| Figura 60: Modificaciones realizadas a la boquilla y el cilindro de plastificación. ....              | 55 |
| Figura 61: Cantidad mínima de material que la máquina puede inyectar. ....                            | 56 |
| Figura 62: Pre calentamiento del molde en un horno a 240 °C. ....                                     | 57 |
| Figura 63: Probetas moldeadas con presencia de burbujas. ....   | 57 |
| Figura 64: Probetas moldeadas casi sin presencia de burbujas. ....                                    | 58 |

## Glosario

|                 |   |
|-----------------|---|
| PLA             | : Ácido poliláctico   |
| ABS             | : Acrilonitrilo Butadieno Estireno                                    |
| FDM             | : Modelado por Deposición Fundida                                     |
| $F_c$           | : Fuerza de cierre máxima del molde                                   |
| $A_p$           | : Área proyectada de la pieza a moldear                               |
| $C_i$           | : Capacidad de inyección  |
| $P_i$           | : Presión de inyección  |
| $F_{max}$       | : Fuerza de inyección máxima del cilindro neumático                   |
| $P_{max}$       | : Presión de inyección máxima del cilindro neumático                  |
| $\sigma_a$      | : Esfuerzo alternante   |
| $\sigma_m$      | : Esfuerzo medio  |
| $S_e$           | : Resistencia a la fatiga   |
| $S_{ut}$        | : Esfuerzo último a la tensión  |
| $n_s$           | : Factor de seguridad   |
| $k_a$           | : Factor de modificación de la condición superficial                  |
| $k_b$           | : Factor de modificación de tamaño                                    |
| $k_c$           | : Factor de modificación de la carga                                  |
| $k_d$           | : Factor de modificación de la temperatura                            |
| $k_e$           | : Factor de confiabilidad   |
| $k_f$           | : Factor de modificación de efectos diversos                          |
| $S_e'$          | : Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria                 |
| $\sigma_t$      | : Esfuerzo tangencial en cilindro de plastificación                   |
| $M$             | : Momento máximo  |
| $S$             | : Módulo de sección para secciones rectangulares                      |
| $h_{min}$       | : Espesor mínimo de placas de fijación                                |
| $L_T$           | : Diámetro exterior a la temperatura de trabajo                       |
| $P_{estático1}$ | : Carga aplicada en cada columna                                      |
| $P_{estático2}$ | : Carga máxima aplicada en cada columna cuando avanza el émbolo       |
| $L_e$           | : Largo equivalente de una columna                                    |
| $R_{min}$       | : Radio mínimo de giro  |
| SR              | : Relación de esbeltez de una columna                                 |
| $C_c$           | : Constante de columnas   |
| $P_{crítico}$   | : Carga crítica que soporta una columna para evitar pandeo            |
| $Q_{neto}$      | : Potencia entregada por las resistencias tipo banda para plastificar |

# **CAPÍTULO 1: Introducción**

## **1.1 Planteamiento del problema**

Los procesos de fabricación aditiva (AM) están siendo cada vez más populares en diversas industrias, incluyendo el proceso de modelado por deposición fundida (FDM) para la producción de productos poliméricos y el proceso de deposición de energía directa (DED) para productos metálicos. El proceso de FDM comúnmente conocido como impresión 3D, consiste en la fusión de material termoplástico y su extrusión a través de una boquilla para crear un objeto tridimensional capa por capa. Los termoplásticos comúnmente utilizados en FDM son el ácido poliláctico (PLA), el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y sus compuestos, cada uno con características únicas que los hacen adecuados para aplicaciones específicas [1].

El ácido poliláctico (PLA) es un polímero biodegradable derivado de recursos naturales renovables, como residuos de la caña de azúcar, yuca y arroz. Además, es el poliéster alifático biodegradable y renovable más ampliamente investigado y utilizado en la actualidad [2]. La investigación también ha demostrado que el PLA requiere entre un 25 y un 55 % menos de energía fósil que los polímeros a base de petróleo para su fabricación. Debido a esto, y a que tiene una temperatura de fusión más baja que el ABS, es el material más utilizado en el modelado por deposición fundida [3].

El Laboratorio de Manufactura Digital de la Universidad de Concepción utiliza el PLA como principal material para prototipado, lo que genera una gran cantidad de desperdicios a partir de estructuras de soporte y piezas descartadas, que generalmente no se reciclan en el interior.

Hasta la fecha, existe una investigación limitada con respecto al reciclaje de residuos de la impresión 3D con un enfoque en las propiedades mecánicas y térmicas. Los estudios concluyen que es factible reciclar los restos que deja la impresión 3D, sin embargo, el material resultante presenta algunas propiedades mecánicas reducidas [8].

Uno de los procesos más comúnmente utilizados para reciclar plástico es el moldeo por inyección, el cual es un proceso de fabricación en el cual el plástico es fundido y luego inyectado a presión en un molde para producir piezas con formas específicas.

Así, teniendo en cuenta todo lo anteriormente mencionado, nace el objetivo de esta memoria, el cual es reciclar los residuos de PLA que dejan las impresoras 3D, mediante el diseño y fabricación de una máquina inyectora de plástico con compresión neumática. Lo que a su vez permitirá analizar la factibilidad del reciclaje de dichos restos mediante pruebas de calidad en los objetos producidos, donde se evaluará la resistencia y durabilidad de estos.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Diseñar y fabricar una máquina inyectora de plástico con compresión neumática que permita reciclar los restos de ácido poliláctico (PLA) que se generan en el Laboratorio de Manufactura Digital de la Universidad de Concepción. La máquina estará diseñada para producir objetos de plástico de tamaño reducido.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Diseñar la máquina inyectora de plástico con compresión neumática.
- Seleccionar los materiales y herramientas para la construcción de la máquina.
- Ensamblar y poner a punto la máquina.
- Realizar pruebas de inyección de plástico y optimizar el proceso.

## **1.3 Hipótesis**

Se postula que se logrará un proceso eficiente y sostenible que transformará los desechos de PLA (ácido poliláctico) en piezas de mayor valor monetario y funcional, mediante el diseño y fabricación de una máquina inyectora de plástico con compresión neumática para el reciclaje de PLA a partir de residuos de la impresión 3D. Este enfoque no solo promoverá la reducción de la contaminación plástica al dar un nuevo propósito a los restos de impresión 3D, sino que también fomentará la adopción de prácticas más respetuosas con el medio ambiente en la industria del plástico, al demostrar la viabilidad de una fabricación sostenible de productos con valor añadido.

Es importante considerar que, debido a las propiedades intrínsecas del proceso de reciclaje y moldeo, se espera que, con cada ciclo de inyección, las propiedades mecánicas de la pieza moldeada disminuyan progresivamente. En este sentido, se anticipa que las piezas creadas en ciclos iniciales exhibirán mejores propiedades mecánicas en comparación con aquellos obtenidos en ciclos posteriores. Este aspecto plantea un desafío adicional en la optimización del proceso, ya que se busca encontrar un equilibrio entre la eficiencia en la producción y la calidad de los productos moldeados, considerando este factor evolutivo en las propiedades mecánicas.

## 1.4 Metodología

El diseño y fabricación de la máquina inyectora de plástico con compresión neumática se lleva a cabo de manera general, de acuerdo con el procedimiento descrito a continuación:

- I. Desarrollo del marco teórico con ayuda de la información bibliográfica recopilada, el cual estará relacionado con todos los conceptos necesarios a considerar en el diseño y fabricación de una máquina inyectora de PLA.
  - Investigar y recopilar información sobre las propiedades del PLA, sus aplicaciones y sus procesos de reciclaje. Esta etapa es crucial para comprender la viabilidad del reciclaje de PLA, sus propiedades durante el reciclaje y las técnicas más eficientes para su reutilización.
  - Investigar y recopilar información sobre el proceso de inyección de plásticos, y los tipos de máquinas inyectoras de plástico. Con el fin de comprender en profundidad el proceso de inyección de plástico, y los componentes fundamentales de una máquina inyectora de plástico. Así, se podrán identificar los requisitos técnicos, los desafíos y las mejores prácticas para el diseño de la máquina inyectora con compresión neumática, que además sea compatible con el material a utilizar y las necesidades del Laboratorio de Manufactura Digital.
  - Las investigaciones se realizarán mediante el uso de bases de datos tales como ScienceDirect, ResearchGate, Scielo y la Biblioteca de la Universidad de Concepción.
  
- II. A continuación, se desarrolla la parte práctica del proyecto, donde se comienza con la selección de alternativas y definición de parámetros de la máquina. Con el fin de definir los elementos esenciales de la máquina a diseñar tales como:
  - Unidad de alimentación: Tipo de tolva a utilizar, el tipo de elemento de inyección, y el elemento de fundición para plastificar el PLA.
  - Unidad de potencia: Conjunto de dispositivos para que la máquina pueda mover las unidades de inyección y cierre.
  - Unidad de Cierre: Tipo de mecanismo que sujetará el molde durante el proceso de inyección.
  - Unidad de Control: Dispositivos que lograrán que la máquina realice el proceso de manera eficiente y precisa.
  - Cabe destacar que la máquina a diseñar será solamente utilizada en el laboratorio de manufactura digital de la Universidad de Concepción con el fin de reutilizar los desechos de la impresión 3D y hacer pruebas a los objetos moldeados. Por lo que esto también será una limitante a la hora de definir las alternativas y parámetros de la misma.

- Posterior a esto, se diseñarán y generarán los planos de los elementos estructurales de la máquina mediante el software Inventor, para luego realizar la selección y compra de materiales y herramientas necesarias para su respectiva construcción. Finalmente, se maquinarán las piezas en el taller de la facultad de ingeniería de la Universidad de Concepción, a partir de los diseños y planos previamente realizados.
- III. Una vez se tengan maquinadas todas las piezas estructurales y comprados todos los elementos del circuito eléctrico y neumático, se realizará el montaje y puesta a punto de la máquina, con el fin de iniciar las pruebas de inyección.
- A continuación, se realizarán pruebas de inyección de plástico para optimizar el proceso y realizar las modificaciones pertinentes.

La primera parte del proyecto se desarrolla en el *CAPÍTULO 2: Marco teórico*. La segunda parte es la que abarca la mayoría del proyecto, y se desarrolla desde el *CAPÍTULO 3: Definición de parámetros de trabajo y estructura de la máquina inyectora de plástico* hasta el *CAPÍTULO 6: Costos de fabricación de la máquina inyectora de PLA*. La tercera parte del proyecto se desarrolla en el *CAPÍTULO 7: Construcción y montaje de la máquina inyectora de plástico con compresión neumática de tipo vertical* y en el *CAPÍTULO 8: Pruebas de inyección*. Finalmente, se desarrollan las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

## CAPÍTULO 2: Marco teórico

### 2.1 Introducción al Ácido Poliláctico (PLA)

El ácido poliláctico (PLA) es un polímero biodegradable derivado de recursos naturales renovables como residuos de la caña de azúcar, almidón de maíz, yuca y arroz. El PLA pertenece a la familia de los termoplásticos de poliéster alifático, con resistencia y rigidez superiores a algunos plásticos de consumo a base de petróleo, como el polipropileno (PP) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).

Este plástico es biocompatible con los tejidos humanos, resistente a la humedad, un excelente aislante eléctrico, y posee buenas propiedades ópticas y de barrera. También se considera "más ecológico" que los plásticos a base de petróleo debido a la menor emisión de CO<sub>2</sub> generada durante su ciclo de vida [5].

Su biodegradabilidad, biocompatibilidad, y bioabsorbibilidad, lo hacen capaz de sustituir al polipropileno (PP) derivado del petróleo, al poliestireno (PS) y al tereftalato de polietileno (PET) en la fabricación de fibras, espumas, telas no tejidas, empaques y películas. En la actualidad es el material más utilizados para el modelado por deposición fundida (FDM).

### 2.2 Propiedades del Ácido Poliláctico (PLA)

El PLA es un polímero semicristalino con una temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) de alrededor de 45 °C–60 °C y una temperatura de fusión ( $T_m$ ) de aproximadamente 150°C–162°C [4], una densidad de 1,21-1,25 g/cm<sup>3</sup>, una resistencia a la tracción de 21-60 MPa, un módulo elástico de 0,35-3,5 GPa [4]. Y una entalpía de fusión de 40-50 J/g. [2]

En la Tabla 1 se muestran las propiedades físicas del ácido poliláctico y sus distintas configuraciones estereoisoméricas.

**Tabla 1: Propiedades físicas del PLA y sus distintas configuraciones. (Fuente [4])**

| Properties    | Type of biopolymer |           |           |                 |
|---------------|--------------------|-----------|-----------|-----------------|
|               | Unit               | PLA       | PLLA      | PDLLA           |
| $\rho$        | g/cm <sup>3</sup>  | 1.21–1.25 | 1.24–1.30 | 1.25–1.27       |
| $\sigma$      | MPa                | 21–60     | 15.5–150  | 27.6–50         |
| $E$           | GPa                | 0.35–3.5  | 2.7–4.14  | 1–3.45          |
| $\varepsilon$ | %                  | 2.5–6     | 3.0–10.0  | 2.0–10.0        |
| $\sigma^*$    | Nm/g               | 16.8–48.0 | 40.0–66.8 | 22.1–39.4       |
| $E^*$         | kNm/g              | 0.28–2.80 | 2.23–3.85 | 0.80–2.36       |
| $T_g$         | °C                 | 45–60     | 55–65     | 50–60           |
| $T_m$         | °C                 | 150–162   | 170–200   | am <sup>b</sup> |

### 2.3 Estudios previos sobre el reciclaje del Ácido Poliláctico (PLA)

Se ha investigado el reciclaje de PLA mediante extrusión y moldeo por inyección. Zenkiewicz [7] estudió las propiedades mecánicas y térmicas del PLA extruido hasta diez ciclos. Los autores encontraron una disminución del 5,2% en la resistencia a la tracción y una disminución del 20% en la resistencia al impacto. En términos de propiedades térmicas, se encontró que la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) y la temperatura de fusión ( $T_m$ ) eran relativamente estables, mientras que la cristalinidad de las muestras aumentó del 18% al 34%.

Anderson [8] investigó las propiedades mecánicas del PLA reciclado a partir de desechos de impresión 3D con una extrusora. Se encontró que las propiedades mecánicas del PLA reciclado disminuyeron en un 11% para la resistencia a la tracción y un 5% para el módulo de tracción.

Zhao [9] investigó el reciclaje en bucle cerrado del PLA utilizado en FDM. Se encontró que el material solo puede ser utilizado durante dos ciclos en la impresión 3D debido a un deterioro significativo en la viscosidad, causada por la degradación termomecánica.

En general, se puede concluir que el reciclaje de restos de PLA a partir de desechos de la impresión 3D es factible, pero debe tenerse en cuenta que el material resultante tiene propiedades mecánicas reducidas y puede presentar impurezas.

### 2.4 Aplicaciones del Ácido Poliláctico (PLA) en ingeniería

Debido a su buena procesabilidad térmica, el PLA es adecuado para fabricar productos mediante extrusión de película, moldeo por soplado, hilado de fibras, impresión 3D, termoformado y moldeo por inyección. El Laboratorio de Manufactura Digital del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Concepción utiliza el PLA en sus impresoras 3D, como principal material para prototipado de piezas. Sin embargo, la impresión 3D suele generar residuos en forma de estructuras de soporte, filamentos fallidos o sobrantes, o incluso piezas fallidas, las cuales se van acumulando con el tiempo. En la Figura 1 se muestran algunos prototipos creados con impresoras 3D a partir de PLA.



**Figura 1: Prototipos creados con impresoras 3D en el Laboratorio de Manufactura Digital.**

## 2.5 Introducción al moldeo por inyección de plástico

El moldeo por inyección de plástico consiste en calentar un material termoplástico que se encuentra en forma granulada o en polvo hasta fundirlo en un cilindro de plastificación para posteriormente inyectarlo a presión en la cavidad de un molde en el cual tomara forma tras enfriarse. Finalmente se expulsa la pieza moldeada terminando el ciclo de moldeo.

El ciclo consta de tres etapas básica: el calentamiento del plástico hasta fundirlo, la inyección del plástico ejerciendo presión sobre este, y finalmente el moldeo del plástico inyectado.

En el moldeo por inyección, resultan de gran importancia las características de los polímeros, tales como, temperatura de transición vítrea, temperatura de fusión, peso molecular, configuración química y morfología, cristalinidad, y estabilidad.

## 2.6 Máquinas inyectoras de plástico

Una máquina inyectora de plástico, es un equipo utilizado en el proceso de fabricación de piezas de plástico. Funciona inyectando material plástico fundido en un molde para producir componentes con formas específicas y precisas. Los elementos esenciales de una máquina de inyección de plástico son:

**Unidad de inyección:** Conformada por la tolva de alimentación que se conecta al cilindro donde tiene lugar la plastificación del material sólido mediante resistencias individuales que permiten una regulación de la temperatura de la pared por zonas, para luego ser inyectarlo a presión por medio de un tornillo, o un cilindro que puede ser neumático o hidráulico. El material sale por una boquilla de inyección que se encarga de conducir el plástico fundido desde el cilindro de plastificación hacia el molde donde se formará la pieza plástica.

**Unidad de potencia:** Es el conjunto de dispositivos tales como: motores ,bombas, compresores, y válvulas, que hacen actuar a los elementos de las unidades de inyección y cierre. Pueden ser hidráulicos, neumáticos y eléctricos.

**Unidad de control:** Es el conjunto de dispositivos que hacen que la máquina realice el proceso de manera eficiente y precisa. Proporciona una interfaz para los operadores para configurar y ajustar los parámetros del proceso, tales como la presión de inyección y la temperatura de fusión del material utilizado.

**Unidad de cierre:** Es el conjunto de dispositivos que se encargan de sujetar el molde, y mantenerlo cerrado durante el proceso de inyección. Al igual que la unidad de potencia, la unidad de cierre puede utilizar elementos hidráulicos o neumáticos en máquinas que trabajan a altas presiones. En máquina más pequeñas la unidad de cierre consta de una prensa plana de banco.

**Molde:** Es la pieza que define la forma y características del producto final, está constituido al menos por dos mitades, una mitad positiva y la otra negativa, que juntas forman la cavidad con la forma de la pieza a moldear. Las partes del molde de inyección son: Bebedero, mazarota, canales de alimentación, ramificaciones, cavidades de moldeo y recortes.

El bebedero es la parte del molde sobre la que se apoya la boquilla, y el polímero fundido que ocupa el bebedero cuando termina el moldeo, recibe el nombre de mazarota. Hay casos en que el bebedero comunica directamente con la cavidad de moldeo, mientras que en otras el bebedero se ramifica en varios canales de alimentación que llegan hasta las cavidades de moldeo. En la Figura 2 se muestra el molde utilizado en el Laboratorio de Manufactura Digital, con el cual se moldean probetas de plástico.



Figura 2: Molde utilizado en el Laboratorio de Manufactura Digital.

## 2.7 Clasificaciones de las máquinas inyectoras de plástico

### 2.7.1 Clasificación de acuerdo a la geometría

Existen maquinas con diferentes disposiciones de trabajo, como la de trabajo horizontal, configuraciones de husillo vertical y unidad de cierre horizontal, y de trabajo completamente vertical. En la Figura 3 se presenta un esquema con las distintas disposiciones de trabajo que puede tener una máquina inyectora de plástico.

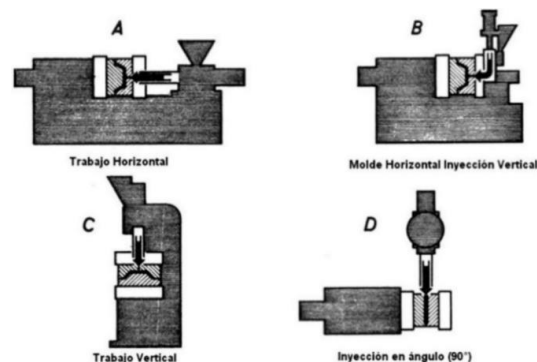


Figura 3: Disposiciones de trabajo de las máquinas inyectoras .

### 2.7.2 Clasificación de acuerdo al tipo de elemento de inyección

De acuerdo con el tipo de elemento de inyección, las máquinas inyectoras de plástico se clasifican en:

**Máquina de émbolo (o Pistón):** En una máquina émbolo, el material fundido es empujado axialmente por medio de un émbolo o pistón hacia el molde realizando el proceso de inyección. Este tipo de máquinas puede ser de una o dos etapas, la diferencia clave es que, en una máquina de dos etapas el material se expande y se comprime en dos etapas separadas por lo que cuentan con un cilindro externo en el cual el material se calienta para seguidamente introducirlo en el cilindro de plastificación e inyectarlo en el molde. En la Figura 4 se presentan un esquema de ambos tipos de máquina inyectora a pistón.

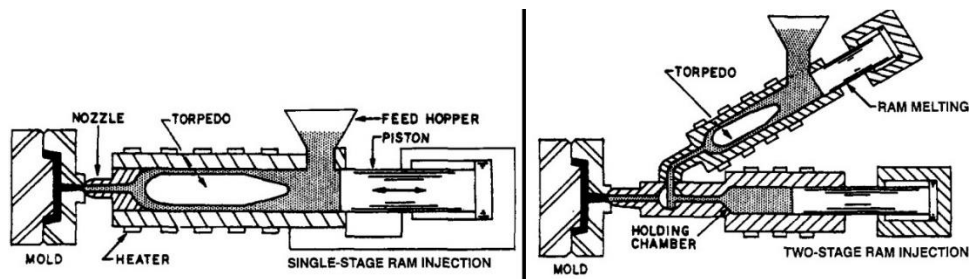


Figura 4: Tipos de máquina inyectora de émbolo. (Fuente [11])

**Máquina de émbolo con preplastificación:** Este tipo de máquinas cuenta con dos camisas, el material se alimenta en la primera donde una husillo plastifica el material y luego lo alimenta a la segunda camisa a través de una válvula de no retorno. A continuación, un émbolo en la segunda camisa inyecta el material fundido en el molde. En la Figura 5 se presenta un esquema de una máquina inyectora de émbolo con preplastificación a partir de un husillo.

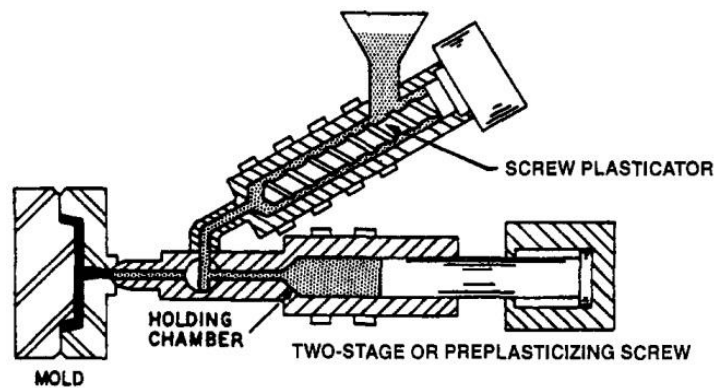


Figura 5: Máquina de émbolo con preplastificación. (Fuente[11])

**Máquina de husillo (o tornillo recíproco):** En este tipo de máquinas se utiliza un tornillo o husillo tanto para fundir y manejar el material, como para inyectarlo en el molde. En la Figura 6 se presenta un esquema de una máquina inyectora de tornillo recíproco.

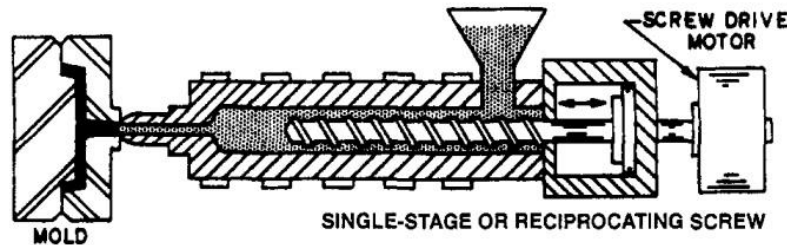


Figura 6: Máquina de tornillo recíproco. (Fuente [11])

## 2.8 Características básicas de una máquina inyectora de plástico

**Capacidad de Inyección:** Es la cantidad máxima de plástico que la máquina puede inyectar en un molde durante un ciclo de producción a una presión determinada. Se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$C_i = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L \quad (1)$$

Donde:

$C_i$  = Capacidad de inyección de la máquina en  $\text{cm}^3$ .

$D$  = Diámetro del husillo o pistón en cm.

$L$  = Carrera del husillo o pistón en cm.

**Capacidad de plastificación:** Es la cantidad máxima de plástico que una máquina de inyección de plástico puede fundir y mezclar adecuadamente durante un ciclo de producción.

**Presión de inyección:** Se refiere a la presión aplicada al material plástico fundido por la máquina de inyección para empujarlo dentro del molde durante el proceso de fabricación. Esta presión es necesaria para asegurar que el plástico se distribuya uniformemente por todas las cavidades del molde y para compensar cualquier resistencia o contrapresión dentro del sistema de moldeo. La presión de inyección se mide típicamente en unidades de presión, como bar o psi. Se puede calcular con la siguiente expresión:

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

Donde:

$P_i$  = Presión de inyección de la máquina.

F = Fuerza de inyección.

A = Área del husillo o pistón.

**Presión de inyección máxima:** Es a la máxima presión que puede aplicar el cilindro hidráulico o neumático seleccionado, según catálogo. Aunque esta también puede estar limitada por el elemento de la unidad de potencia que haga actuar al cilindro, como bombas hidráulicas, compresores de aire o una red de aire.

**Fuerza de inyección máxima:** Es la máxima fuerza que puede aplicar el cilindro de inyección en función de su presión máxima de trabajo y el área del cilindro. Se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$F_{\max} = P_{\max} \cdot A \quad (3)$$

Donde:

$F_{\max}$  = Fuerza de inyección máxima del cilindro hidráulico o neumático.

$P_{\max}$  = Presión de inyección máxima del cilindro hidráulico o neumático.

A = Área del husillo o pistón.

**Velocidad de Inyección:** Es el caudal de material que sale de la máquina durante el periodo de inyección; se expresa generalmente en  $\text{cm}^3/\text{s}$  y es una medida de la rapidez con que puede llenarse un molde dado [12].

**Temperatura de inyección:** Se refiere a la temperatura a la cual se encuentra el material plástico fundido justo antes de ser inyectado dentro del molde durante el proceso de fabricación por inyección de plástico. Esta temperatura es aumentada gradualmente hasta alcanzar la adecuada y no exceder la misma para evitar que el material se dañe.

**Temperatura del molde:** Es la temperatura a la cual se encuentran las paredes de las cavidades del molde. La temperatura del molde depende del material que se esté moldeando ya que, en algunos casos, un molde muy frío puede generar piezas amorfas.

**Capacidad de cierre:** La capacidad de cierre se refiere a la fuerza máxima que una máquina de moldeo por inyección puede ejercer para mantener para mantener las dos mitades del molde firmemente unidas durante el proceso de inyección de plástico. Se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$F_c = P_{\max} \cdot A_p \quad (4)$$

Donde:

$F_c$  = Fuerza de cierre del molde.

$P_{\max}$  = Presión de inyección máxima del cilindro hidráulico o neumático.

$A_p$  = Área proyectada de la pieza en el molde.

**Tiempo de inyección:** En la mayoría de las máquinas el tiempo de inyección se divide en dos: el tiempo de inyección inicial y el tiempo de mantenimiento. El tiempo de inyección inicial es el tiempo necesario para que el tornillo o pistón realice el recorrido hacia adelante, obligando a que el material se introduzca dentro del molde. Normalmente este tiempo no es superior a 2 segundos, y rara vez excede los 3 segundos. El tiempo de mantenimiento o compactación es el tiempo que, después de realizar la inyección inicial del material, el tornillo permanece en posición avanzada, para mantener la presión del material dentro del molde. Este tiempo se prolonga hasta que la entrada a la cavidad de moldeo solidifica [12].

**Tiempo de enfriamiento:** Es el período durante el cual se permite que la pieza moldeada permanezca dentro del molde después de que se ha completado el proceso de inyección de plástico. Durante este tiempo, el plástico fundido se solidifica y se enfría lo suficiente como para mantener su forma y permitir que se retire del molde sin deformaciones. Mientras mayor sea el espesor de la pieza que se está moldeando mayor será el tiempo de enfriamiento requerido.

## CAPÍTULO 3: Definición de parámetros de trabajo y estructura de la máquina inyectora de plástico

### 3.1 Definición de las características de la máquina a diseñar

Considerando las necesidades del Laboratorio de Manufactura Digital y los alcances del proyecto, se determinan las siguientes características que deberá tener la máquina inyectora de plástico a diseñar y fabricar:

- Elemento de inyección: Cilindro neumático.
- Presión de inyección máxima: 8 bar (Red de aire del taller).
- Material de trabajo: Termoplásticos, preferentemente PLA.
- Masa de inyección máxima: 100 g.
- Volumen de inyección máximo: 80,65 cm<sup>3</sup>.
- Espesor de pared mínimo: 4 mm.
- Recorrido de flujo máximo: 90 mm.
- Dimensiones máximas de la máquina: 300 mm x 300 mm x 730 mm

### 3.2 Determinación de parámetros de inyección

#### 3.2.1 Presión de inyección del PLA

Se calcula la presión de inyección necesaria conociendo la masa máxima a inyectar y el diámetro del cilindro neumático a utilizar. Así, considerando el diámetro más pequeño de cilindro neumático encontrado en el mercado de 32 mm, se tiene que:

$$D = 32 \text{ mm} = 1,26 \text{ pulg.}$$

$$F = 100 \text{ g} = 0,2205 \text{ lb.}$$

Por lo tanto:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,26^2}{4} = 1,25 \text{ pulg}^2$$

Luego reemplazando F y A en la ecuación (2), se puede determinar la presión necesaria para inyectar 100 g de PLA:

$$P_i = \frac{0,2205}{1,25} = 0,18 \text{ psi}$$

### 3.2.2 Presión de inyección máxima

Por otro lado, la presión máxima de trabajo de un cilindro neumático con un diámetro de 32 mm es de 10 bar, sin embargo, esta presión estará limitada por la presión de la red de aire del taller de 8 bar (8,16 kgf/cm<sup>2</sup>) lo que equivale a 116 psi. Por lo tanto, se utilizará esta presión en los cálculos que involucren a la presión de inyección máxima.

### 3.2.3 Fuerza de inyección máxima

Se calcula la fuerza de inyección máxima de la máquina sabiendo que la presión de inyección máxima del cilindro neumático es de 0,8 MPa y el área de su pistón es de 804,3 mm<sup>2</sup>, a partir de la ecuación (3):

$$F_{\max} = 0,8 \cdot 804,3 = 643,44 \text{ N}$$

Por lo tanto, se utilizará esta fuerza en los cálculos que involucren a la fuerza de inyección máxima.

### 3.2.4 Temperatura de trabajo del PLA

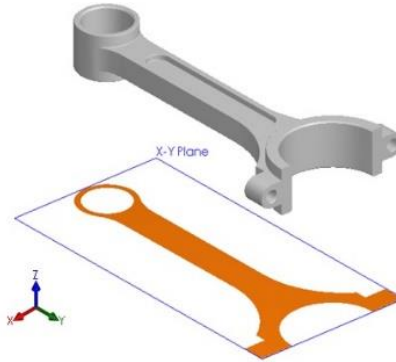
Según el software Granta EduPak, la temperatura de moldeo adecuada para el PLA oscila entre los 145 y 175 °C. Por lo tanto, se define que la temperatura interna del cilindro de plastificación debe ser de 175 °C, y con este valor de temperatura se realizarán los cálculos para determinar la potencia necesaria para llevar al cilindro de plastificación a dicho valor. En la Tabla 2 se muestran las propiedades térmicas del PLA según el software Granta EduPak.

**Tabla 2: Propiedades térmicas del PLA.**

|                                   |   |               |   |        |            |
|-----------------------------------|---|---------------|---|--------|------------|
| Punto de fusión                   | ① | 145           | - | 175    | °C         |
| Temperatura de vitrificación      | ① | 51,9          | - | 59,9   | °C         |
| Máxima temperatura en servicio    | ① | * 44,9        | - | 54,9   | °C         |
| Mínima temperatura en servicio    | ① | -20,2         | - | -12,2  | °C         |
| ¿Conductor térmico o aislante?    | ① | Buen aislante |   |        |            |
| Conductividad térmica             | ① | 0,13          | - | 0,16   | W/m.°C     |
| Calor específico                  | ① | 1,18e3        | - | 1,21e3 | J/kg.°C    |
| Coefficiente de expansión térmica | ① | * 126         | - | 145    | µstrain/°C |

### 3.2.5 Determinación del área proyectada en el molde

Considerando que la máquina tendrá una capacidad de inyectar piezas relativamente pequeñas, se espera que la fuerza de cierre del molde no sea muy grande; por lo anterior se establece una área máxima proyectada de 35 cm<sup>2</sup>. En la Figura 7 se muestra un esquema de cómo se proyecta el área de una pieza en un molde.



**Figura 7: Esquema del área proyectada de una pieza en el molde.**

### 3.2.6 Determinación de la fuerza de cierre máxima

Una vez determinada la presión de inyección máxima y establecida el área proyectada, se puede calcular la fuerza de cierre máxima a partir de la ecuación (4):

$$F_c = 8,16 \cdot 35 = 285,6 \text{ kg}$$

Así, adicionando un 10% por recomendación de D. Rosato [11], se tiene una fuerza de cierre máxima de 3,08 kN.

### 3.2.7 Determinación del área total del molde

Para definir el área máxima del molde, se tomó como referencia el molde que se utiliza actualmente el en Laboratorio de Manufactura Digital el cual se muestra en la Figura 2. Dicho molde tiene 100 mm de largo y 50 mm de ancho. Además, considerando que el ancho de la mordaza es de 100 mm, se determina que las placas del molde tendrán como máximo 100 mm por lado. Lo que da un área máxima del molde de 10000 mm<sup>2</sup> (100 cm<sup>2</sup>).

### 3.3 Selección de componentes de la estructura de la máquina inyectora de plástico

A continuación, se procede a seleccionar los componentes de la estructura de la máquina inyectora de plástico en función de las características y parámetros de trabajo previamente definidos.

#### 3.3.1 Selección del sistema de inyección

La máquina inyectora a diseñar tendrá como elemento de inyección un cilindro neumático, ya que, el tornillo sin fin implica alta tecnología para la fabricación del mismo. Por otro lado, el sistema de control de presión de un cilindro neumático es más barato, sencillo y contamina menos que el de un cilindro hidráulico.

Luego, teniendo en cuenta la presión de inyección máxima previamente calculada de 8 bar, se seleccionó un cilindro neumático de doble efecto del catálogo de AirComp, el cual tiene una presión mínima de trabajo de 0,5 bar y una presión máxima de trabajo de 10 bar. Además, tiene un largo de carrera de 200 mm, un diámetro de pistón de 32 mm, y un vástago con rosca M10 x 1,25. Se seleccionó un cilindro de doble efecto ya que este tipo de cilindros aplica fuerzas tanto en la dirección de la extensión como en la de la retracción del pistón, lo que permitirá destrabar el émbolo en caso de que este se atasque en el cilindro de plastificación. En la Figura 8 se muestra el cilindro neumático de doble efecto seleccionado y comprado a AirComp.



**Figura 8: Cilindro neumático de doble efecto seleccionado.**

#### 3.3.2 Selección del tipo de unidad de cierre

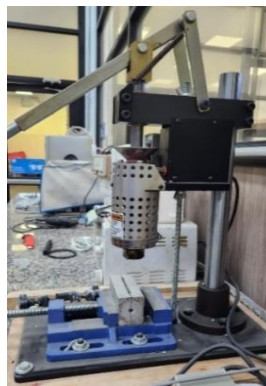
Como las piezas a moldear serán pequeñas y la presión de inyección será relativamente baja, no será necesaria una fuerza de cierre tan grande para mantener el molde cerrado. Por lo tanto, la unidad de cierre corresponderá a un sistema de sujeción mediante una prensa plana de banco como la que se muestra en la Figura 9.



**Figura 9: Prensa plana de banco.**

### 3.3.3 Determinación de tipo de configuración de trabajo de la máquina

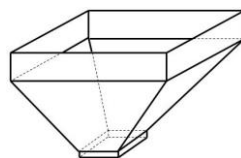
Como la unidad de cierre del sistema será una prensa plana de banco, la disposición de trabajo de la máquina a diseñar será la de trabajo vertical. Ya que, la prensa sujetará el molde de forma perpendicular a esta, por lo que la inyección del material plastificado deberá llegar de forma vertical y desde arriba al molde. En la Figura 10 se muestra una máquina inyectora manual con configuración de trabajo vertical y que además tiene como unidad de cierre una prensa plana de banco.



**Figura 10: Configuración de trabajo vertical.**

### 3.3.4 Selección del sistema de alimentación

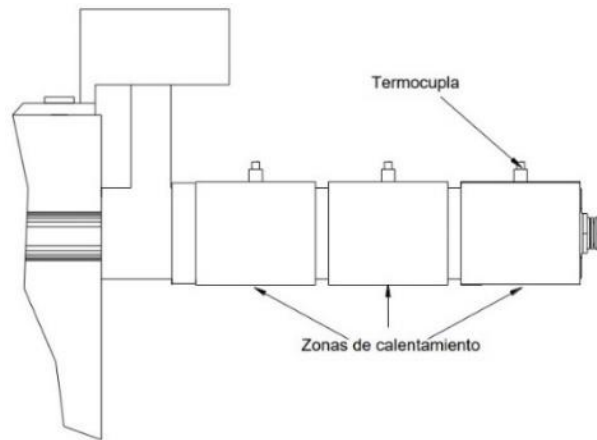
Para alimentar el cilindro de plastificación, es necesario un elemento que actúe como embudo. Así, el sistema de alimentación será una tolva prismática como la que se muestra en la Figura 11, ya que es fácil de construir, sirve para descargas rápidas y evitará el contacto del usuario con el cilindro de plastificación en caliente.



**Figura 11: Tolva prismática.**

### 3.3.5 Selección del sistema de fundición

Para poder llegar a la temperatura de trabajo previamente determinada de 175 °C, se utilizarán resistencias eléctricas de tipo banda que recubrirán el cilindro de plastificación. Ya que, son simples de instalar, silenciosas y seguras de operar. Además, permiten un buen rango de temperaturas, las cuales pueden ser controladas mediante el uso de un controlador de temperatura digital y una termocupla. En la Figura 12 se muestra un esquema de las resistencias tipo banda alrededor de un cilindro de plastificación.



**Figura 12: Resistencias eléctricas tipo banda.**

### 3.3.6 Selección de la unidad de potencia

Como el elemento de inyección es un cilindro neumático, la unidad de potencia del sistema debe suministrar aire a alta presión a la unidad de inyección. Así, la unidad de potencia del sistema corresponderá a la red de aire del taller de la universidad, el cuál trabaja a una presión de 8 bar y será conectada al cilindro mediante mangueras neumáticas. Además, el uso de esta red de aire permitirá ahorrar dinero ya que no será necesario un compresor de aire para hacer actuar al cilindro neumático.

## CAPÍTULO 4: Dimensionamiento de piezas y selección de materiales

### 4.1 Diseño conceptual de la máquina inyectora de PLA

La máquina tendrá una placa base donde se soldarán 6 columnas de soporte. Además, tendrá una placa superior donde se ajustará el cilindro neumático mediante pernos y la placa se ajustará a las columnas mediante tuercas. Por otro lado, en sus 2 columnas centrales irán 2 resortes que permitirán que tanto el cilindro de plastificación, como su respectiva placa de fijación bajen y suban conforme actúe el cilindro neumático. El cilindro de plastificación tendrá 2 calefactores de boquilla para plastificar el PLA. Y finalmente, en la placa base se ajustará una prensa plana que permitirá mantener cerrado el molde durante el proceso de inyección.

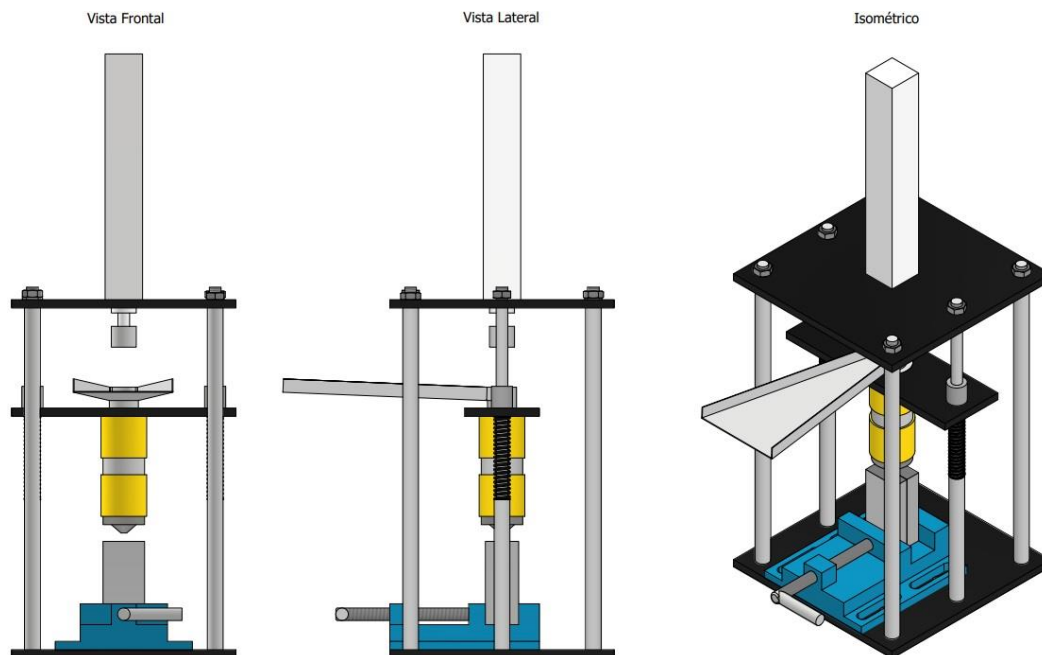
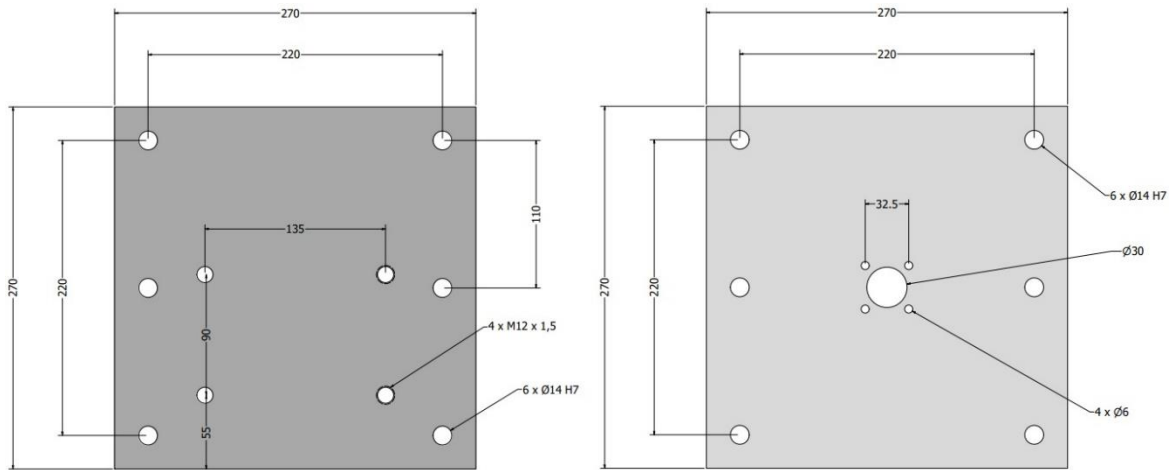


Figura 13: Diseño conceptual de la máquina inyectora de PLA.

### 4.2 Diseño de las placas de fijación de la estructura

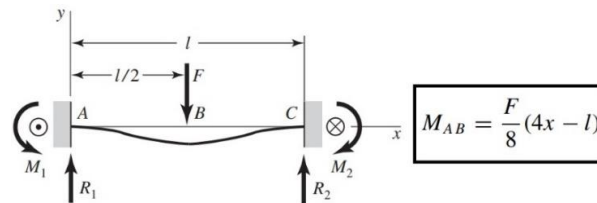
La máquina tendrá una placa base de acero A36 de 270 mm por lado donde se soldarán todas las columnas de soporte y se fijará la prensa plana. Además, teniendo en cuenta las dimensiones del cilindro neumático seleccionado, se diseña otra placa de acero A36 para fijarlo de forma vertical con 4 pernos M6 de 20 mm, en el ANEXO B se detalla la selección de los pernos. En la Figura 14 se muestra el diseño de las placas.



**Figura 14: Diseño de la placa base y la placa para fijación del cilindro neumático.**

Luego, se calcula el espesor de las placas conociendo el área de estas, el material del que están hechas, y la fuerza que aplica el cilindro sobre estas cuando actúa a máxima presión.

Así, como las placas fijas estarán sometidas a la fuerza de inyección máxima previamente calculada de 643,44 N, se considera a las placas como vigas con apoyos fijos y carga central, como se muestra en la Figura 15.



**Figura 15: Viga con apoyos fijos y carga central. (Fuente [13])**

Reemplazando  $l/2$  en  $x$ , se tiene que:

$$M = \frac{F \cdot l}{8} \quad (5)$$

Luego, reemplazando datos en (5), se tiene que:

$$M = \frac{643,44 \cdot 0,27}{8} = 21,72 \text{ Nm}$$

Las placas son de acero A36 cuyo esfuerzo permisible es de 250 MPa. Además, el esfuerzo permisible también se puede calcular a partir de la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{M}{S} \quad (6)$$

Donde:

M = Momento máximo.

S = Módulo de sección para secciones rectangulares.

$$S = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (7)$$

Así, igualando y reemplazando datos, se puede despejar el espesor mínimo de las placas :

$$250 = \frac{21,72}{\frac{0,27 * h^2}{6}}$$

$$h = 1,4 \text{ mm}$$

Luego, aplicando un factor de seguridad de 2, se tiene que el espesor de las placas debe ser mayor a 3 mm. Finalmente, considerando los cálculos realizados y la disponibilidad de materiales en el mercado, las placas de fijación tendrán un espesor de 10 mm.

### 4.3 Diseño del émbolo de inyección

El émbolo de inyección al igual que el cilindro de plastificación, se encuentra sometido a la presión de inyección máxima de 0,8 MPa. Por lo que se realiza análisis de vida infinita utilizando la fórmula de Goodman Modificada que se muestra a continuación:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n_s} \quad (8)$$

A partir de la ecuación (8) se despejará el factor de seguridad del material que se utilizará para fabricar el émbolo en función de los esfuerzos a los que esté sometido. Además, como el tipo de esfuerzos corresponde a esfuerzos repetidos, como se observa en la Figura 16. Se tiene que tanto el esfuerzo alterno como el medio son iguales y corresponden a la mitad del esfuerzo máximo.

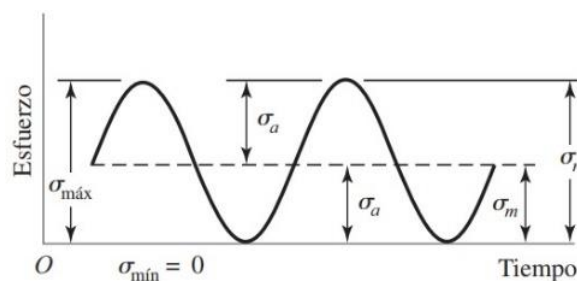


Figura 16: Relación esfuerzo-tiempo para esfuerzo repetido. (Fuente [13])

$$\sigma_a = \sigma_m = \frac{0,8}{2} = 0,4 \text{ MPa}$$

Por otro lado,  $S_e$  corresponde al límite de resistencia a la fatiga del material, el cual se determina a partir de la ecuación de Marin que se presenta a continuación:

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e \quad (9)$$

Donde:

$k_a$  = Factor de modificación por la condición superficial.

$k_b$  = Factor de modificación por el tamaño.

$k_c$  = Factor de modificación por la carga.

$k_d$  = Factor de modificación por la temperatura.

$k_e$  = Factor de confiabilidad.

$k_f$  = Factor de modificación por efectos varios.

$S'_e$  = Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria.

$S_e$  = Límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso.

Luego, considerando un émbolo de acero AISI 1045 laminado en caliente, se tiene que:

**Tabla 3: Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga del émbolo de inyección.**

| $S_{ut}$ | $k_a$ | $k_b$ | $k_c$ | $k_d$ | $k_e$ | $k_f$ | $S'_e$ |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 630      | 0,56  | 0,86  | 0,85  | 1     | 0,702 | 1     | 315    |

Así, reemplazando datos en la ecuación (9) se tiene que:

$$S_e = 0,56 \cdot 0,86 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 0,702 \cdot 1 \cdot 315 = 90,52 \text{ MPa}$$

Finalmente, reemplazando datos en la ecuación (8) se tiene que:

$$\frac{0,4}{90,52} + \frac{0,4}{630} = \frac{1}{n_s}$$

De donde se despeja un factor de seguridad  $n_s$  igual a 198 con lo cual se asegura que el material seleccionado resistirá la presión interna máxima de inyección. Por lo tanto, el

émbolo será de acero AISI 1045, tendrá un largo de 25 mm, un diámetro externo de 30 mm, y una rosca interna de M10 x 1,25 con una profundidad de 15 mm, para poder tener una unión roscada con el vástago del cilindro neumático.

#### 4.3.1 Cálculo de la tolerancia del émbolo basado en la dilatación térmica

El cálculo de la tolerancia está basado en la dilatación térmica del material del émbolo, considerando la dilatación del diámetro exterior del émbolo cuando alcance la temperatura de trabajo hasta alcanzar el diámetro interno del cilindro de plastificación de 30 mm. Así, se calcula la dilatación lineal del émbolo a partir de la siguiente fórmula:

$$L_T = L \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (10)$$

Donde:

$L_T$  = Longitud total a la temperatura de trabajo.

$L$  = Diámetro externo del émbolo = 30 mm.

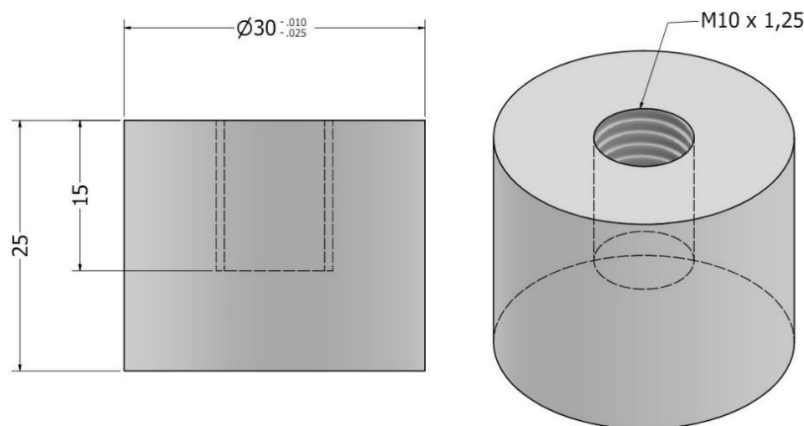
$\Delta T$  = Diferencia de temperatura = (175-15) °C.

$\alpha$  = Coeficiente de dilatación térmica del acero =  $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Reemplazando datos, se tiene que:

$$L_T = 30 \cdot (1 + 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 160) = 30,05 \text{ mm}$$

Por lo tanto, se determina que debe haber un juego de 5 centésimas entre el diámetro externo del émbolo y el diámetro interno del cilindro de plastificación. En la Figura 17 se observa el diseño del émbolo con sus respectivas dimensiones y tolerancias.



**Figura 17: Diseño del émbolo de inyección.**

#### 4.4 Diseño del cilindro de plastificación

El cilindro estará sometido a una presión interna máxima de 0,8 MPa. Por lo tanto, se diseña un cilindro de pared gruesa con un diámetro externo de 50 mm y un espesor de 10 mm.

Además, el esfuerzo tangencial en el cilindro hueco de pared gruesa sometido a presión interna está dado por la siguiente ecuación:

$$\sigma_t = \left( \frac{r_i^2 \cdot P_i}{r_o^2 - r_i^2} \right) \cdot \left( 1 + \frac{r_o^2}{r_i^2} \right) \quad (11)$$

Donde:

$\sigma_t$  = Esfuerzo tangencial MPa.

$r_i$  = Radio interno = 15 mm.

$r_o$  = Radio externo = 25 mm.

$P_i$  = Presión interna = 0,8 MPa.

Así, reemplazando datos se tiene que:

$$\sigma_t = \left( \frac{15^2 \cdot 0,8}{25^2 - 15^2} \right) \cdot \left( 1 + \frac{25^2}{15^2} \right) = 1,7 \text{ MPa}$$

Como los esfuerzos corresponde a esfuerzos repetidos, se tiene que tanto el esfuerzo alterno como el medio son iguales y corresponden a la mitad del esfuerzo máximo, tal que:

$$\sigma_a = \sigma_m = \frac{\sigma_t}{2} = 0,85 \text{ MPa}$$

Luego, considerando un cilindro de acero AISI 1045 laminado en caliente, se tiene que:

**Tabla 4: Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga del cilindro de plastificación.**

| $S_{ut}$ | $k_a$ | $k_b$ | $k_c$ | $k_d$ | $k_e$ | $k_f$ | $S'_e$ |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 630      | 0,56  | 0,82  | 0,85  | 1     | 0,702 | 1     | 315    |

Así, reemplazando datos en la ecuación (9) se tiene que:

$$S_e = 0,56 \cdot 0,82 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 0,702 \cdot 1 \cdot 315 = 86,3 \text{ MPa}$$

Finalmente, reemplazando datos en la ecuación (8) se tiene que:

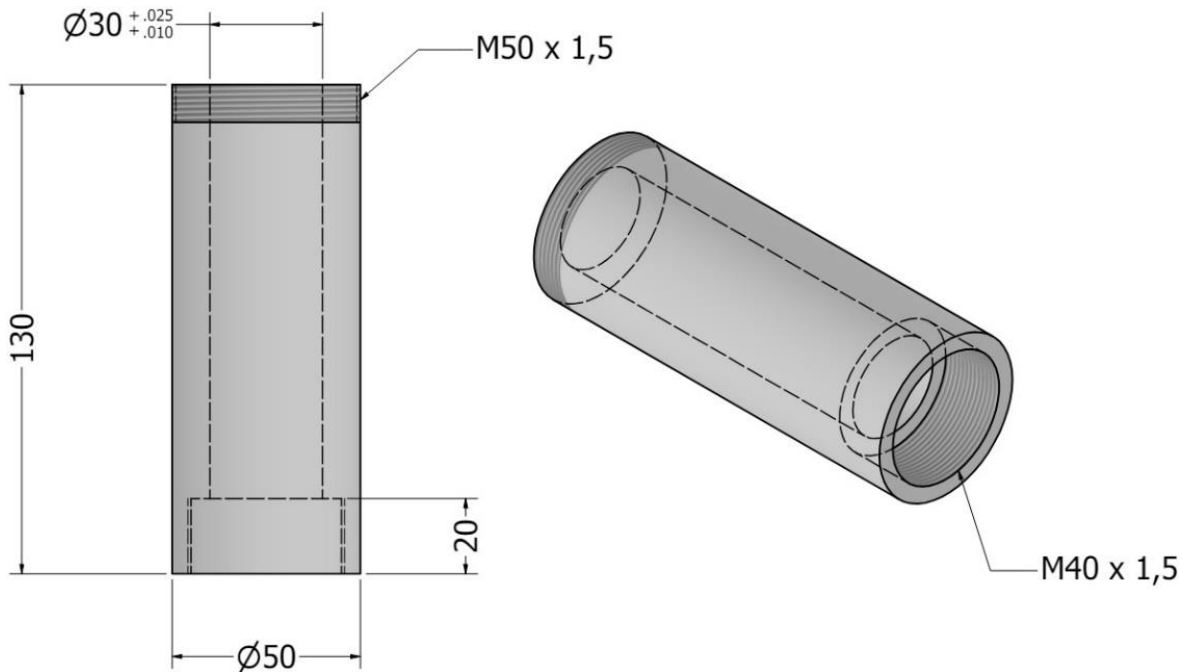
$$\frac{0,85}{86,3} + \frac{0,85}{630} = \frac{1}{n_s}$$

De donde se despeja un factor de seguridad  $n_s$  igual a 83 con lo cual se asegura que el cilindro resistirá la presión interna máxima de trabajo de 8 bar. Así, considerando la disponibilidad de materiales en el mercado, se decide diseñar el cilindro de plastificación con acero AISI 1045.

Por otro lado, se determina el largo mínimo que debe tener el cilindro considerando la masa de inyección de 100 g y la densidad del PLA que es de  $1,24 \text{ g/cm}^3$ , por lo tanto, el volumen de inyección es de  $80,65 \text{ cm}^3$ . Así, igualando este volumen con el cilindro interno de plastificación, se tiene que:

$$80,65 = \pi \cdot 1,5^2 \cdot h$$

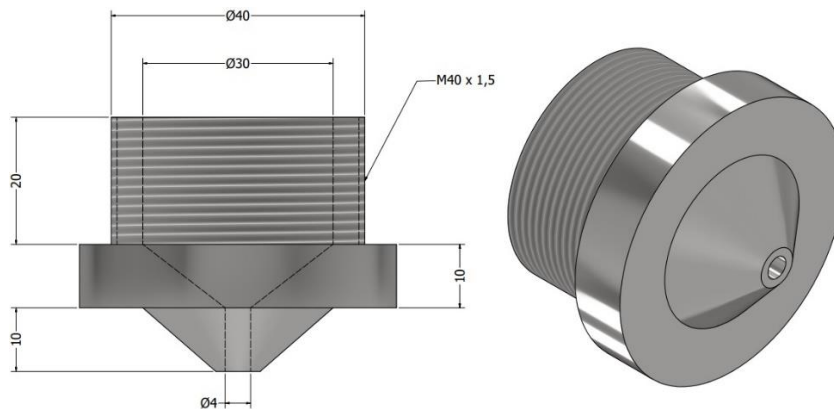
De donde se despeja que el largo mínimo del cilindro de plastificación es de  $h=114,1 \text{ mm}$ . Por lo tanto, se decide hacer un cilindro de 130 mm de largo. El cuál tendrá una rosca interna de M40x1,5 de 20 mm de profundidad, para unir la boquilla. También tendrá una rosca externa M50 x 1,5 para ajustarlo a su respectiva placa de fijación. En la Figura 18 se observa el diseño del cilindro de plastificación con sus respectivas dimensiones y tolerancias.



**Figura 18: Diseño del cilindro de plastificación.**

#### 4.5 Diseño de la boquilla de inyección

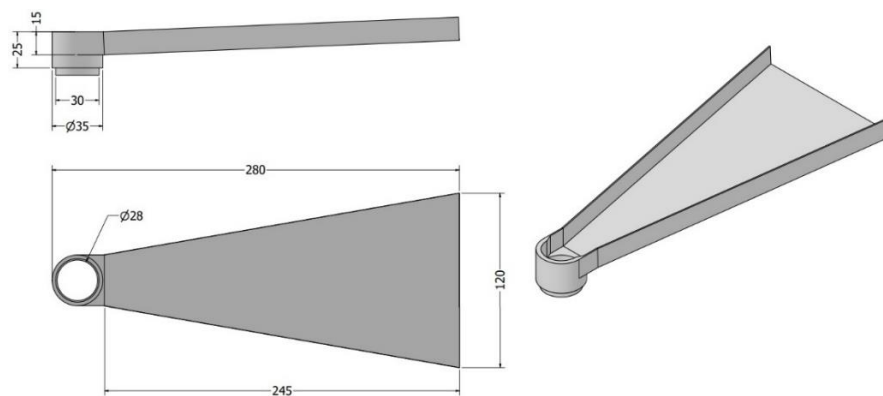
Para inyectar 100 g se recomienda un orificio de 6,5 mm de diámetro. Luego, se le aplica un factor de corrección por viscosidad de 1,6 ya que, en términos de comportamiento de flujo el PLA generalmente se asemeja más al polietileno [15]. Teniendo en cuenta lo anterior, se diseña una boquilla cónica de acero AISI 1045, con un orificio de 4 mm de diámetro. Además, tendrá una cavidad interna de 30 mm de diámetro y una rosca externa de M40 x 1,5 para poder realizar la unión entre la boquilla y el cilindro de plastificación. En la Figura 19 se muestra el diseño de la boquilla.



**Figura 19: Diseño de la boquilla de inyección.**

#### 4.6 Diseño de la tolva de alimentación

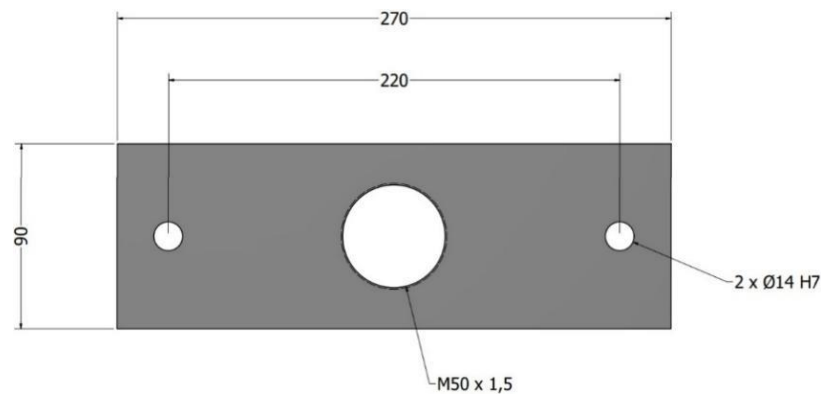
Se diseña una tolva prismática removible con un diámetro interno de 28 mm, una altura de 30 mm de los cuales 5 mm corresponden a una reducción de diámetro de 35 a 30 mm para ajustarla al cilindro de plastificación, como se observa en la Figura 20. La parte prismática medirá 245 mm y actuará como rampa para agregar el material a plastificar.



**Figura 20: Diseño de la tolva de alimentación.**

#### 4.7 Diseño de la placa de fijación del cilindro de plastificación

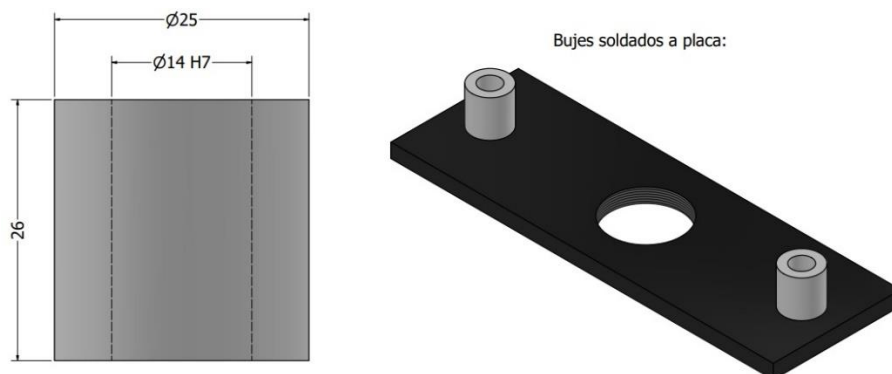
Se diseña una placa de fijación con un espesor de 10 mm, debido a que se comprobó previamente que este espesor resiste las cargas del sistema. La placa tendrá un agujero central con una rosca M50 x 1,5 para ajustar el cilindro de plastificación. Además, como se observa en la Figura 21, tendrá dos agujeros de 14 mm para ajustarla a las columnas pasantes que servirán de guías cuando el cilindro neumático actúe. La placa y las columnas tendrán un ajuste deslizante H7/g6, el cálculo de las tolerancias entre los agujeros y las columnas se detalla en el ANEXO C.



**Figura 21: Diseño de la placa de fijación del cilindro de plastificación.**

#### 4.8 Diseño de bujes guías

Se diseñan dos bujes de acero los cuales irán soldados a la placa de fijación del cilindro de plastificación, con el fin de obtener un desplazamiento vertical uniforme durante el proceso de inyección. Estos bujes actuarán como guías, aumentando el contacto entre la placa de fijación del cilindro de plastificación y las dos columnas centrales que llevarán resortes, permitiendo a su vez que estos se compriman y descompriman de manera uniforme.



**Figura 22: Diseño de los bujes guías**

#### 4.9 Diseño de las columnas de soporte

Se diseñan cuatro columnas equidistantes y con el mismo diámetro. Para ello, se determina la carga soportada por cada columna mediante un análisis estático. Al ser todas las columnas iguales, se realiza el cálculo para una sola columna y luego se extrapolan los resultados. Para hallar dicha carga se realizó el diagrama de cuerpo libre de las columnas principales considerando sólo el peso de los elementos sobre estas. Y también se realizó el diagrama de cuerpo libre de las columnas cuando actúa el cilindro neumático. Estos diagrama se muestran en la Figura 23.

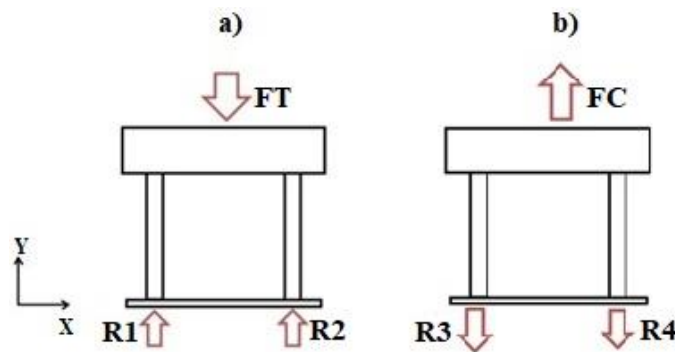


Figura 23: a) DCL considerando la suma de pesos sobre las columnas, b) DCL cuando actúa el cilindro neumático.

De acuerdo a la Figura 23 y el DCL considerando la suma de pesos sobre las columnas, se determina el Pestático 1 el cual equivale la fuerza aplicada en cada columna tal que:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 + R_2 - F_T = 0$$

Sabiendo que  $R_1$  y  $R_2$  son iguales y equidistantes, y  $F_T$  es la sumatoria del peso del cilindro neumático es de 1,151 kg y el peso de la placa de fijación es de 5,723 kg, se tiene que:

$$F_T = (1,151 + 5,723) \cdot 9,81 = 67,4 \text{ N}$$

Despejando:

$$R_1 = \frac{F_T}{2} = \frac{67,4}{2} = 33,7 \text{ N}$$

Por lo tanto:

$$P_{\text{estático1}} = \frac{R_1}{2} = \frac{33,7}{2} = 16,85 \text{ N}$$

Seguidamente, a partir del DCL aplicable a las columnas cuando el cilindro neumático está ejerciendo la fuerza de inyección máxima, se determina el Pestático 2 tal que:

$$\sum F_y = 0$$

$$-R_3 - R_4 + F_C = 0$$

Despejando:

$$R_3 = \frac{F_{\max}}{2} = \frac{0,6434}{2} = 0,322 \text{ kN}$$

Luego, considerando un factor de seguridad de 1,5 se tiene que:

$$P_{\text{estático}2} = \frac{R_3}{2} \cdot 1,5 = \frac{0,322}{2} \cdot 1,5 = 0,242 \text{ kN}$$

A continuación, se realiza un análisis de pandeo de columnas, a partir de la teoría de pandeo descrita por Mott [14]. Para ello se determina la longitud efectiva, a partir de la longitud de la columna de 410 mm y un factor de fijación  $K=0,65$  (Recomendación Mott [14] para columna empotrada-empotrada):

$$L_e = L \cdot K \quad (12)$$

Reemplazando datos en (12) se obtiene la longitud efectiva:

$$L_e = 410 \cdot 0,65 = 266,5 \text{ mm} = 0,27 \text{ m}$$

Seguidamente, se determina el radio mínimo de giro, el cuál corresponde a un cuarto del diámetro de la columna. Este diámetro es la incógnita a despejar, ya que es el diámetro mínimo para evitar el pandeo de las columnas:

$$R_{\min} = \frac{D_{\min}}{4} \quad (13)$$

Luego, se determina la relación de esbeltez de la columna, a partir de la longitud efectiva y el radio mínimo de giro:

$$SR = \frac{L_e}{R_{\min}} \quad (14)$$

Reemplazando datos en (14) se obtiene la relación de esbeltez:

$$SR = \frac{4 \cdot 0,27}{D_{\min}} = \frac{1,08}{D_{\min}}$$

A continuación, se determina la constante de columnas, a partir del esfuerzo de fluencia y el módulo elástico del material de las columnas, en este caso A36:

$$C_C = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E}{S_y}} \quad (15)$$

Reemplazando datos en (15) se obtiene la constante de columnas:

$$C_C = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 200000}{250}} = 125,66$$

Luego, una forma de calcular la carga crítica que soporta una columna es a partir de la ecuación de J. B. Johnson, la cual se presenta a continuación:

$$P_{\text{crítico}} = A \cdot S_y \cdot \left[ 1 - \frac{S_y \cdot SR^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot E} \right] \quad (16)$$

Sin embargo, para poder utilizar dicha ecuación, se debe cumplir la siguiente relación:

$$SR < C_C$$

A partir de las ecuaciones (14) y (15) y reemplazando los datos conocidos se despeja que para cumplir la relación previamente mencionada y poder utilizar la ecuación (16), se debe tener un diámetro mínimo de columna, como se presenta a continuación:

$$D_{\text{min}} > 8,6 \text{ mm}$$

Así, considerando un diámetro de 9 mm y reemplazando datos en la ecuación (16) se tiene que:

$$P_{\text{crítico}} = 63,62 \cdot 250 \cdot \left[ 1 - \frac{250 \cdot 120^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot 200000} \right] = 8,65 \text{ kN}$$

Como  $P_{\text{crítico}}$  es mayor que  $P_{\text{estático2}}$  se concluye que columnas de largos menores o iguales a 410 mm, no pandearán si sus diámetros son mayores a 8,6 mm.

Luego, se despeja el área mínima de la columna para evitar fallas por compresión a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{S_y}{n_s} = \frac{P}{A} \quad (17)$$

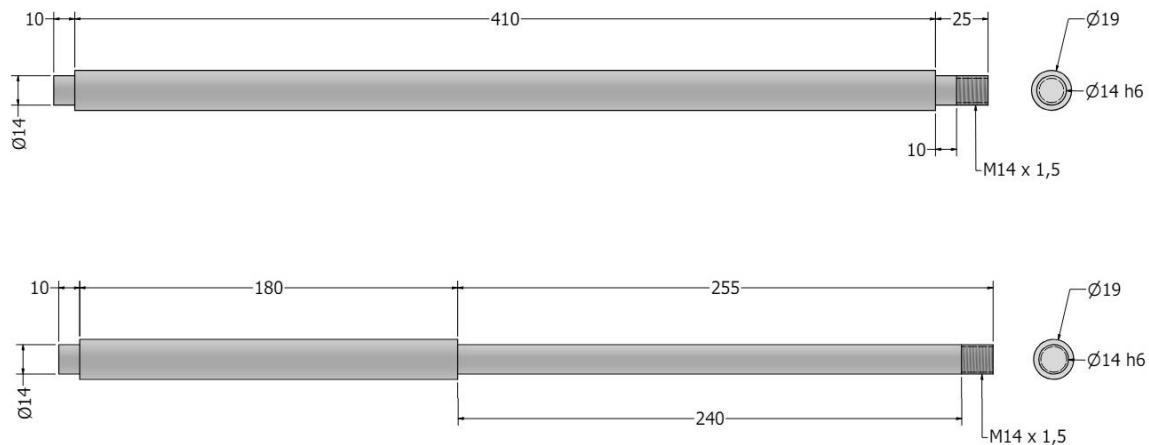
Para ello se analizan las dos columnas de soporte del cilindro de plastificación. Donde P es la mitad de la fuerza máxima que ejerce el cilindro neumático, ya que se reparte en las dos columnas. Además, asumiendo un factor de seguridad  $n_s$  igual a 2, se despeja que:

$$A = \frac{P \cdot n_s}{S_y} = \frac{321,72 \cdot 2}{250} = 2,57 \text{ mm}^2$$

Luego, suponiendo un diámetro de 9 mm se obtiene un área de columna igual a  $63,62 \text{ mm}^2$ , por lo tanto, se concluye que las columnas no fallarán por compresión considerando un diámetro de columna mayor o igual a 9 mm.

Finalmente, considerando todos los cálculos previamente realizados, se decide diseñar todas las columnas con acero A36 con un diámetro de 19 mm. Todas las columnas tendrán una reducción de diámetro en su parte inferior de 14 mm para ajustarlas y soldarlas a la placa base mediante arco manual utilizando un electrodo E6011, la selección del tipo de soldadura se detalla en el ANEXO D. Además, todas las columnas tendrán una rosca M14x2 en su parte superior, para ajustar la placa de fijación del cilindro neumático con tuercas hexagonales M14 x 1,5 de 10 mm de espesor, la selección de las tuercas se detalla en el ANEXO E.

Por último, las dos columnas que soportarán el cilindro de plastificación tendrán reducciones de diámetro de 14 mm de 240 mm de largo para ajustar dos resortes de compresión de 122 mm de largo.



**Figura 24: Diseño de las columnas de soporte.**

#### 4.10 Diseño de los resortes

Se diseñan dos resortes de compresión con diámetro interno de 14 mm, ya que estos se ajustarán alrededor de las dos columnas que soportarán a la placa y cilindro de plastificación.

Luego, siguiendo la estrategia de diseño de resortes helicoidales de compresión para servicio estático especificada en el capítulo 10 de Shigley [13], se tiene que para resortes sobre una varilla:

$$D = d_{\text{varilla}} + d + \text{holgura} \quad (18)$$

Donde:

$D$  = Diámetro medio del resorte.

$d_{\text{varilla}}$  = Diámetro de la columna.

$d$  = Diámetro del alambre del resorte.

Así, considerando un alambre de piano ASTM A228-51 ( $G = 11,75$  Mpsi) de diámetro 3,5 mm, un diámetro de columna de 14 mm y la mismo holgura de los agujeros de 0,018 mm, se tiene que:

$$D = 14 + 3,5 + 0,018 = 17,518 \text{ mm} = 0,69 \text{ pulg}$$

Conociendo el diámetro medio del resorte y el diámetro del alambre, se puede calcular el diámetro interior y exterior del resorte, además del índice del resorte:

$$OD = D + d = 17,518 + 3,5 = 21,018 \text{ mm}$$

$$ID = D - d = 17,518 - 3,5 = 14,018 \text{ mm}$$

Además, el índice del resorte se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$C = \frac{D}{d} \quad (19)$$

Reemplazando datos se tiene el siguiente índice del resorte:

$$C = \frac{0,69}{0,138} = 5$$

Con el índice del resorte, se puede calcular el factor de curvatura a partir de la siguiente expresión:

$$K_B = \frac{(4 \cdot C + 2)}{(4 \cdot C - 3)} \quad (20)$$

Así, reemplazando datos se tiene el siguiente factor de curvatura:

$$K_B = \frac{(4 \cdot 5 + 2)}{(4 \cdot 5 - 3)} = 1,29$$

Luego se puede calcular el esfuerzo cortante que se produce en el resorte a partir de la siguiente ecuación:

$$\tau_s = \frac{K_B \cdot 8 \cdot (1 + \epsilon) \cdot F_{\text{máx}} \cdot D}{\pi \cdot d^3} \quad (21)$$

Donde  $\epsilon$  es un factor de seguridad que limita el punto de operación del resorte al 75 %. Por recomendación debe tener un valor mayor o igual a 0,15. Por otro lado,  $F_{\text{máx}}$  es la carga

máxima sobre cada resorte, en este caso corresponde a la mitad de la suma de la fuerza ejercida por el cilindro neumático de 65,6 kg y el peso del cilindro de plastificación junto a su respectiva placa de fijación, de 5 kg aproximadamente. Por lo tanto, el peso total sobre ambos resortes es de 70,6 kg lo que equivale a 155,6 lb. Así,  $F_{\text{máx}}$  corresponde a 77,8 lb en cada resorte. Luego, reemplazando datos se tiene que:

$$\tau_s = \frac{1,29 \cdot 8 \cdot (1 + 0,15) \cdot 77,8 \cdot 0,69}{\pi \cdot 0,138^3} = 77165 \text{ psi}$$

Por otro lado, el esfuerzo permisible en un resorte de acero de piano se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$S_{sy} = 0,45 \cdot \frac{A}{d^m} \quad (22)$$

Donde A y m son constantes para estimar la resistencia de tensión mínima de alambres de acuerdo al material de estos, como se observa en la Tabla 5.

**Tabla 5: Constantes A y m para estimar la resistencia de tensión mínima de alambres para fabricar resortes comunes. (Fuente [13])**

| Material                      | ASTM núm. | Exponente m | Diámetro, pulg | A, kpsi · pulg <sup>m</sup> | Diámetro, mm | A, Mpa · mm <sup>m</sup> | Costo relativo del alambre |
|-------------------------------|-----------|-------------|----------------|-----------------------------|--------------|--------------------------|----------------------------|
| Alambre de piano*             | A228      | 0.145       | 0.004-0.256    | 201                         | 0.10-6.5     | 2 211                    | 2.6                        |
| Alambre T y R en aceite†      | A229      | 0.187       | 0.020-0.500    | 147                         | 0.5-12.7     | 1 855                    | 1.3                        |
| Alambre estirado duro‡        | A227      | 0.190       | 0.028-0.500    | 140                         | 0.7-12.7     | 1 783                    | 1.0                        |
| Alambre al cromo-vanadio§     | A232      | 0.168       | 0.032-0.437    | 169                         | 0.8-11.1     | 2 005                    | 3.1                        |
| Alambre al cromo-silicio      | A401      | 0.108       | 0.063-0.375    | 202                         | 1.6-9.5      | 1 974                    | 4.0                        |
| Alambre inoxidable 302#       | A313      | 0.146       | 0.013-0.10     | 169                         | 0.3-2.5      | 1 867                    | 7.6-11                     |
|                               |           | 0.263       | 0.10-0.20      | 128                         | 2.5-5        | 2 065                    |                            |
|                               |           | 0.478       | 0.20-0.40      | 90                          | 5-10         | 2 911                    |                            |
| Alambre de bronce fosforado** | B159      | 0           | 0.004-0.022    | 145                         | 0.1-0.6      | 1 000                    | 8.0                        |
|                               |           | 0.028       | 0.022-0.075    | 121                         | 0.6-2        | 913                      |                            |
|                               |           | 0.064       | 0.075-0.30     | 110                         | 2-7.5        | 932                      |                            |

Así, reemplazando datos se tiene que:

$$S_{sy} = 0,45 \cdot \frac{201000}{0,138^{0,145}} = 120539 \text{ psi}$$

Luego, conociendo el esfuerzo cortante y el esfuerzo permisible, se puede calcular el factor de seguridad:

$$n_s = \frac{S_{sy}}{\tau_s} = \frac{120539}{77165} = 1,56$$

Por otro lado, se calcula el número de espiras activas a partir de la siguiente expresión:

$$N_a = \frac{G \cdot d^4 \cdot y_{\text{máx}}}{8 \cdot D^3 \cdot F_{\text{máx}}} \quad (23)$$

Donde  $y_{\text{máx}}$  es el máximo desplazamiento de compresión, el cual se definió de 20 mm, lo que equivale a 0,7874 pulg. Así, reemplazando datos se tiene que:

$$N_a = \frac{11,75 \cdot 10^6 \cdot 0,138^4 \cdot 0,7874}{8 \cdot 0,69^3 \cdot 77,8} = 16,4$$

Además, los resortes a utilizar deben tener sus extremos esmerilados y a escuadra, por lo tanto, el número total de espiras está dado por la siguiente expresión:

$$N_t = N_a + 2 \quad (24)$$

Reemplazando datos se tiene el siguiente número de espiras totales del resorte:

$$N_t = 16,4 + 2 = 18,4$$

Conociendo el número total de espiras, se puede calcular la longitud sólida del resorte:

$$L_s = d \cdot N_t \quad (25)$$

Reemplazando datos se tiene que:

$$L_s = 0,138 \cdot 18,4 = 2,54 \text{ pulg} = 64,5 \text{ mm}$$

Además, se puede calcular la longitud libre a partir de la siguiente expresión:

$$L_o = L_s + (1 + \epsilon) \cdot 2 \quad (26)$$

Así, reemplazando datos se tiene que:

$$L_o = 2,54 + 1,15 \cdot 2 = 4,8 \text{ pulg} = 122 \text{ mm}$$

Finalmente, se puede calcular la constante de rigidez del resorte a partir de la siguiente expresión:

$$k = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot N_a} \quad (27)$$

Por lo tanto, reemplazando los datos del resorte diseñado se obtiene la siguiente constante de rigidez:

$$k = \frac{11,75 \cdot 10^6 \cdot 0,138^4}{8 \cdot 0,69^3 \cdot 16,4} = 98,87 \frac{\text{lbf}}{\text{pulg}}$$

Por lo tanto, se seleccionan 2 resortes de acero de piano ASTM A228-51 de 122 mm de largo, con un diámetro interior de 14,018 mm, un diámetro exterior de 21,018 mm, y un diámetro de alambre de 3,5 mm. En la Figura 25 se muestran los resortes de compresión seleccionados.



**Figura 25: Resortes de compresión seleccionados.**

#### 4.11 Selección de la unidad de cierre

Como se mencionó previamente, la unidad de cierre que mantendrá apretadas ambas placas del molde durante la inyección del PLA corresponderá a un sistema de sujeción mediante un tornillo de banco, también conocido como prensa plana morsa. Luego, considerando el espacio entre columnas de la placa base se selecciona una prensa plana de 4 pulgadas modelo MOCM0140, la cual tiene un ancho de mordaza de 100 mm, una apertura máxima de 100 mm, y su base es de 165 x 180 mm. La prensa se fijará a la placa base con 4 pernos M12 de 20 mm de largo, la selección de los pernos de detalla en el ANEXO F. En la Figura 26 se muestra la prensa seleccionada.



**Figura 26: Prensa plana morsa modelo MOCM0140.**

## CAPÍTULO 5: Sistemas de control térmico y de presión

### 5.1 Selección del sistema térmico de la máquina inyectora

Inicialmente, se determina la cantidad de calor  $Q_1$  en el cilindro de plastificación a partir de la siguiente expresión:

$$Q_1 = \dot{m} \cdot \text{contenido de calor} \quad (28)$$

Donde:

$\dot{m}$  = Flujo másico dado en lb/h.

Contenido de calor por libra de PLA dado en unidades de btu/lb.

La masa a inyectar es de 100 g y el tiempo en segundos que demore el PLA en el proceso de calentamiento se asumió como 120 segundos, así:

$$\dot{m} = \frac{0,1 \text{ kg}}{120 \text{ s}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 3 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 6,61 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

Luego, como la temperatura de plastificación del PLA es de 175 °C ( 347 °F) y contenido de calor por libra de PLA es de aproximadamente 0,45 btu/lb°F, se tiene que:

$$\text{Contenido de calor} = 347 \text{ °F} \cdot 0,45 \frac{\text{btu}}{\text{lb}^\circ\text{F}} = 156,15 \frac{\text{btu}}{\text{lb}}$$

Por lo tanto, el calor transferido es:

$$Q_1 = 6,61 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \cdot 156,15 \frac{\text{btu}}{\text{lb}} = 1032,2 \frac{\text{btu}}{\text{h}} = 260,3 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 302,7 \text{ W}$$

Además, a partir de la Ley de Fourier se sabe que la transferencia de calor en una pared cilíndrica está dada por la siguiente expresión:

$$Q_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L \cdot (T_i - T_e)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \quad (29)$$

Donde:

$K$  = Conductividad térmica del material del cilindro = 43 kcal/h·m·°C

$L$  = Longitud del cilindro = 0,130 [m]

$T_i$  = Temperatura al interior del cilindro = 175 °C

$T_e$  = Temperatura en la superficie del cilindro

$r_e$  = Radio externo del cilindro = 0,025 m

$r_i$  = Radio interno del cilindro = 0,015 m

Conocida  $Q_1$  se puede despejar la temperatura en la superficie exterior del cilindro a partir de la ecuación (30):

$$T_e = T_i + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) \cdot Q_1}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L} \quad (30)$$

Así, reemplazando datos se despeja la siguiente temperatura al exterior del cilindro de plastificación:

$$T_e = 175 + \frac{\ln\left(\frac{0,025}{0,015}\right) \cdot 260,3}{2 \cdot \pi \cdot 43 \cdot 0,130} = 178,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Una vez determinada la temperatura en la superficie del cilindro se puede calcular la pérdida de calor por convección a partir de la siguiente expresión:

$$Q_2 = A \cdot h_c \cdot \Delta T \quad (31)$$

Donde:

$A$  = Área de transferencia de calor =  $2 \cdot \pi \cdot r_e \cdot L = 0,0204 \text{ m}^2$

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura entre superficie e interior =  $3,8 \text{ } ^\circ\text{C} = 276,8 \text{ K}$

$h_c$  = Coeficiente de convección del aire por convección natural =  $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

Por lo tanto, la pérdida de calor por convección es:

$$Q_2 = 0,0204 \cdot 10 \cdot 276,8 = 56,5 \text{ W}$$

Así, la potencia mínima que deben entregar los calefactores de boquilla para lograr plastificar el PLA en una cantidad de tiempo determinado es:

$$Q_{\text{neto}} = Q_1 + Q_2 = 359,2 \text{ W}$$

Luego, considerando el largo del cilindro de plastificación, se decide utilizar dos calefactores de boquilla, tal que:

$$Q_{\text{Cada Calefactor}} = \frac{Q_{\text{neto}}}{2} = 179,6 \text{ W}$$

Finalmente, se seleccionan dos calefactores de boquilla con dimensiones iguales de 50 mm de diámetro y 50 mm de ancho, con una potencia de 350 W cada uno, lo que es más que suficiente para llegar al  $Q_{\text{neto}}$  previamente determinado.



**Figura 27: Calefactor de boquilla.**

## 5.2 Selección de los elementos del circuito eléctrico

Luego, para hacer funcionar los calefactores, se seleccionan los siguientes elementos:

**Fuente de alimentación AC:** Esta sería la entrada principal de alimentación, suministrando corriente alterna al circuito. Para alimentar el circuito eléctrico se seleccionó un cable de poder de 3 hebras y 3 metros de largo como el que se muestra en la Figura 28.



**Figura 28: Cable de poder de 3 hebras.**

**Interruptor basculante:** Dispositivo que se utiliza para abrir o cerrar un circuito eléctrico. Su función principal es controlar el flujo de electricidad en el circuito, permitiendo o impidiendo el paso de corriente entre la fuente de alimentación y el controlador de temperatura. Se seleccionó un interruptor basculante de 4 pines el cual se muestra en la Figura 29.



**Figura 29: Interruptor basculante de 4 pines.**

**Controlador de temperatura PID:** Este dispositivo actúa como la interfaz del usuario que permite definir la temperatura deseada que el sistema debe mantener, mostrando tanto la temperatura actual del proceso como la temperatura objetivo. Además, permite configurar el circuito eléctrico para adaptarse a diferentes aplicaciones. Se seleccionó el controlador de temperatura REX-C100 el cual se muestra en la Figura 30.



**Figura 30: Controlador de temperatura REX-C100.**

**Relé de estado sólido (SSR):** El SSR actúa como un interruptor controlado por la señal del controlador de temperatura, encendiendo y apagando los calefactores boquilla en función de la temperatura medida. Se seleccionó un relé SSR-40 DA que viene con un disipador de calor, los cuales se muestran en la Figura 31.



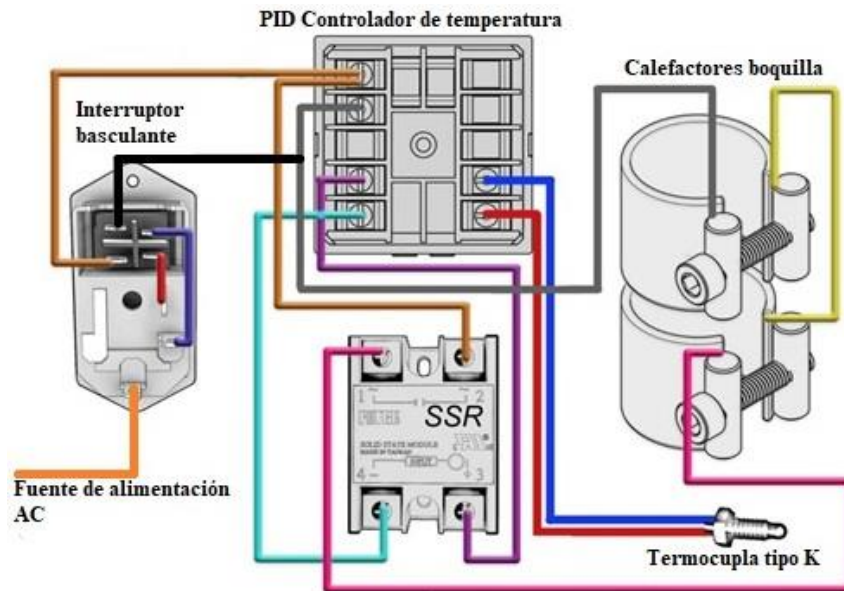
**Figura 31: Relé SSR-40 DA con su disipador de calor.**

**Sensor de temperatura:** Este dispositivo medirá la temperatura en el cilindro de plastificación y enviará la señal al PID. El dispositivo seleccionado es una termocupla tipo K con un diámetro de 4,5 mm que irá en el centro del cilindro de plastificación midiendo la temperatura del proceso. En la Figura 32 se muestra la termocupla seleccionada.



**Figura 32: Termocupla tipo k.**

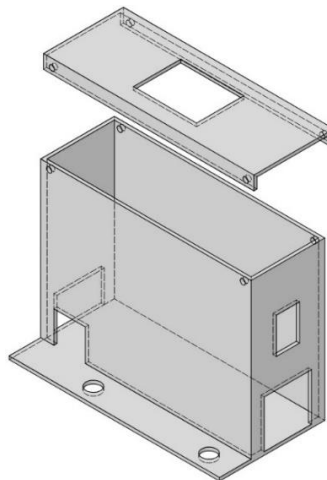
Además, en la Figura 33 se presenta un esquema de las conexiones a realizar para hacer funcionar correctamente los calefactores boquilla.



**Figura 33:** Esquema de conexiones del circuito eléctrico.

### 5.3 Diseño de caja de conexiones eléctricas

Para ordenar correctamente los elementos del circuito eléctrico y evitar que estos tengan contacto con el ambiente se diseña una caja donde irán ajustados dichos elementos en función de sus dimensiones. La caja se ajustará sobre la placa de fijación a la izquierda del cilindro neumático con tuercas hexagonales. El diseño se envió al Laboratorio de Manufactura Digital para imprimirlo en 3D. El diseño se muestra en la Figura 34.



**Figura 34:** Diseño de la caja de conexiones eléctricas.

## 5.4 Selección de elementos neumáticos

Para hacer actuar el cilindro neumático de doble efecto se seleccionan los siguientes elementos:

**Válvula reguladora de presión de aire:** Permite ajustar la presión de salida del aire para cumplir con los requisitos específicos de operación del cilindro neumático. Se seleccionó la válvula modelo SR200-06 de la marca AirTAC, la cual se muestra en la Figura 35. Esta válvula tiene un rango de ajuste de presión de aire de 0,5 a 10 bar, y permite una presión máxima de 10 bar.



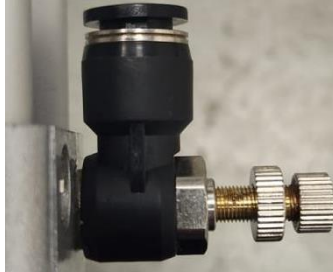
Figura 35: Válvula reguladora de presión de aire modelo SR200-06.

**Válvula de control de flujo de aire:** Permite controlar el flujo de aire en el cilindro neumático tanto en su avance como en su retracción. Se seleccionó una válvula mecánica modelo M5B210-08 de la marca AirTAC, la cual se muestra en la Figura 36. Esta válvula tiene dos conexiones que van a la entrada y salida del aire del cilindro neumático y una que va hacia la red de aire del taller. Su palanca superior permite dos posiciones, el avance y la retracción del pistón del cilindro neumático.



Figura 36: Válvula de control de flujo de aire 5/2 modelo M5B210-08.

**Regulador de caudal:** Para ajustar la cantidad de flujo que pasa a través del cilindro neumático, permitiendo así controlar la velocidad a la que actúa el vástago. Se seleccionó un regulador de caudal en tipo codo 90°, como se observa en la Figura 37. Este regulador se ajusta directamente al cilindro neumático y permite ajustes manuales del caudal de aire.



**Figura 37: Regulador de caudal en tipo codo 90°.**

**Conector tipo T:** Para poder realizar la conexión entre la red de aire del taller y el circuito neumático de la máquina inyectora. Este elemento permite pasar de las mangueras de 10 mm de la red de aire a las de 8 mm utilizadas en el circuito neumático. En la Figura 38 se muestra el conector tipo T utilizado para conectar la red de aire al circuito neumático de la máquina inyectora.



**Figura 38: Conector tipo T con reducción de 10 a 8 mm.**

**Válvula de bola:** Para abrir o cerrar completamente el paso del aire comprimido desde la red de aire del taller al circuito neumático de la máquina inyectora, actuando como un interruptor para el flujo de aire. En la Figura 39 se muestra la válvula de bola seleccionada.



**Figura 39: Válvula de bola seleccionada.**

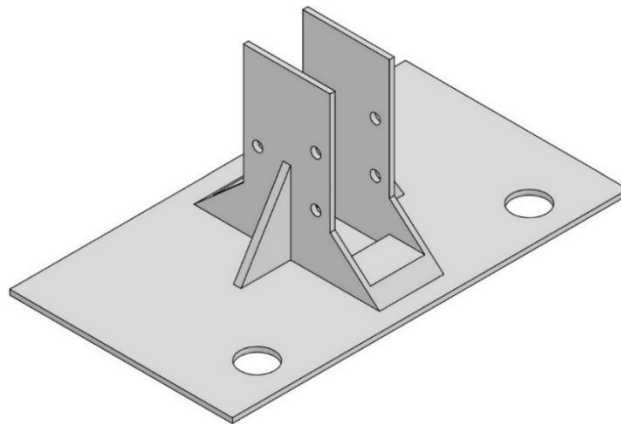
**Mangueras:** Para realizar la conexión entre los elementos neumáticos y permitir el transporte del aire comprimido entre estos. Se seleccionaron mangueras neumáticas de poliuretano, debido a su flexibilidad, resistencia a la abrasión, ligereza, resistencia a los químicos y baja permeabilidad. En la Figura 40 se muestran las mangueras utilizadas para realizar las conexiones del sistema neumático.



**Figura 40:** Manguera neumática de 8 mm de poliuretano.

### 5.5 Diseño de soporte para válvula de control de flujo de aire

Como la válvula de control de flujo de aire será la encargada de hacer que el cilindro neumático avance y se retraiga, se diseña un soporte en función de sus dimensiones para poder fijarla a la máquina inyectora y que así sea más fácil para el usuario realizar el proceso de inyección. El soporte se ajustará sobre la placa de fijación a la derecha del cilindro neumático con tuercas hexagonales. Al igual que la caja de conexiones, el diseño del soporte para la válvula se envió al Laboratorio de Manufactura Digital para imprimirlo en 3D. El diseño del soporte se muestra en la Figura 41.



**Figura 41:** Diseño del soporte para la válvula de control de flujo de aire.

## CAPÍTULO 6: Costos de fabricación de la máquina inyectora de PLA

A continuación, se listan los materiales con los que se maquinarán los elementos estructurales de la máquina, los elementos del circuito neumático, del circuito eléctrico, del sistema de cierre y los elementos de fijación. En la Tabla 6 se listan los elementos y sus costos.

**Tabla 6: Costos de materiales de la estructura de la máquina.**

| Ítem                               | Especificación                       | Cant | Costo unitario | Costo total       |
|------------------------------------|--------------------------------------|------|----------------|-------------------|
| Plancha                            | A36, 300x300x10 mm                   | 3    | \$ 14.703      | \$ 44.109         |
| Barra redonda                      | A36, ø19 mm, 6000 mm                 | 1    | \$ 15.631      | \$ 15.631         |
| Barra redonda                      | AISI 1045, ø50 mm, 300 mm            | 1    | \$ 14.903      | \$ 14.903         |
| Cilindro neumático                 | Doble efecto, D 32 mm, C 200 mm      | 1    | \$ 131.081     | \$ 131.081        |
| Válvula reguladora de presión      | AirTAC, SR200-06                     |      |                |                   |
| Válvula controladora de flujo      | Air TAC, 5/2, M5B210-08              |      |                |                   |
| Regulador de caudal                | Tipo codo 90 °                       |      |                |                   |
| Manguera neumática                 | Poliuretano                          |      |                |                   |
| Codo                               | En 90 °                              | 1    | \$ 28.000      | \$ 28.000         |
| Controlador de temperatura digital | PID REX-C100                         |      |                |                   |
| Relé de Estado Sólido              | Max.40A SSR                          |      |                |                   |
| Termopar                           | Tipo K                               | 2    | \$ 18.660      | \$ 44.976         |
| Calefactor boquilla                | ø50 mm, 50 mm, 350 W                 |      |                |                   |
| Cable de conexión                  | 18 AWG, 2 m                          | 3    | \$ 1.713       | \$ 5.140          |
| Terminales tipo horquilla          | 18 AWG, 100 unidades                 | 1    | \$ 2.150       | \$ 2.150          |
| Terminales tipo paleta             | 18 AWG, hembra, , bolsa 100 unidades | 1    | \$ 6.290       | \$ 6.290          |
| Interruptor basculante             | 4 pines ,16A,250 VAC                 | 1    | \$ 1.000       | \$ 1.000          |
| Enchufe domiciliario               | Macho volante 2P + T 16A             | 1    | \$ 1.850       | \$ 1.850          |
| Prensa plana                       | Crownman, 4 pulgadas                 | 1    | \$ 14.990      | \$ 14.990         |
| Perno                              | M6, 20 mm                            | 6    | \$ 584         | \$ 3.502          |
| Perno                              | M12, 20 mm                           | 6    | \$ 218         | \$ 1.549          |
| Golilla plana                      | 1/2" MF                              | 6    | \$ 42          | \$ 249            |
| Tuerca Hexagonal                   | M14 x 1,5                            | 6    | \$ 550         | \$ 3.300          |
| Resorte de compresión              | Di 14 mm, Da 3 mm, 122 mm            | 4    | \$ 5.000       | \$ 20.000         |
|                                    |                                      |      | <b>Total</b>   | <b>\$ 338.720</b> |

Por otro lado, para determinar los costos de la mano de obra en la fabricación de las piezas de la máquina se consultó a los trabajadores del taller del Departamento de Ingeniería Mecánica, los cuales estimaron el costo por hora de trabajo para los procesos de torneado, fresado y taladrado. Así, se concluyó que el proceso que más tomará tiempo es el torneado en las columnas, el cilindro de plastificación y la boquilla. Para lo cual se estimó un tiempo de 2 jornadas laborales de 8 horas. Además, se estimó que el tiempo de fresado y taladrado de las piezas tardará una jornada laboral de 8 horas por cada proceso. Por otro lado, el costo por la soldadura de las columnas se calcula en función de las pulgadas soldadas. Teniendo esto en cuenta se calcula el costo por soldadura considerando que se soldarán 36 cm aproximadamente, lo que equivale a 14,2 pulgadas. En la Tabla 7 se presentan los costos de la mano de obra para la fabricación de las piezas diseñadas.

**Tabla 7: Costos de mano de obra.**

| <b>Tipo de Costo</b> | <b>Proceso</b> | <b>Costo Unitario</b> | <b>Horas</b> | <b>Costo Total</b> |
|----------------------|----------------|-----------------------|--------------|--------------------|
| Por hora             | Torneado CNC   | \$25.000              | 16           | \$400.000          |
| Por hora             | Fresado CNC    | \$30.000              | 8            | \$240.000          |
| Por hora             | Taladrado      | \$8.000               | 8            | \$64.000           |
| Por pulg             | Soldadura      | \$2.500               | -            | \$35.500           |
|                      |                |                       | <b>Total</b> | <b>\$739.500</b>   |

Luego, sumando todos los costos totales y sumando un 20 % del subtotal por imprevistos, se puede determinar un costo aproximado del costo total de la fabricación de la máquina inyectora de PLA. En la Tabla 8 se listan los costos totales por la fabricación de la máquina.

**Tabla 8: Costos totales de la máquina inyectora.**

| <b>Tipo de Costo</b>                   | <b>Costo</b> |
|--|--------------|
| Costo total de elementos de la máquina | \$ 338.720   |
| Costo total de mano de obra            | \$ 739.500   |
| Subtotal                               | \$ 1.078.220 |
| Imprevistos 20 %                       | \$ 215.644   |
| Costo total de la máquina inyectora    | \$ 1.293.864 |

Por lo tanto, para el diseño y fabricación de la máquina inyectora de PLA con compresión neumática, se necesita un presupuesto aproximado de \$1295000.

## **CAPÍTULO 7: Construcción y montaje de la máquina inyectora de plástico con compresión neumática de tipo vertical**

El maquinado de los elementos estructurales de la máquina se lleva a cabo por los trabajadores del taller de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción.

### **7.1 Construcción de los elementos estructurales de la máquina inyectora**

#### **7.1.1 Maquinado de las columnas de soporte**

A partir de la barra redonda de acero ASTM A36 de diámetro 19 mm y 6000 mm de largo, se maquinas las 6 columnas de 445 mm de largo de la máquina. Mediante un proceso de torneado se les hizo el desbaste externo para reducir el diámetro de acuerdo a los diseños previamente realizados, y mediante un proceso de torneado con control numérico se les hizo las roscas. En la Figura 42 se observan todas las columnas de soporte de la máquina.



**Figura 42: Columnas de soporte de acero ASTM A36.**

#### **7.1.2 Maquinado de la boquilla de inyección y el cilindro de plastificación**

A partir de la barra redonda de acero AISI 1045 de diámetro 50 mm y 300 mm de largo, se corta una barra redonda de 40 mm de largo para hacer la boquilla y otra de 130 mm de largo para hacer el cilindro de plastificación. Luego, mediante un proceso de torneado se hizo el desbaste externo para hacer la parte cónica de la boquilla, y también se hizo un desbaste interno para obtener las cavidades por donde se moverá el PLA fundido. A continuación, mediante un proceso de torneado por numérico se les hacen las roscas internas y externas de acuerdo a los diseños. En la Figura 43 se muestra la boquilla de inyección y el cilindro de plastificación una vez realizados todos los procesos de fabricación.



**Figura 43: Boquilla de inyección y cilindro de plastificación de acero AISI 1045.**

### 7.1.3 Maquinado del émbolo de inyección

A partir de la barra redonda de acero AISI 1045 de diámetro 50 mm, se corta una barra redonda de 25 mm de largo. Luego, mediante un proceso de torneado se realizó el desbaste exterior. Y también, se le hizo la rosca interna para ajustar el émbolo al cilindro neumático como se observa en la Figura 44.



**Figura 44: Émbolo de inyección de acero AISI 1045.**

### 7.1.4 Maquinado de la placa base y la placa de fijación del cilindro neumático

A partir de las planchas de acero ASTM A36 de 300 mm por lado y 10 mm de espesor, se maquinas ambas plancha de 270 mm por lado mediante un proceso de fresado. Luego, mediante fresado con control numérico se les hizo los agujeros pasantes. Finalmente, mediante un proceso de torneado se le hizo los agujeros roscados a la placa base. En la Figura 45 se muestran ambas placas una vez realizados todos los procesos de fabricación.



**Figura 45: Placa base y placa de fijación del cilindro neumático de acero ASTM A36.**

### 7.1.5 Maquinado de la placa de fijación del cilindro de plastificación

A partir de la última de las planchas de acero ASTM A36 de 300 mm por lado y 10 mm de espesor, se maquina la placa de fijación del cilindro de plastificación. Luego, mediante fresado con control numérico se le hacen los 2 agujeros por donde pasarán las 2 columnas centrales de la máquina. Además, mediante un proceso de torneado se hace el agujero central roscado donde se fijará el cilindro de plastificación. Finalmente, se le sueldan los 2 bujes guías de acero AISI 1020 de 25 mm de largo, con el mismo diámetro interno que los agujeros de la placa. En la Figura 46 se muestra la placa de fijación del cilindro de plastificación con las bujes guías soldados.



**Figura 46: Placa de fijación del cilindro de plastificación de acero ASTM A36.**

### 7.1.6 Maquinado de la tolva de alimentación

A partir de una barra redonda de acero AISI 1020 de 40 mm de diámetro, se corta una barra de 40 mm de largo. Luego, mediante un proceso de torneado se le hace un agujero pasante de 28 mm de diámetro y además, se le hace un desbaste externo en su parte inferior hasta obtener un cuello de 30 mm de diámetro con el fin de ajustarlo al cilindro de plastificación. A continuación, se le suelda la parte primática que actuará como una rampa para el material a plastificar hecha a partir de una lámina de acero de 2 mm de espesor, como se observa en la Figura 47.



**Figura 47: Tolva de alimentación de acero AISI 1020.**

### **7.1.7 Impresiones 3D de caja para conexiones eléctricas y soporte para fijación de válvula de control de flujo de aire**

Los diseños de la caja para las conexiones eléctricas y el soporte para la válvula de control de flujo de aire fueron impresos por el proceso de modelado por deposición fundida, obteniéndose las piezas de PLA que se observan en la Figura 48.



**Figura 48: Caja de conexiones eléctricas y soporte de válvula de control impresas en PLA.**

## **7.2 Montaje de la máquina inyectora de plástico**

### **7.2.1 Montaje de la estructura base de la máquina inyectora**

Se ensamblan y ajustan todos los elementos estructurales de la máquina que soportarán las cargas ejercidas por el cilindro neumático. En la Figura 49 se observa el ensamblaje de la estructura base. En el ANEXO G se muestra el ensamblaje en detalle.



**Figura 49: Ensamblaje de la estructura base la máquina inyectora.**

### 7.2.2 Montaje de circuito neumático

Para montar el circuito neumático, el primer paso es realizar la conexión entre la red de aire del taller y el circuito neumático, para ello se utiliza el conector tipo T, el cual permite pasar de las mangueras de 10 mm de la red de aire a las de 8 mm utilizadas en circuito neumático. A continuación, se conecta la válvula de bola, la cual permitirá abrir y cerrar el paso de aire desde la red de aire del taller al circuito neumático. En la Figura 50 se observa la conexión del conector tipo T con la red de aire del taller y a continuación su conexión con la válvula de bola.



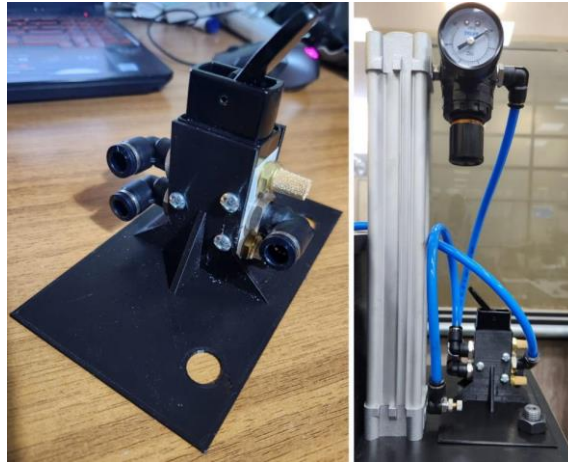
**Figura 50: Conexión entre la red de aire del taller y la válvula de bola del circuito neumático.**

Luego se ajusta el cilindro neumático a la placa superior de la máquina con los pernos M6 previamente seleccionados, además, se rosca el émbolo de inyección con el vástago del cilindro neumático. En la Figura 51 se muestra el ajuste del cilindro neumático a la placa superior de la máquina, y el ajuste del émbolo de inyección al vástago del cilindro neumático.



**Figura 51: Ajuste del émbolo de inyección en vástago del cilindro neumático.**

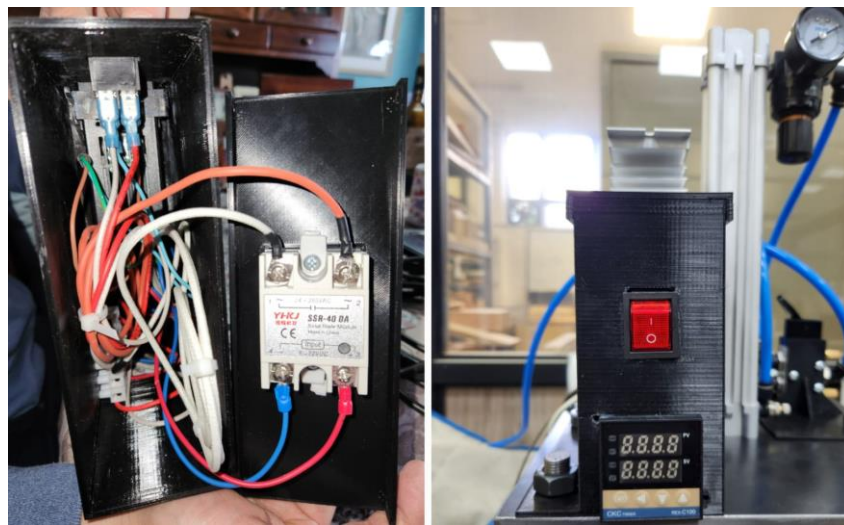
A continuación, se ajusta la válvula de control de flujo de aire a su respectivo soporte y este se fija a la placa superior de la máquina con las tuercas hexagonales previamente seleccionadas. Finalmente se realiza la conexión entre la válvula de bola y la válvula de control de flujo de aire, y la conexión entre la válvula de control de flujo de aire y la entrada y salida de aire del cilindro neumático, como se observa en la Figura 52.



**Figura 52: Conexión entre válvula de control de flujo de aire y cilindro neumático.**

### 7.2.3 Montaje del circuito eléctrico

Para montar el circuito eléctrico, el primer paso fue realizar las conexiones especificadas en la Figura 33 y ajustar los elementos en la caja de conexiones eléctricas. En la Figura 53 se observan las conexiones eléctricas realizadas y la fijación de la caja de conexiones eléctricas en la placa superior de la máquina con las tuercas hexagonales previamente seleccionadas.



**Figura 53: Elementos del circuito eléctrico ajustados en la caja de conexiones.**

A continuación, con una llave Allen se ajustan los calefactores boquilla en el cilindro de plastificación. Además, se ajusta la termocupla tipo k en el calefactor inferior para medir la temperatura del cilindro de plastificación cuando los calefactores estén encendidos, como se observa en la Figura 54.



**Figura 54: Ajuste de calefactores boquilla y termocupla en el cilindro de plastificación.**

#### **7.2.4 Montaje del sistema de cierre del molde**

Con un llave Allen, se fija la prensa plana en la placa base utilizando los pernos M12 con golilla previamente seleccionados, como se observa en la Figura 55.

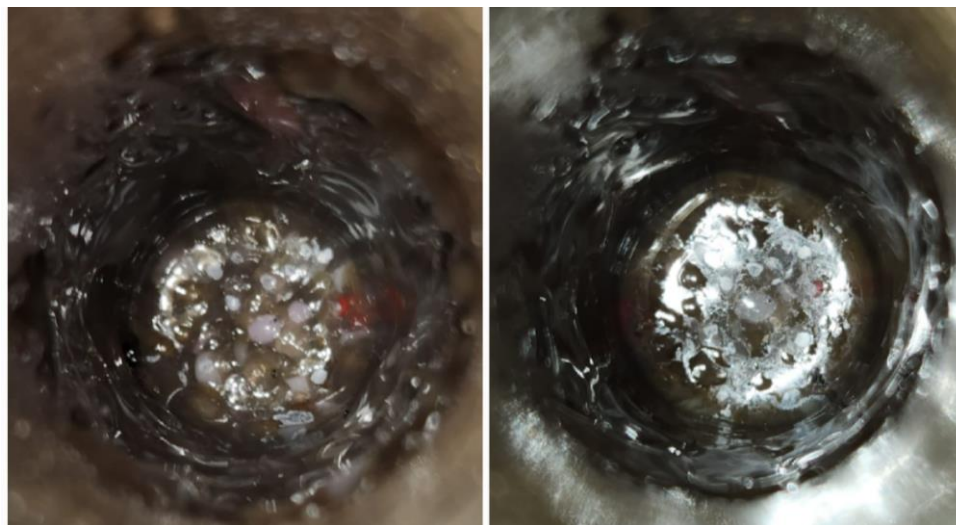


**Figura 55: Ajuste de la prensa plana en la placa base.**

## CAPÍTULO 8: Pruebas de inyección

### 8.1 Prueba de inyección sin molde

La primera prueba de inyección se realizó sin molde ni sistema de cierre, para determinar cuánto tiempo se demoraban los calefactores boquilla en llevar al cilindro de plastificación a la temperatura deseada, y cuánto tiempo se demoraba en fundir el material y escurrir a través de la boquilla de inyección. Para ello se programó el controlador de temperatura para que los calefactores llevaran al cilindro de plastificación a una temperatura de 200 °C. Así, se determinó que los calefactores boquilla demoran unos 35 minutos en llevar el cilindro de plastificación a la temperatura deseada. Luego, cuando el cilindro de plastificación alcanzó una temperatura estable de 200 °C, se pesaron 40 gramos de PLA triturado y se agregaron en el cilindro de plastificación en caliente con la tolva de alimentación. A continuación, se observó que a los 5 minutos el material fundido comenzó a escurrir a través de la boquilla de inyección. Sin embargo, observando dentro del cilindro de plastificación, el material seguía de forma granulada por lo que se dejó otros 10 minutos calentando hasta obtener una masa fundida uniforme como la que se observa en la Figura 56. Así, se determinó que el PLA demora unos 15 minutos en fundir dentro del cilindro de plastificación a 200 °C.



**Figura 56: Material dentro del cilindro de plastificación a los 10 y 15 minutos respectivamente.**

Finalmente, se abrió la válvula de bola permitiendo el paso del aire comprimido desde la red de aire del taller al circuito neumático, y se accionó el cilindro neumático para realizar la inyección a una presión de 6 bar. Como se observa en la Figura 57, el material fundido salió uniformemente de la boquilla de inyección con un espesor de filamento de 4 mm.



**Figura 57: Prueba de inyección de PLA sin molde.**

### **8.1.1 Comentarios tras la prueba de inyección sin molde**

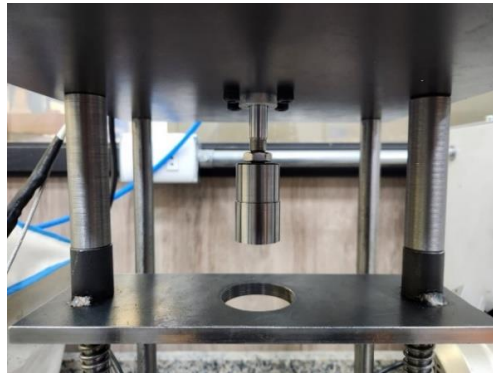
Durante el proceso de inyección, el émbolo de inyección quedó con material fundido pegado, haciendo que se quedara atascado en cilindro de plastificación y al momento de retraerse subió con el cilindro de plastificación y su placa de fijación. Por otro lado, se observó que el largo del émbolo diseñado no era suficiente para permitir que todo el material fundido saliera por la boquilla de inyección. Además, después del proceso de inyección, se observó que el material fundido se solidificó rápidamente en el émbolo. Por último, se observó pequeñas filtraciones de material fundido en la unión roscada entre la boquilla y el cilindro de plastificación, como se observa en la Figura 58.



**Figura 58: PLA solidificado en el émbolo de inyección y filtración de PLA en unión roscada.**

### 8.1.2 Puesta a punto de la máquina inyectora de plástico

Para evitar que la placa de fijación del cilindro de plastificación suba cuando el émbolo se retrae, se decidió diseñar y fabricar 2 bujes guías de acero AISI 1020 de 96 mm de largo con un diámetro interno de 15 mm los cuales se ajustaron entre la placa superior de la máquina y los bujes guías soldados a la placa de fijación del cilindro de plastificación. También, para que salga todo el material por la boquilla de inyección se diseñó y fabricó un nuevo émbolo de inyección de acero AISI 1045 de 50 mm largo, con el mismo diámetro externo y tolerancias que el anterior. En la Figura 59 se observan los nuevos bujes y el nuevo émbolo de inyección fabricados.



**Figura 59: Nuevos bujes guías y nuevo émbolo de inyección.**

Por otro lado, para evitar las filtraciones de material entre la unión roscada de la boquilla de inyección con el cilindro de plastificación, se les hizo a ambos elementos muescas de 6 mm de ancho y 9,5 mm de largo para poder apretar ambas piezas con llaves cuello de cisne. De igual forma, estas muescas permitirán soltar ambos elementos en caso de que se peguen con el material fundido. Además, al cilindro de plastificación se le hizo un agujero ciego de 5 mm de profundidad con una rosca interna M6 x 1 para poder ajustar de mejor manera la termocupla al cilindro de plastificación. En la Figura 60 se observan las modificaciones realizadas.



**Figura 60: Modificaciones realizadas a la boquilla y el cilindro de plastificación.**

Por otro lado, se determinó que la masa mínima de PLA que puede inyectar la máquina es de 10 gramos ya que, como se observa en la Figura 61 esta es la cantidad mínima de material que llena en su totalidad a la boquilla de inyección.



**Figura 61: Cantidad mínima de material que la máquina puede inyectar.**

Una vez realizadas todas estas modificaciones se procedió a montar nuevamente la máquina inyectora de plástico, y se verificó que todos los elementos encajaran y funcionaran correctamente, para poder realizar las pruebas de inyección con el molde para probetas que se tiene a disposición en Laboratorio de Manufactura Digital.

## **8.2 Pruebas de inyección con molde**

### **8.2.1 Primera prueba de inyección con molde**

Se programó el controlador de temperatura para que los calefactores llevaran al cilindro de plastificación a una temperatura de 200 °C. Luego, cuando el cilindro de plastificación alcanzó la temperatura establecida, se agregaron 40 gramos de PLA triturado en el cilindro de plastificación con la tolva de alimentación. Mientras el material se fundía, se procedió a calentar el molde en un horno a 240 °C por 15 minutos como se observa en la Figura 62. Esto es una práctica eficaz para que el material fluya fácilmente dentro del molde durante el proceso de inyección, además de mejorar las propiedades mecánicas y térmicas del material, reducir la deformación y optimizar la calidad del producto final.



**Figura 62: Pre calentamiento del molde en un horno a 240 °C.**

Una vez pasados los 15 minutos necesarios para plastificar el PLA, se ajustó el molde en caliente en la prensa plana utilizando guantes para trabajar a altas temperaturas y se abrió la válvula de bola permitiendo el paso del aire comprimido al circuito neumático. A continuación, se accionó el cilindro neumático para realizar la inyección a una presión de 6 bar, y se mantuvo la presión durante unos 40 segundos. Finalmente, se retrae el émbolo y con guantes se retira el molde de la prensa plana, para luego sumergirlo en agua hasta que se enfrió completamente.

Como se aprecia en la Figura 63, tras abrir el molde se observa que las probetas fueron moldeadas completamente, sin embargo, estas presentan burbujas en su interior. Las burbujas en las piezas de PLA inyectadas pueden deberse a varias causas, principalmente la humedad en el material o problemas en el proceso de inyección tales como falta de temperatura y tiempo para la correcta plastificación del PLA, falta de presión de inyección, y una velocidad de inyección muy alta que puede causar turbulencias y atrapar aire.



**Figura 63: Probetas moldeadas con presencia de burbujas.**

### 8.2.2 Segunda prueba de inyección con molde

Para evitar la humedad en el material a fundir, se dejaron 40 gramos de PLA triturado precalentando en un horno a 55 °C por una hora. Además, se programó el controlador de temperatura para que los calefactores llevaran al cilindro de plastificación a una temperatura de 210 °C mientras en simultaneo se calentaba el molde a 240 °C en otro horno. Cuando el cilindro de plastificación alcanzó la temperatura establecida, se agregaron los 40 gramos de PLA y se dejaron calentando durante 20 minutos. Una vez pasado el tiempo establecido se ajustó el molde en caliente en la prensa plana y se apretó el regulador de caudal para que el émbolo bajara más lento. Finalmente, se accionó el cilindro neumático para realizar la inyección a una presión de 8 bar y se mantuvo la presión durante un minuto. Tras enfriar y abrir el molde, se obtienen probetas como las que se observan en la Figura 64, las cuales salieron completas y casi sin presencia de burbujas. Por lo que se concluye que el material debe ser deshumidificado por más tiempo, recomendablemente unas 3 a 4 horas. En la Tabla 9 se hace una lista de recomendaciones para trabajar con el PLA reciclado.



**Figura 64: Probetas moldeadas casi sin presencia de burbujas.**

**Tabla 9: Recomendaciones para inyectar PLA reciclado.**

|                                    |                                       |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| Masa a inyectar                    | 10 g a 60 g                           |
| Temperatura de trabajo recomendada | 200 °C a 210 °C                       |
| Presión de inyección recomendada   | 6 bar a 8 bar                         |
| Tiempo para calentar el cilindro   | 35 minutos desde temperatura ambiente |
| Tiempo para fundir el PLA          | 15 a 20 minutos                       |
| Tiempo de sostenimiento de presión | 40 a 60 segundos                      |

## CAPÍTULO 10: Conclusiones y recomendaciones

### 9.1 Conclusiones

- Se diseñó y fabricó una máquina inyectora de termoplásticos, preferentemente PLA, con una capacidad máxima de inyección de 100 gramos. Cuya configuración de trabajo es vertical y realiza la inyección con un cilindro neumático de doble efecto, el cual trabaja a una presión de inyección máxima de 8 bar (116 psi). La acción y retracción del émbolo de inyección se realiza por medio de una válvula de control de flujo de aire. El sistema de dosificación corresponde a una tolva prismática removible, y el sistema térmico posee un regulador de temperatura analógico capaz de mantener una temperatura constante en el cilindro de plastificación entre 30 y 400 °C durante el ciclo de operación. El sistema de cierre corresponde a una prensa plana de 4 pulgadas operada de forma manual.
- El costo total del diseño y fabricación de la máquina inyectora de plástico con compresión neumática fue de aproximadamente \$1295000, el cual se calculó considerando el costo de los materiales, el costo de los elementos neumáticos, eléctricos y de fijación, y el costo de la mano de obra.
- Se realizaron pruebas de inyección de PLA y se optimizó el proceso de inyección, cumpliéndose el objetivo general del proyecto, al producir piezas de plástico de tamaño reducido a partir de los restos de PLA que se generan en el Laboratorio de Manufactura Digital de la Universidad de Concepción.

### 9.2 Recomendaciones para trabajos futuros.

- Considerando el tiempo que tardan los calefactores de boquilla en llevar al cilindro de plastificación a la temperatura deseada, se puede utilizar algún tipo de elemento aislante como una manta de cerámica para cubrir los calefactores y el cilindro, para así evitar pérdidas de calor al ambiente.
- La retracción del cilindro neumático es muy rápida, por lo que se recomienda agregar otro regulador de caudal en la parte superior del mismo antes de la válvula reguladora de presión.
- Para alinear de mejor forma la boquilla de inyección con el molde, se puede hacer una rosca externa en la boquilla y una rosca interna en el bebedero del molde con el mismo paso.
- Realizar pruebas de inyección con otros termoplásticos y pruebas de calidad a los objetos producidos.

## Bibliografía

- [1] Paritosh Kumar Patro, Satvik Kandregula, M.N. Suhail Khan, Sreethul Das, Investigation of mechanical properties of 3D printed sandwich structures using PLA and ABS, *Materials Today: Proceedings*, 2023, ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.366>.
- [2] Campozano Mendoza, Iris Rosalia, & Riera, María Antonieta. (2022). *Ácido poliláctico: una revisión de los métodos de producción y sus aplicaciones // Polylactic acid: a review of production methods and their applications*. *Publicaciones en ciencias y tecnología* (e-issn: 2477-9660), 16(1), 42–53. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6908007>
- [3] Ong, T.K., Choo, H.L., Choo, W.J., Koay, S.C., Pang, M.M. (2020). Recycling of Polylactic Acid (PLA) Wastes from 3D Printing Laboratory. In: Emamian, S.S., Awang, M., Yusof, F. (eds) *Advances in Manufacturing Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5753-8\\_67](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5753-8_67)
- [4] Shady Farah, Daniel G. Anderson, Robert Langer, Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review, *Advanced Drug Delivery Reviews*, Volume 107, 2016, Pages 367-392, ISSN 0169-409X. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>.
- [5] Tamás Tábi, Tatyana Ageyeva, József Gábor Kovács, The influence of nucleating agents, plasticizers, and molding conditions on the properties of injection molded PLA products, *Materials Today Communications*, Volume 32, 2022, 103936, ISSN 2352-4928. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103936>
- [6] Paul, A., Sreedevi, K., Sharma, S.S., Anjana, V.N. (2023). Polylactic Acid (PLA). In: Thomas, S., AR, A., Jose Chirayil, C., Thomas, B. (eds) *Handbook of Biopolymers*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-0710-4\\_44](https://doi.org/10.1007/978-981-19-0710-4_44)
- [7] Marian Żenkiewicz, Józef Richert, Piotr Rytlewski, Krzysztof Moraczewski, Magdalena Stepczyńska, Tomasz Karasiewicz, Characterisation of multi-extruded poly(lactic acid), *Polymer Testing*, Volume 28, Issue 4, 2009, Pages 412-418, ISSN 0142-9418. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2009.01.012>
- [8] Isabelle Anderson. Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid. *3D Printing and Additive Manufacturing*. Jun 2017. 110-115. <http://doi.org/10.1089/3dp.2016.0054>
- [9] Peng Zhao, Chengchen Rao, Fu Gu, Nusrat Sharmin, Jianzhong Fu, Close-looped recycling of polylactic acid used in 3D printing: An experimental investigation and life cycle assessment, *Journal of Cleaner Production*, Volume 197, Part 1, 2018, Pages 1046-1055, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.275>

- [10] L.-T. Lim, R. Auras, M. Rubino, Processing technologies for poly(lactic acid), *Progress in Polymer Science*, Volume 33, Issue 8, 2008, Pages 820-852, ISSN 0079-6700, <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004>
- [11] Dominick V. Rosato, Donald V. Rosato, Marlene G. (2000). *Injection molding handbook* (3<sup>a</sup> ed.). ISBN 0-7923-8619-1.
- [12] M. Beltrán and A. Marcilla, *Tecnología de Polimeros.*: Universidad de Alicante, Departamento de Ingeniería Química.
- [13] Budynas, R. G. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (9a. ed., 9a. reimp.). Mexico: McGraw-Hill Interamericana.
- [14] Mott, Robert .L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas.*( 4<sup>a</sup> ed.). ISBN 970-26-0812-0.
- [15] P. Martínez, *Diseño y Construcción de una Máquina de Inyección de Termoplásticos para Fines Didácticos.* San Salvador: Universidad de El Salvador, 2002.

## **ANEXO A: Manuales de uso de la máquina**

### **Descripción de la máquina de inyección**

Es una máquina de inyección de termoplásticos, preferentemente PLA, con una capacidad máxima de inyección de 100 gramos, presión de inyección de 116 psi. El sistema de cierre es una prensa plana operada de forma manual. La acción y retracción del émbolo de inyección se realiza por medio de una válvula de control de flujo aire. Tiene la capacidad de fabricar piezas hasta de 100 gramos, el sistema de dosificación corresponde a una tolva prismática removible, y el sistema térmico posee un regulador de temperatura analógico capaz de mantener una temperatura constante en el cilindro de plastificación entre 30 y 400 °C durante el ciclo de operación.

### **Normas de seguridad**

- Leer y comprender todo el manual de usuario antes de iniciar cualquier operación.
- Verificar la limpieza del área de trabajo y las piezas de trabajo tales como el émbolo de inyección y los resortes de compresión, para el correcto uso de la máquina.
- Verificar el correcto ensamblaje de la estructura de la máquina.
- Verificar el correcto ajuste de los elementos del circuito neumático, tales como las conexiones con mangueras del mismo, y el correcto roscado del émbolo con el vástago.
- Verificar el correcto ajuste de los elementos del circuito eléctrico, tales como el apriete de los calefactores boquilla y el ajuste de la termocuplas tipo k en el agujero ciego del cilindro de plastificación.
- Verificar la correcta fijación de la prensa plana en la placa base.
- No calibrar o ajustar ningún elemento neumático o eléctrico cuando estén operando o estén energizados.
- No tocar elementos térmicos o los que se encuentran en contacto con los mismos, sin guantes para trabajos de alta temperatura.
- No colocar las manos u objetos entre la válvula y sus mangueras, y elementos móviles como el émbolo de inyección.
- No acercar elementos cortopunzantes a mangueras, y cables del circuito eléctrico.
- No derramar sustancias corrosivas o inflamables.
- No realizar pruebas de inyección con materiales que no sean termoplásticos.

## Manual del usuario

- Conectar la caja de conexiones eléctricas a la toma de corriente y encender el circuito pulsando el interruptor basculante.
- Cuando se encienda el controlador de temperatura, se debe configurar el sistema para que entregue calor, para ello se debe pulsar el botón SET y la flecha hacia la izquierda simultáneamente hasta que aparezca el código “Cod” en pantalla. Luego, se debe pulsar la flecha hacia arriba hasta que aparezca el código “001”. Para salir del menú de configuración, se debe mantener pulsado el botón SET y la flecha hacia la izquierda.
- Para configurar la temperatura a la que se quiere llevar al cilindro de plastificación, se debe pulsar el botón SET una vez y aparecerá el código “Su”, en ese menú con las flechas hacia arriba y hacia abajo se debe configurar la temperatura deseada de 200 a 210 °C dependiendo del termoplástico a calentar, y para definirla se debe pulsar nuevamente el botón SET. Los calefactores tardan unos 35 minutos en llevar al cilindro de plastificación a la temperatura deseada.
- Para configurar la velocidad y presión de inyección de cilindro neumático se recomienda hacerlo cuando el cilindro de plastificación esté en caliente, ya que esto permitirá que escurra el material remanente de inyecciones previas y también permitirá verificar que le émbolo entre sin interferencias en el cilindro de plastificación. Para ello, lo primero es abrir la válvula de bola permitiendo que el aire comprimido del taller llegue al cilindro neumático. A continuación, para configurar la velocidad de inyección, se debe girar en sentido horario el perno del regulador de caudal si se quiere disminuir la velocidad y en sentido antihorario si se quiere aumentar. Luego, para configurar la presión de inyección, se debe accionar hacia la derecha la palanca de la válvula de control de flujo de aire lo que hará que el émbolo baje, simultáneamente a esto se debe girar en sentido horario la válvula reguladora de presión de aire si se quiere aumentar la presión de inyección, y en sentido antihorario si se quiere disminuir.
- Se recomienda que el material a inyectar sea previamente deshumidificado a 55 °C por 3 a 4 horas. En caso de no ser así, se recomienda no agregar más de 60 gramos de material ya que, la expansión térmica del mismo hará que suba y se salga por la parte superior del cilindro de plastificación.
- A continuación, mientras el cilindro de plastificación se encuentra a la temperatura deseada se debe ajustar la tolva de alimentación en el cilindro y agregar la cantidad de termoplástico a fundir en función del peso de la pieza a moldear. Tras agregar el material, retirar la tolva y esperar 20 minutos para que el material se funda completamente en el cilindro de plastificación. Los pequeños filamentos que escurren por la boquilla deben ser retirados con una espátula.

- La tolva de alimentación se debe ajustar solamente cuando se vaya a agregar el material a plastificar, ya que al ser de acero absorbe rápidamente el calor del cilindro de plastificación.
- Mientras el material se funde en el cilindro, se debe poner a calentar el molde en un horno a 240 °C por unos 20 minutos.
- Cuando pase el tiempo establecido, se debe abrir la prensa plana, y luego, se debe retirar el molde del horno con guantes para trabajos a alta temperatura y fijarlo en la prensa alineándolo con la boquilla de inyección. La boquilla de alimentación debe estar perfectamente alineada con el bebedero del molde, de no ser así se generarían derrames de material.
- Luego, se debe accionar hacia la derecha la palanca de la válvula de control de flujo de aire lo que hará que el émbolo baje a la presión y velocidad de inyección previamente establecidas. La presión se debe mantener por al menos unos 30 segundos. A continuación, se debe retraer el émbolo de inyección moviendo lentamente hacia la izquierda la palanca de la válvula de control de flujo de aire, permitiendo que el exceso de aire salga por los filtros de esta.
- Tras esperar 1 minuto desde el proceso de inyección, se debe abrir la prensa plana y retirar el molde con guantes para trabajos a alta temperatura, sumergirlo en agua y esperar hasta que se enfríe. Tras esto, se debe abrir el molde y retirar la pieza moldeada con una espátula.
- Una vez realizado todo el proceso de inyección en el molde, se debe seguir accionando el cilindro neumático hasta que salga todo material remanente.
- Cuando no se vaya a utilizar más la máquina, se debe limpiar con una espátula el émbolo mientras esté en caliente. Además, se debe cerrar la llave de bola cortando el flujo de aire comprimido al sistema. Finalmente, se debe apagar el circuito eléctrico pulsando el interruptor basculante y desconectando la caja de conexiones de la toma de corriente.

## ANEXO B: Selección de pernos de fijación del cilindro neumático

Para fijar el cilindro neumático a la placa de fijación, se necesitan cuatro pernos M6 a los que se les realiza un análisis al estar sometidos a la carga máxima, para determinar el factor de seguridad de estos. El factor de seguridad se despeja de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A_t} = \frac{S_y}{n_s} \quad (32)$$

Donde:

$\sigma$  = Esfuerzo máximo soportado.

F = Fuerza máxima actuando sobre cada perno.

$A_t$  = Área de la sección transversal del perno.

$S_y$  = Esfuerzo de fluencia del material del perno.

$n_s$  = Factor de seguridad.

Al haber cuatro de estos pernos completamente iguales, se realizó el cálculo para uno solo de ellos. Donde la fuerza máxima que actúa en cada perno es equivalente a la cuarta parte de la fuerza máxima ejercida por el cilindro neumático, la cual equivale a 160,86 N. Así, reemplazando datos se despeja el factor de seguridad:

$$A_t = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} = 28,27 \text{ mm}^2$$

$$n_s = \frac{S_y \cdot A_t}{F} = \frac{460 \cdot 28,27}{160,86} = 80,84$$

Por lo tanto, se puede confirmar que los pernos son aptos para usar en el ajuste del cilindro neumático a su respectiva placa de fijación. Además, como la placa tiene un espesor de 10 mm, la longitud del perno debe ser de 20 mm. En la Figura B.1 se muestran los pernos seleccionados para ajustar el cilindro neumático con una llave Allen de 6 mm.



**Figura B.1: Pernos de fijación del cilindro neumático.**

## ANEXO C: Cálculo de las tolerancias entre agujeros y columnas

Para calcular las tolerancias entre agujeros y columnas, se utiliza la norma de límites y ajustes especificada en Shigley [13], donde las letras mayúsculas siempre se refieren al agujero y las minúsculas se usan para el eje. Además, se deben conocer el tamaño básico al cual se asignan límites o desviaciones y es el mismo para ambos elementos del ajuste, y el tipo de ajuste entre estos elementos, al cual se le designa un símbolo, como se observa en la Tabla C.1.

**Tabla C.1: Ajustes recomendables mediante el sistema del agujero base. (Fuente [13])**

| Tipo de ajuste | Descripción  | Símbolo |
|----------------|--|---------|
| Holgura        | <i>Ajuste suelto en operación:</i> para tolerancias comerciales amplias o márgenes en elementos externos   | H11/c11 |
|                | <i>Ajuste libre en operación:</i> no se debe emplear cuando la exactitud es esencial, pero resulta adecuado para grandes variaciones de temperatura, altas velocidades de operación o grandes presiones en el cojinete | H9/d9   |
|                | <i>Ajuste estrecho en operación:</i> para operación en máquinas de precisión y para la ubicación exacta a velocidades y presiones moderadas en el cojinete   | H8/f7   |
|                | <i>Ajuste deslizante:</i> donde las partes no se van a operar libremente, pero se deben mover y girar con libertad y tener una ubicación precisa   | H7/g6   |
|                | <i>Ajuste de holgura localizada:</i> proporciona un ajuste firme para la ubicación de partes estacionarias, pero se puede ensamblar y desensamblar libremente  | H7/h6   |
| Transición     | <i>Ajuste de transición localizada:</i> para ubicación precisa; un parámetro intermedio entre holgura e interferencia  | H7/k6   |
|                | <i>Ajuste de transición localizada:</i> para una ubicación más precisa, donde es permisible una mayor interferencia  | H7/n6   |

Así, para agujeros se tiene que :

$$D_{\text{máx}} = D + \Delta D \quad (33)$$

$$D_{\text{min}} = D \quad (34)$$

Y para ejes con ajustes de holgura c, d, f, g y h, se tiene que:

$$d_{\text{máx}} = d + \delta_F \quad (35)$$

$$d_{\text{min}} = d + \delta_F - \Delta d \quad (36)$$

Donde:

D = Tamaño básico del agujero.

d = Tamaño básico del eje.

$\delta_F$  = Desviación fundamental.

$\Delta D$  = Grado de tolerancia del agujero.

$\Delta d$  = Grado de tolerancia del eje.

El grado de tolerancia se determina a partir de la Tabla C.2, en función del símbolo del tipo de ajuste y el tamaño básico tanto del agujero como del eje.

**Tabla C.2: Grados de tolerancia internacionales: serie métrica. (Fuente [13])**

| Tamaños básicos | Grados de tolerancia |       |       |       |       |       |
|-----------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                 | IT6                  | IT7   | IT8   | IT9   | IT10  | IT11  |
| 0-3             | 0.006                | 0.010 | 0.014 | 0.025 | 0.040 | 0.060 |
| 3-6             | 0.008                | 0.012 | 0.018 | 0.030 | 0.048 | 0.075 |
| 6-10            | 0.009                | 0.015 | 0.022 | 0.036 | 0.058 | 0.090 |
| 10-18           | 0.011                | 0.018 | 0.027 | 0.043 | 0.070 | 0.110 |
| 18-30           | 0.013                | 0.021 | 0.033 | 0.052 | 0.084 | 0.130 |
| 30-50           | 0.016                | 0.025 | 0.039 | 0.062 | 0.100 | 0.160 |
| 50-80           | 0.019                | 0.030 | 0.046 | 0.074 | 0.120 | 0.190 |
| 80-120          | 0.022                | 0.035 | 0.054 | 0.087 | 0.140 | 0.220 |
| 120-180         | 0.025                | 0.040 | 0.063 | 0.100 | 0.160 | 0.250 |
| 180-250         | 0.029                | 0.046 | 0.072 | 0.115 | 0.185 | 0.290 |
| 250-315         | 0.032                | 0.052 | 0.081 | 0.130 | 0.210 | 0.320 |
| 315-400         | 0.036                | 0.057 | 0.089 | 0.140 | 0.230 | 0.360 |

De igual forma, la desviación fundamental del eje se determina a partir de la Tabla C.3, en función en función del símbolo del tipo de ajuste y el tamaño básico del eje.

**Tabla C.3: Desviaciones fundamentales de ejes: serie métrica. (Fuente [13])**

| Tamaños básicos | Letra de la desviación superior |        |        |        |   |
|-----------------|---------------------------------|--------|--------|--------|---|
|                 | c                               | d      | f      | g      | h |
| 0-3             | -0.060                          | -0.020 | -0.006 | -0.002 | 0 |
| 3-6             | -0.070                          | -0.030 | -0.010 | -0.004 | 0 |
| 6-10            | -0.080                          | -0.040 | -0.013 | -0.005 | 0 |
| 10-14           | -0.095                          | -0.050 | -0.016 | -0.006 | 0 |
| 14-18           | -0.095                          | -0.050 | -0.016 | -0.006 | 0 |
| 18-24           | -0.110                          | -0.065 | -0.020 | -0.007 | 0 |
| 24-30           | -0.110                          | -0.065 | -0.020 | -0.007 | 0 |

Así, para el ajuste en las cuatro columnas principales y la placa donde se fijará el cilindro neumático, decidió que tuvieran un ajuste con holgura localizada H7/h6, ya que, proporciona un ajuste firme para la ubicación de partes estacionarias, pero se puede ensamblar y desensamblar libremente. Así, sabiendo que el tamaño básico de los agujeros y las columnas es de 14 mm, y a partir de las Tablas C.2 y C.3, se tiene que:

Agujero: IT7 = 0,018

Columnas: IT6 = 0,011 y  $\delta_F = 0$

Por lo tanto, para los agujeros se tiene que:

$$D_{\text{máx}} = 14 + 0,018 = 14,018$$

$$D_{\text{mín}} = 14$$

Además, para las columnas se tiene que:

$$d_{\text{máx}} = 14$$

$$d_{\text{mín}} = 14 - 0,011 = 13,989$$

Por otro lado, para el ajuste entre las dos columnas que soportarán al cilindro de plastificación, y su respectiva placa, se decidió que tuvieran un ajuste deslizante H7/g6, ya que esto permitirá que la placa y el cilindro tengan una ubicación precisa y se deslicen con libertad cuando está actuando el cilindro neumático. Así sabiendo que el tamaño básico de los agujeros y las columnas es de 14 mm, y a partir de las Tablas C.2 y C.3, se tiene que:

Agujero: IT7 = 0,018

Columnas: IT6 = 0,011 y  $\delta_F = -0,006$

Por lo tanto, para los agujeros se tiene que:

$$D_{\text{máx}} = 14 + 0,018 = 14,018$$

$$D_{\text{mín}} = 14$$

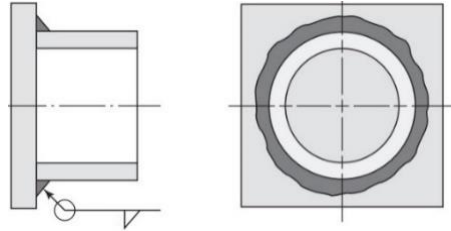
Además, para las columnas se tiene que:

$$d_{\text{máx}} = 14 - 0,006 = 13,994$$

$$d_{\text{mín}} = 14 - 0,006 - 0,011 = 13,983$$

## ANEXO D: Selección del electrodo a utilizar en las soldaduras

La soldadura de las columnas a las placas de fijación será a tope, de filete y circundante, como se observa en la Figura D.1.



**Figura D.1: Soldadura tipo filete circundante. (Fuente [13])**

Por lo tanto, estarán sometidas a esfuerzos de compresión donde el esfuerzo estará dado por la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{F}{h \cdot L} \quad (37)$$

Se realiza el análisis de la soldadura en los cordones circundantes que requerirá la máquina inyectora, los cuales son los que fijarán todas las columnas de soporte con la placa base del sistema, donde:

$F =$  Peso que soporta cada columna  $= P_{\text{estático}1} = 16,85 \text{ N}$

$L =$  Longitud de la soldadura circundante en las columnas de soporte  $= 60 \text{ mm}$ .

$h =$  Altura de la garganta  $= 5 \text{ mm}$ .

Así, reemplazando datos:

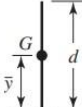
$$\sigma = \frac{16,85}{5 \cdot 60} = 0,0562 \text{ MPa} = 8,15 \text{ psi}$$

Por otro lado, el esfuerzo de flexión está dado por la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (38)$$

Donde  $A$  es el área de la garganta, la cual se calcula de acuerdo al tipo de soldadura empleada, como se observa en la Tabla D.1:

**Tabla D.1: Área de la garganta de acuerdo al tipo de soldadura. (Fuente [13])**

| Soldadura   | Área de la garganta | Ubicación de G                   | Segundo momento polar unitario del área |
|---|---------------------|----------------------------------|---|
|  | $A = 0.707 hd$      | $\bar{x} = 0$<br>$\bar{y} = d/2$ | $J_u = d^3/12$                          |

Así, reemplazando datos se tiene que:

$$\sigma = \frac{16,85}{0,707 \cdot 5 \cdot 60} = 0,0794 \text{ MPa}$$

Considerando los esfuerzos de compresión y flexión previamente calculados, se decide utilizar un electrodo E6011 ( $S_y = 62000 \text{ psi} = 427 \text{ MPa}$ ). Luego a partir del  $S_y$  del electrodo seleccionado, se calculan los esfuerzos permisibles a partir de la Tabla D.2.

**Tabla D.2: Esfuerzos permisibles del Código AISC para metal de aporte. (Fuente [13])**

| Tipo de carga     | Tipo de soldadura  | Esfuerzo permisible    | $n^*$     |
|-------------------|--------------------|------------------------|-----------|
| Tensión           | A tope             | $0.60S_y$              | 1.67      |
| Aplastamiento     | A tope             | $0.90S_y$              | 1.11      |
| Flexión           | A tope             | $0.60-0.66S_y$         | 1.52-1.67 |
| Compresión simple | A tope             | $0.60S_y$              | 1.67      |
| Cortante          | A tope o de filete | $0.30S_{ur}^{\dagger}$ |           |

Así, se tienen los siguientes esfuerzos permisibles:

**Tabla D.3: Esfuerzos permisibles para soldadura con electrodo E6011.**

| Tipo de carga     | Esfuerzo permisible (Mpa) |
|-------------------|---------------------------|
| Tensión           | 256,2                     |
| Aplastamiento     | 384,3                     |
| Flexión           | 269,01                    |
| Compresión simple | 256,2                     |
| Cortante          | 128,1                     |

Como los esfuerzos medidos se adecuan al electrodo E6011 escogido. Este tipo de electrodo se utilizará para soldar todas las piezas. Mediante soldadura de arco manual.

## ANEXO E: Selección de tuercas hexagonales para ajuste de placa

Se analizan las tuercas que irán en las columnas que sujetan el cilindro de plastificación, donde la fuerza que soportan corresponde a la mitad de la fuerza ejercida por el cilindro de inyección, ya que hay 2 columnas. Así, el esfuerzo de corte en una tuerca está dado por la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot t \cdot 0,75} \quad (39)$$

Donde:

F = Carga que soporta cada tuerca = 321,72 N.

d = diámetro de la rosca de la columna = 10 mm.

t = espesor de la tuerca = 10 mm.

Así, reemplazando datos en la ecuación (39) se tiene que:

$$\tau = \frac{321,72}{\pi \cdot 10 \cdot 10 \cdot 0,75} = 1,37 \text{ MPa}$$

Luego, considerando un estado de corte puro, la carga máxima está dado por:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad (40)$$

Así, reemplazando datos se tiene que:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{0^2 + 3 \cdot 1,37^2} = 2,37 \text{ MPa}$$

Luego, se aplica un análisis de vida infinita utilizando la fórmula de Goodman Modificada, considerando un acero AISI 1020 donde:

$$\sigma_a = \sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{2} = \frac{2,37}{2} = 1,19 \text{ MPa}$$

**Tabla E.1: Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga de cada tuerca hexagonal.**

| $S_{ut}$ | $k_a$ | $k_b$ | $k_c$ | $k_d$ | $k_e$ | $k_f$ | $S'_e$ |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 470      | 0,88  | 1     | 0,85  | 1     | 1     | 1     | 235    |

Así, reemplazando datos se tiene que:

$$S_e = 0,88 \cdot 1 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 235 = 175,78 \text{ MPa}$$

Reemplazando datos en la ecuación de Goodman modificada:

$$\frac{1,19}{175,78} + \frac{1,19}{470} = \frac{1}{n_s}$$

Se despeja un factor de seguridad de  $n_s$  de 108 con lo cual se asegura que el material seleccionado resistirá. Por lo tanto, se utilizarán tuercas hexagonales con rosca M14 x 1,5 y 10 mm de espesor para el apriete de todas las columnas con su correspondiente placa fijación. En la Figura E.1 se muestran las tuercas hexagonales compradas para ajustar la placa a las columnas.



**Figura E.1: Tuercas hexagonales para ajuste de placa superior a columnas.**

## ANEXO F: Selección de pernos de fijación de la prensa plana

Para fijar el cilindro neumático a la placa de fijación, se necesitan cuatro pernos M12 a los que se les realiza un análisis al estar sometidos a la carga máxima, para determinar el factor de seguridad de estos. Por otro lado, al haber cuatro de estos pernos completamente iguales, se realizó el cálculo para uno solo de ellos. Donde la fuerza máxima que actúa en cada perno es equivalente a la cuarta parte de la fuerza máxima ejercida por el cilindro neumático, la cual equivale a 160,86 N. Así, reemplazando datos se despeja el factor de seguridad de la ecuación (32):

$$A_t = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 12^2}{4} = 113,1 \text{ mm}^2$$

$$n_s = \frac{S_y \cdot A_t}{F} = \frac{460 \cdot 113,1}{160,86} = 323$$

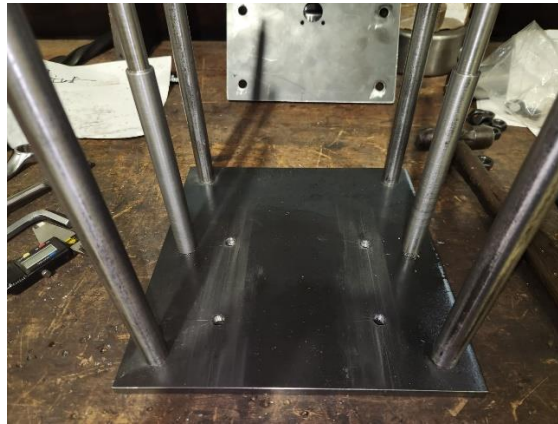
Por lo tanto, se puede confirmar que los pernos son aptos para usar en el ajuste de la prensa plana a la placa base. Además, como la placa tiene un espesor de 10 mm, la longitud del perno debe ser de 20 mm. En la Figura F.1 se muestran los pernos con golilla seleccionados para fijar la prensa plana con una llave Allen de 10 mm.



**Figura F.1: Pernos con golilla para fijación de la prensa plana.**

## ANEXO G: Ensamblaje de la estructura base la maquina inyectora

Para el montaje de la estructura base de la máquina inyectora, el primer paso fue soldar todas las columnas de soporte a la placa base. A continuación, se ajustaron los 2 resortes de compresión previamente seleccionados a las 2 columnas centrales, como se observa en la Figura G.1.



**Figura G.1: Fijación de columnas a placa base y ajuste de resortes de compresión.**

Luego, se procede a roscar la boquilla de inyección a la parte inferior del cilindro de plastificación hasta quedar bien ajustadas para evitar filtraciones de material plastificado en las roscas de ambos elementos durante el proceso de inyección. A continuación, se rosca la parte superior del cilindro de plastificación a su respectiva placa de fijación, como se observa en la Figura G.2.



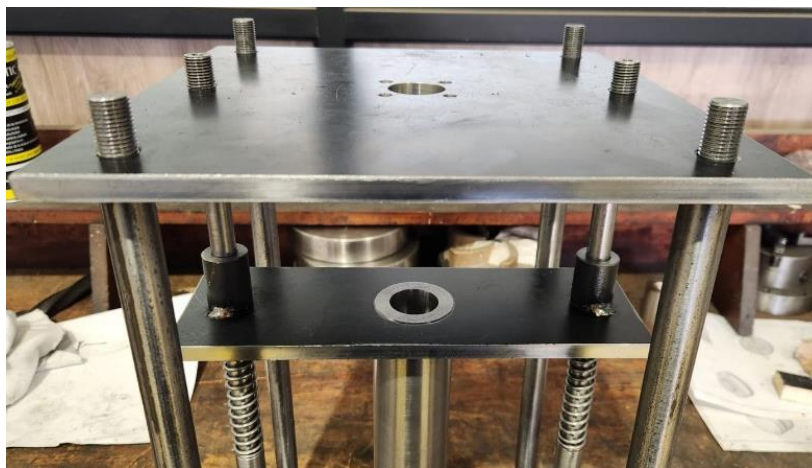
**Figura G.2: Ensamblaje de boquilla de inyección, cilindro de plastificación, y placa de fijación.**

A continuación, se ajusta el ensamblaje de la placa con el cilindro de plastificación sobre los resortes de compresión, como se observa en la Figura G.3.



**Figura G.3: Ajuste del ensamblaje de la placa con el cilindro de plastificación sobre los resortes de compresión.**

Finalmente, se ajusta la placa superior donde se fijará el cilindro de plastificación, la caja de conexiones eléctricas, y el soporte para la válvula de control de flujo de aire, como se observa en la Figura G.4.



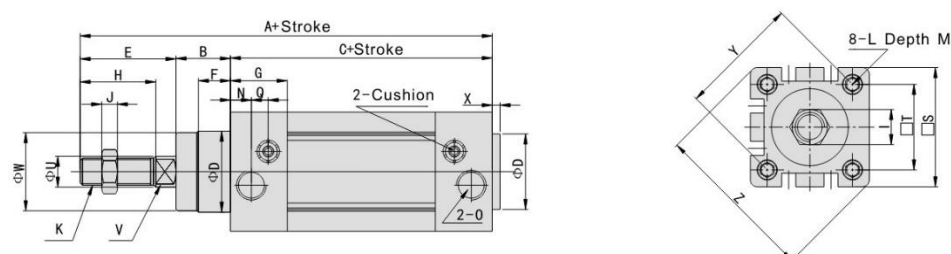
**Figura G.4: Ajuste de la placa superior para fijación del cilindro neumático.**

## ANEXO H: Tablas y figuras

**Tabla H.1: Resistencias determinísticas mínimas a la tensión y a la fluencia ASTM de algunos aceros laminados en caliente (HR) y estirados en frío (CD). (Fuente [12])**


| 1        | 2                    | 3                  | 4  | 5   | 6                          | 7                       | 8                 |
|----------|----------------------|--------------------|--|---|----------------------------|-------------------------|-------------------|
| UNS núm. | SAE y/o<br>AISI núm. | Proce-<br>samiento | Resistencia<br>a la tensión,<br>MPa (kpsi) | Resistencia<br>a la fluencia,<br>MPa (kpsi) | Elongación<br>en 2 pulg. % | Reducción en<br>área, % | Dureza<br>Brinell |
| G10060   | 1006                 | HR                 | 300 (43)                                   | 170 (24)                                    | 30                         | 55                      | 86                |
|          |                      | CD                 | 330 (48)                                   | 280 (41)                                    | 20                         | 45                      | 95                |
| G10100   | 1010                 | HR                 | 320 (47)                                   | 180 (26)                                    | 28                         | 50                      | 95                |
|          |                      | CD                 | 370 (53)                                   | 300 (44)                                    | 20                         | 40                      | 105               |
| G10150   | 1015                 | HR                 | 340 (50)                                   | 190 (27.5)                                  | 28                         | 50                      | 101               |
|          |                      | CD                 | 390 (56)                                   | 320 (47)                                    | 18                         | 40                      | 111               |
| G10180   | 1018                 | HR                 | 400 (58)                                   | 220 (32)                                    | 25                         | 50                      | 116               |
|          |                      | CD                 | 440 (64)                                   | 370 (54)                                    | 15                         | 40                      | 126               |
| G10200   | 1020                 | HR                 | 380 (55)                                   | 210 (30)                                    | 25                         | 50                      | 111               |
|          |                      | CD                 | 470 (68)                                   | 390 (57)                                    | 15                         | 40                      | 131               |
| G10300   | 1030                 | HR                 | 470 (68)                                   | 260 (37.5)                                  | 20                         | 42                      | 137               |
|          |                      | CD                 | 520 (76)                                   | 440 (64)                                    | 12                         | 35                      | 149               |
| G10350   | 1035                 | HR                 | 500 (72)                                   | 270 (39.5)                                  | 18                         | 40                      | 143               |
|          |                      | CD                 | 550 (80)                                   | 460 (67)                                    | 12                         | 35                      | 163               |
| G10400   | 1040                 | HR                 | 520 (76)                                   | 290 (42)                                    | 18                         | 40                      | 149               |
|          |                      | CD                 | 590 (85)                                   | 490 (71)                                    | 12                         | 35                      | 170               |
| G10450   | 1045                 | HR                 | 570 (82)                                   | 310 (45)                                    | 16                         | 40                      | 163               |
|          |                      | CD                 | 630 (91)                                   | 530 (77)                                    | 12                         | 35                      | 179               |
| G10500   | 1050                 | HR                 | 620 (90)                                   | 340 (49.5)                                  | 15                         | 35                      | 179               |
|          |                      | CD                 | 690 (100)                                  | 580 (84)                                    | 10                         | 30                      | 197               |
| G10600   | 1060                 | HR                 | 680 (98)                                   | 370 (54)                                    | 12                         | 30                      | 201               |
| G10800   | 1080                 | HR                 | 770 (112)                                  | 420 (61.5)                                  | 10                         | 25                      | 229               |
| G10950   | 1095                 | HR                 | 830 (120)                                  | 460 (66)                                    | 10                         | 25                      | 248               |

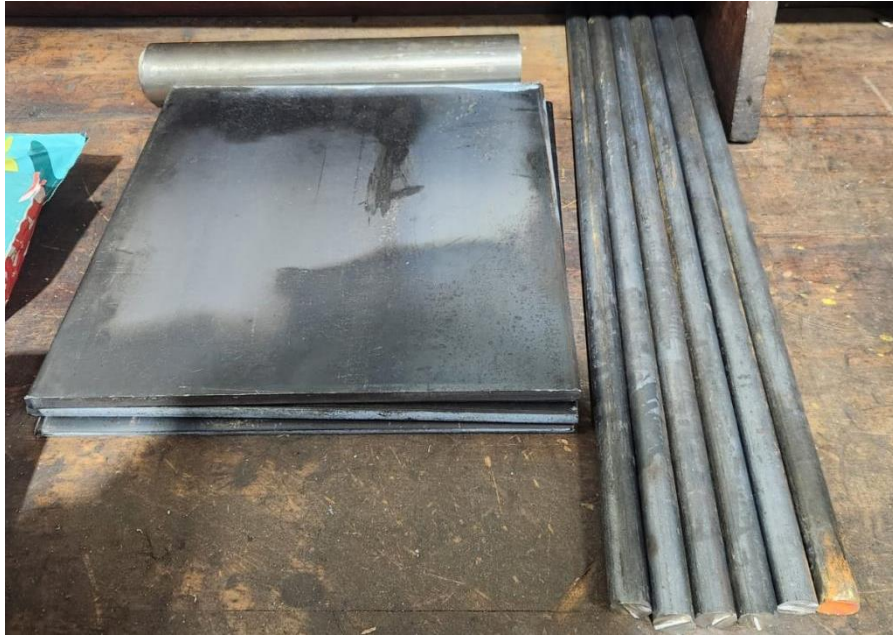
**Tabla H.2: Dimensiones del cilindro neumático seleccionado.**



| Bore | Sign | A   | A1  | A2  | B  | C   | D  | E  | F    | G    | H  | I  | J  | K        |
|------|------|-----|-----|-----|----|-----|----|----|------|------|----|----|----|----------|
| 32   |      | 142 | 190 | 185 | 16 | 94  | 30 | 32 | 10   | 25   | 22 | 17 | 6  | M10X1.25 |
| 40   |      | 159 | 213 | 207 | 20 | 105 | 35 | 34 | 10   | 29.5 | 24 | 17 | 7  | M12X1.25 |
| 50   |      | 175 | 244 | 233 | 27 | 106 | 40 | 42 | 10   | 32   | 32 | 23 | 8  | M16X1.5  |
| 63   |      | 190 | 258 | 247 | 26 | 122 | 45 | 42 | 10   | 36   | 32 | 23 | 8  | M16X1.5  |
| 80   |      | 214 | 301 | 288 | 35 | 127 | 45 | 52 | 10   | 37   | 40 | 26 | 10 | M20X1.5  |
| 100  |      | 229 | 321 | 308 | 40 | 137 | 55 | 52 | 10   | 39   | 40 | 26 | 10 | M20X1.5  |
| 125  |      | 279 | 352 | -   | 46 | 160 | 60 | 73 | 20.5 | 44.7 | 54 | -  | -  | M27X2    |

Tabla H.3: Instrucciones de uso del controlador de temperatura REX-C100.

| Symbol | Name   | Setting range   | Description  | Factory set value  |
|--------|--|---|--|--|
| CT     | Current transformer (CT) input value monitor     | 0.0 to 100.0 A<br>[Display only]  | Display input value from the current transformer. [Displayed only when the instrument has the heater break alarm (HBA)]  |  |
| AL1    | Alarm 1 set value (ALM1)                         | TC/RTD inputs:<br>Deviation alarm, Process alarm:<br>-1999 to +9999 °C [°F] or<br>-199.9 to +999.9 °C [°F]<br><br>Voltage/Current inputs:<br>Deviation alarm: -199.9 to +200.0 %<br>Process alarm: -199.9 to +300.0 % | Set the alarm 1 set value and alarm 2 set value.<br> For the alarm action type, refer to page 7.<br><br>Alarm differential gap:<br>TC/RTD inputs: 2 or 2.0 °C [°F]<br>Voltage/Current inputs: 0.2 % of input span | TC/RTD inputs:<br>50 (50.0)<br><br>Voltage/Current inputs: 5.0                           |
| AL2    | Alarm 2 set value (ALM2)                         |   |  |  |
| HBA    | Heater break alarm (HBA) set value <sup>1</sup>  | 0.0 to 100.0 A  | Alarm value is set by referring to input value from the current transformer (CT). Used only for single-phase.  | 0.0  |
| LBA    | Control loop break alarm (LBA) time <sup>2</sup> | 0.1 to 200.0 minutes  | Set control loop break alarm (LBA) set value.  | 8.0  |
| Lbd    | LBA deadband <sup>3</sup>                        | TC/RTD inputs:<br>0 to 9999 °C [°F]<br>Voltage/Current inputs:<br>0 to 100 % of input span  | Set the area of not outputting LBA. No LBA deadband functions with 0 set.<br>Differential gap :<br>TC/RTD inputs: 0.8 °C [°F]<br>Voltage/Current inputs: 0.8 % of input span   | 0  |
| ATV    | Autotuning (AT)                                  | 0: AT end or cancel<br>1: AT start or execution   | Turns the autotuning ON/OFF.   | 0  |
| P      | Proportional band                                | TC/RTD inputs:<br>1 (0.1) to span<br>0.1 °C [°F] resolution:<br>Within 999.9 °C [°F]<br>Voltage/Current inputs:<br>0.1 to 100.0 % of input span<br>0 (0.0): ON/OFF action   | Set when PI, PD or PID control is performed. Heat/Cool PID action: Proportional band setting on the heat-side.<br><br>ON/OFF action differential gap:<br>TC/RTD inputs: 2 (0.2) °C [°F]<br>Voltage/Current inputs: 0.2 % of input span   | TC/RTD inputs:<br>30 (30.0)<br><br>Voltage/Current inputs: 3.0                           |
| I      | Integral time                                    | 1 to 3600 seconds<br>(0 second: PD action)  | Set the time of integral action to eliminate the offset occurring in proportional control.   | 240  |
| d      | Derivative time                                  | 1 to 3600 seconds<br>(0 second: PI action)  | Set the time of derivative action to improve control stability by preparing for output changes.  | 60   |
| AR     | Anti-reset windup (ARW)                          | 1 to 100 % of heat-side proportional band (0 %: Integral action OFF)  | Overshooting and undershooting are restricted by the integral effect.  | 100  |
| r      | Heat-side proportioning cycle                    | 1 to 100 seconds<br>(Not displayed if the control output is current output.)  | Set control output cycle.<br>Heat/Cool PID action:<br>Heat-side proportioning cycle  | Relay contact output: 20<br>Voltage pulse output/<br>Trigger output for triac driving: 2 |
| Pc     | Cool-side proportional band                      | 1 to 1000 % of heat-side proportional band  | Set cool-side proportional band when Heat/Cool PID action.   | 100  |
| db     | Deadband   | TC/RTD inputs:<br>-10 to +10 °C [°F] or<br>-10.0 to +10.0 °C [°F]<br>Voltage/Current inputs:<br>-10.0 to +10.0 % of input span  | Set control action deadband between heat-side and cool-side proportional bands. Minus (-) setting results in overlap.  | 0 or 0.0   |
| t      | Cool-side proportioning cycle                    | 1 to 100 seconds<br>(Not displayed if the control output is current output.)  | Set control cool-side output cycle for Heat/Cool PID action.   | Relay contact output: 20<br>Voltage pulse output: 2                                      |
| LCK    | Set data lock (LCK)                              | 0100: No set data locked (All parameters changeable)<br>0101: Set data locked (All parameters locked)<br>0110: Only the set value (SV) is changeable with the set data locked   | Performs set data change enable/disable.   | 0100   |



**Figura H.1: Materiales comprados para fabricar la estructura de la máquina inyectora.**



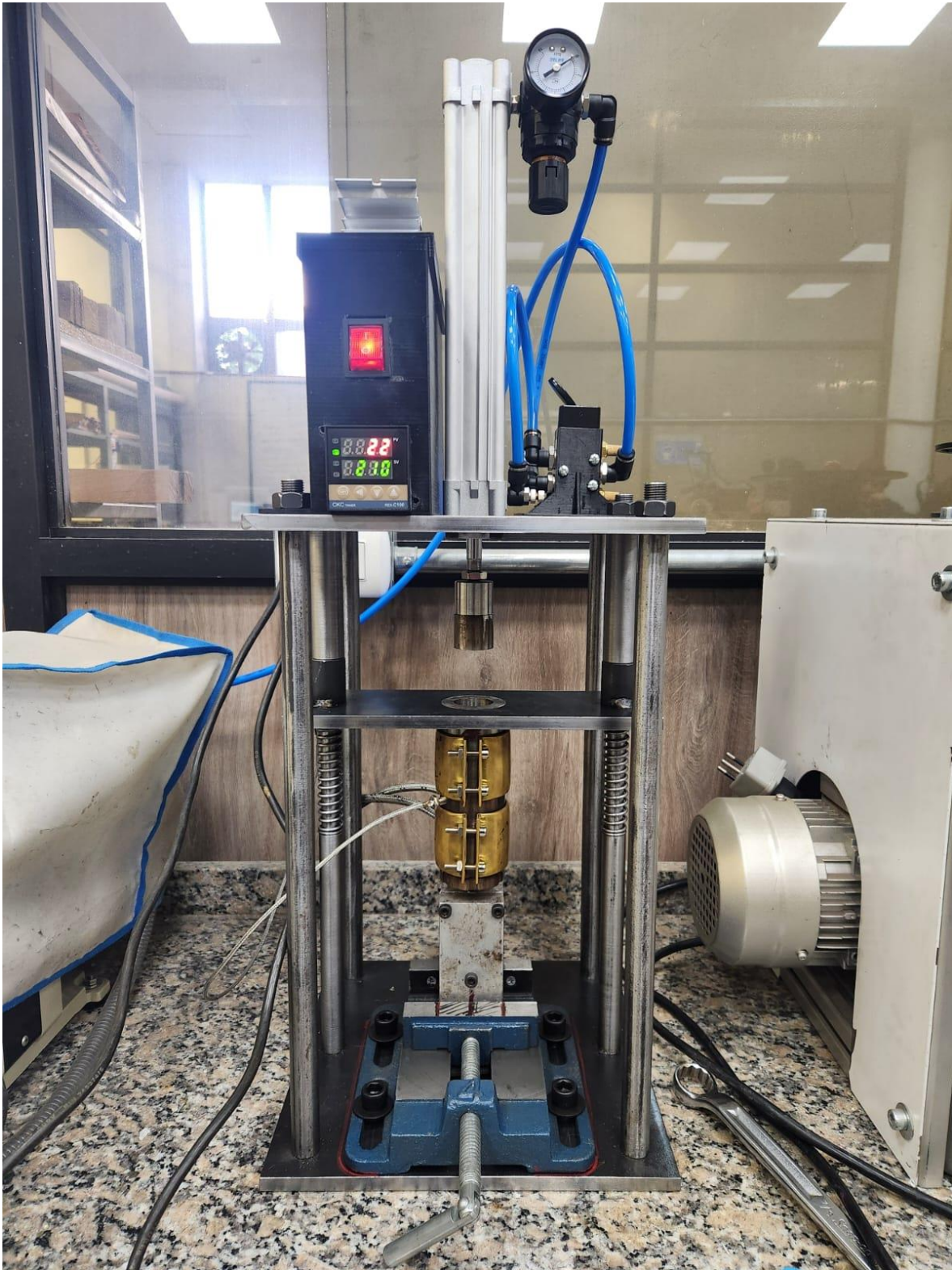
**Figura H.2: Calefactores de boquilla comprados, para el sistema térmico de la máquina inyectora.**



**Figura H.3: Prensa plana comprada, para el sistema de cierre de la máquina inyectora.**



**Figura H.4: Instalación de caja de conexiones eléctricas y soporte con válvula de control de flujo de aire.**



**Figura H.5: Máquina inyectora de plástico con compresión neumática fabricada.**

8 7 6 5 4 3 2 1

D

D

C

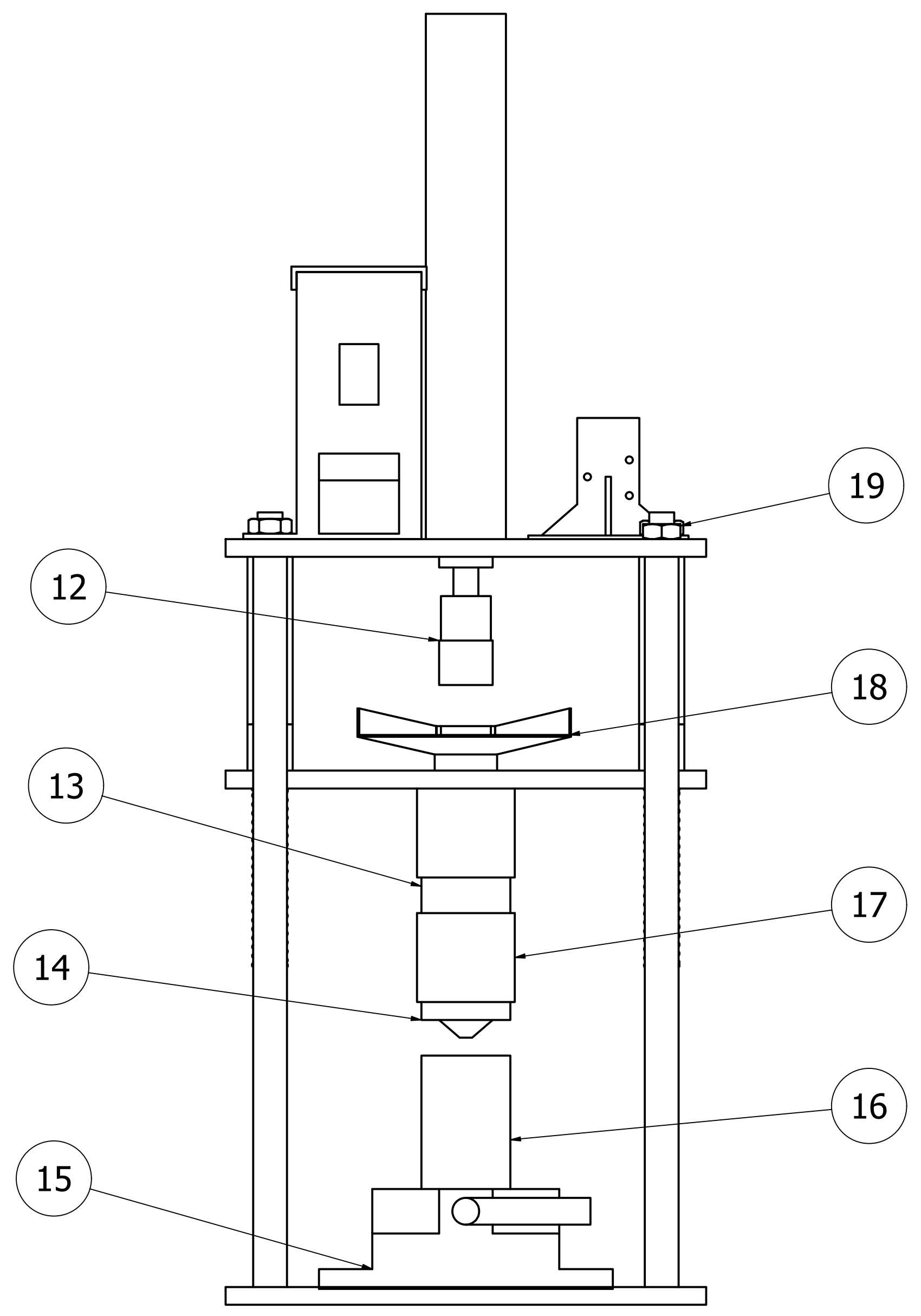
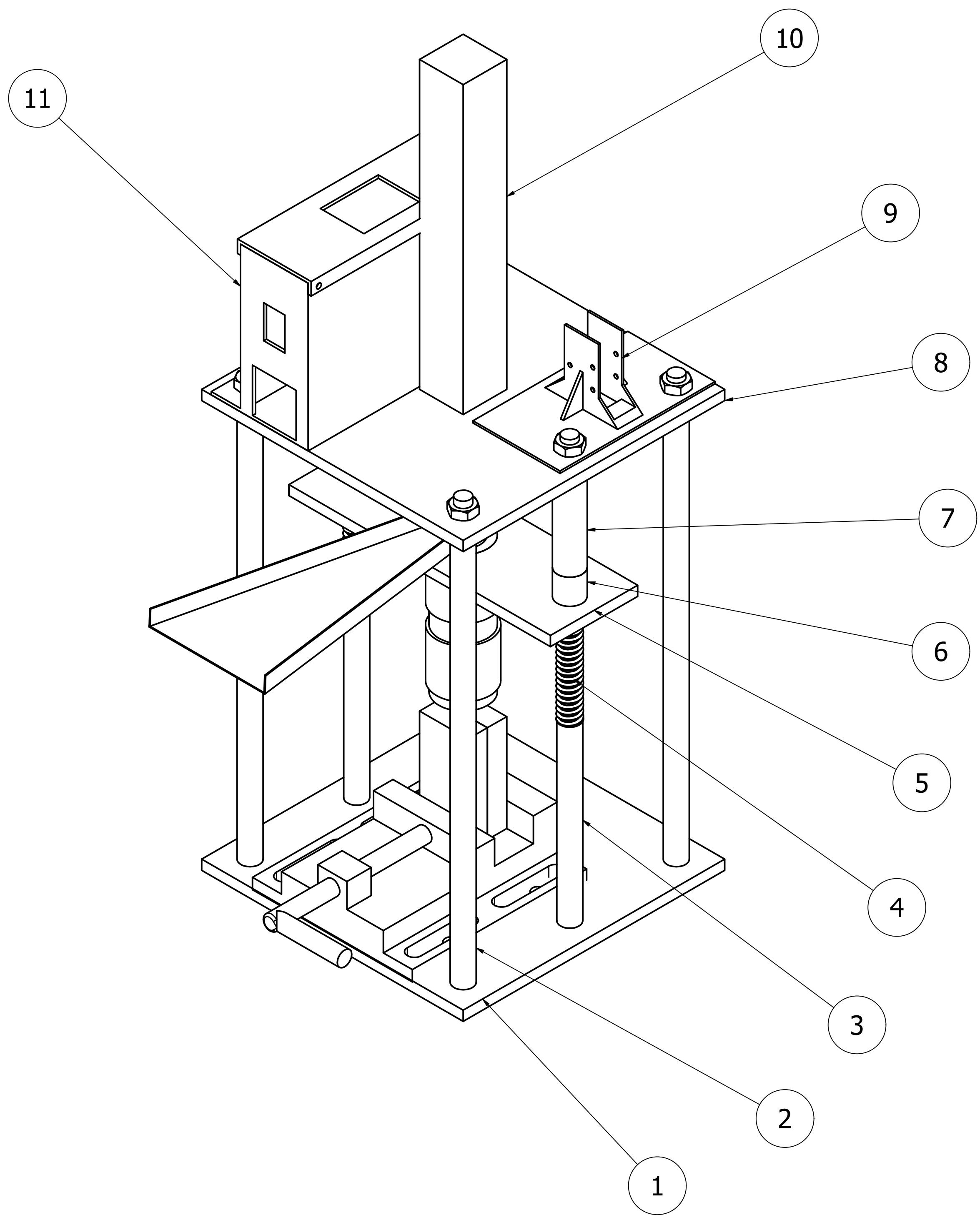
C

B

B

A

A

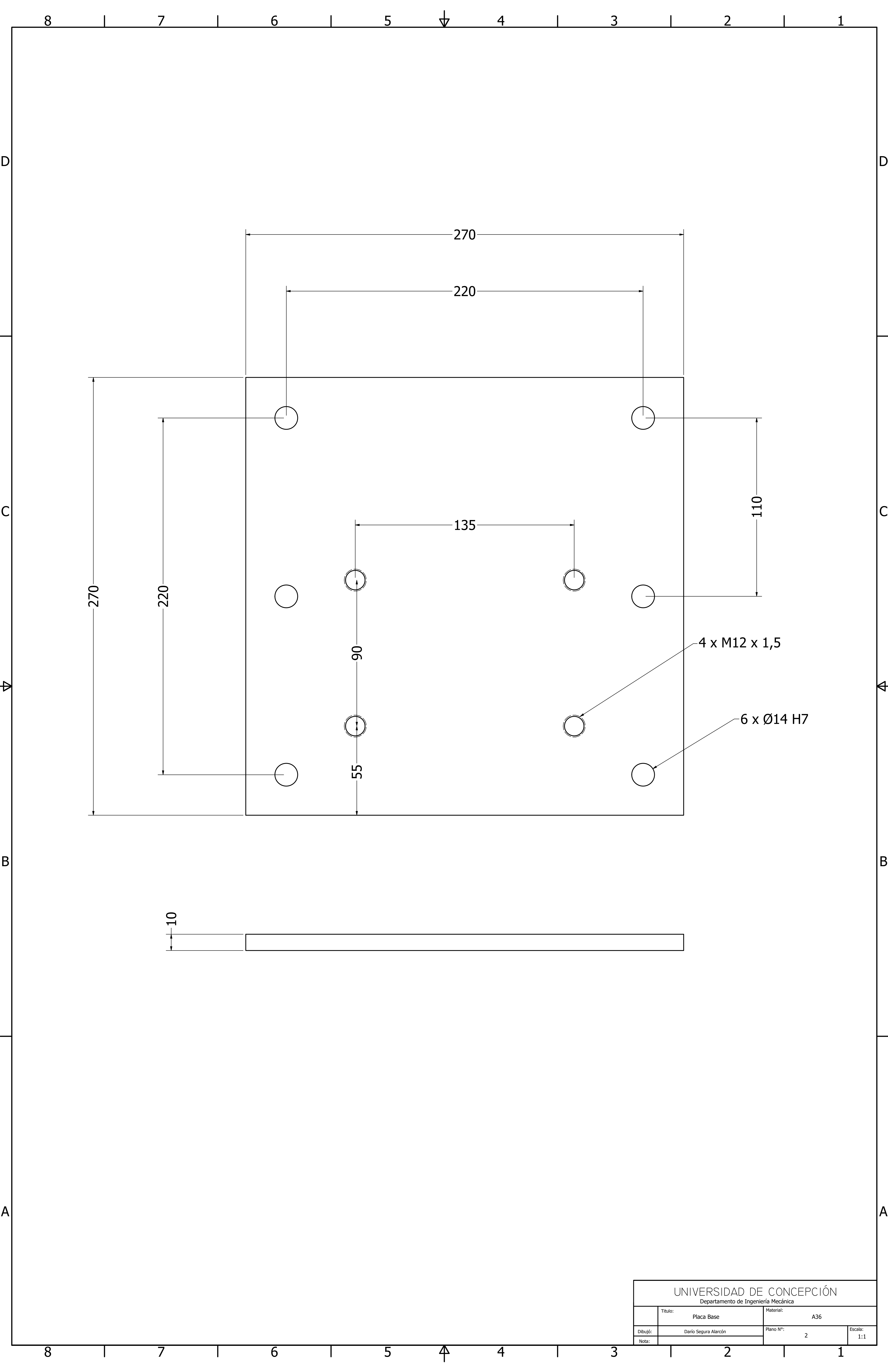


| Lista de Piezas |      |  |
|-----------------|------|--|
| N°              | Cant | Pieza  |
| 1               | 1    | Placa base                                       |
| 2               | 4    | Columna principal                                |
| 3               | 2    | Columna soporte del cilindro de plastificación   |
| 4               | 2    | Resorte de compresión                            |
| 5               | 1    | Placa de fijación del cilindro de plastificación |
| 6               | 2    | Buje guía  |
| 7               | 2    | Buje libre                                       |
| 8               | 1    | Placa de fijación del cilindro neumático         |
| 9               | 1    | Soporte válvula controladora de flujo de aire    |
| 10              | 1    | Cilindro neumático                               |
| 11              | 1    | Caja de conexiones eléctricas                    |
| 12              | 1    | Émbolo de inyección                              |
| 13              | 1    | Cilindro de plastificación                       |
| 14              | 1    | Boquilla de inyección                            |
| 15              | 1    | Prensa plana                                     |
| 16              | 1    | Molde  |
| 17              | 2    | Calefactor de boquilla                           |
| 18              | 1    | Tolva de alimentación                            |
| 19              | 6    | Tuerca hexagonal                                 |

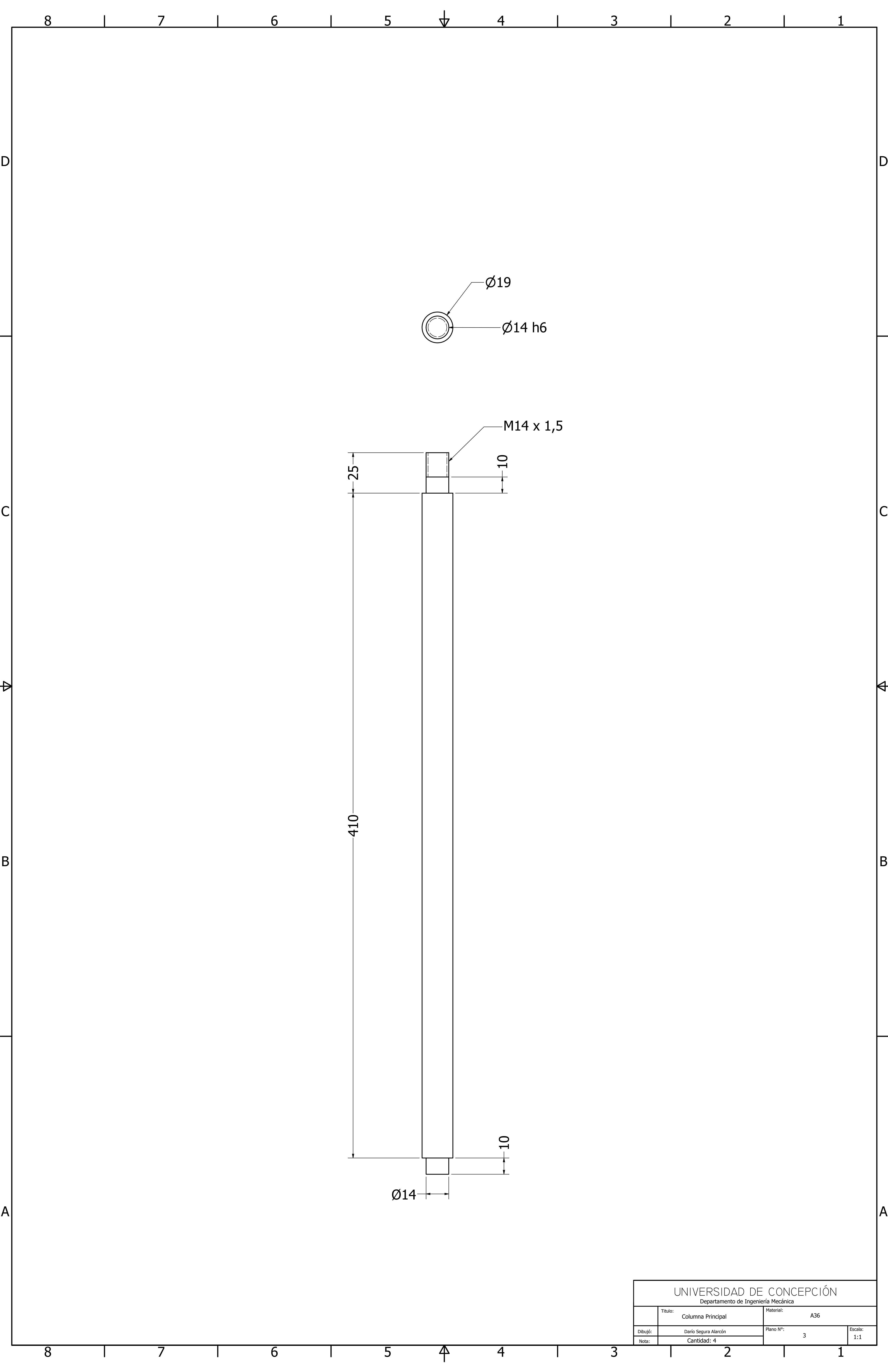
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
Departamento de Ingeniería Mecánica

|   |                |
|---|----------------|
| Título:<br>Máquina inyectora de plástico con compresión neumática | Material:      |
| Dibujó:<br>Darío Segura Alarcón                                   | Plano N°:<br>1 |
| Nota:<br>Se omiten mangueras y cables                             | Escala:        |

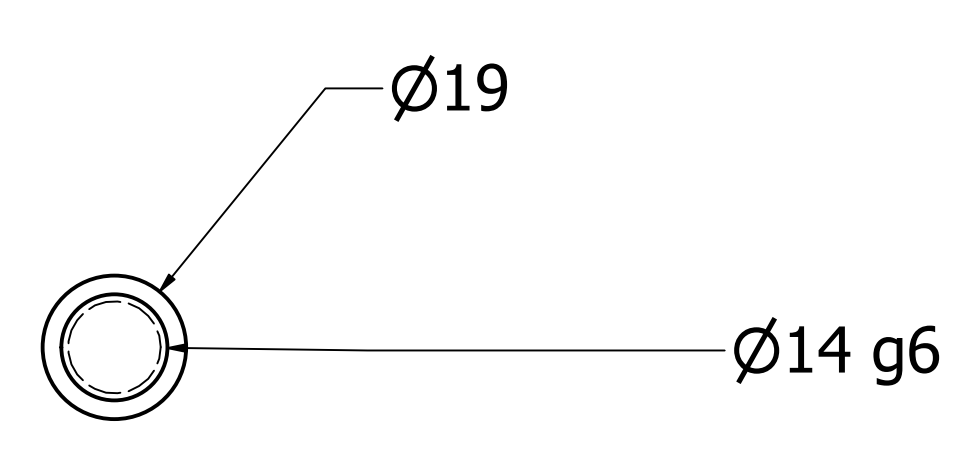
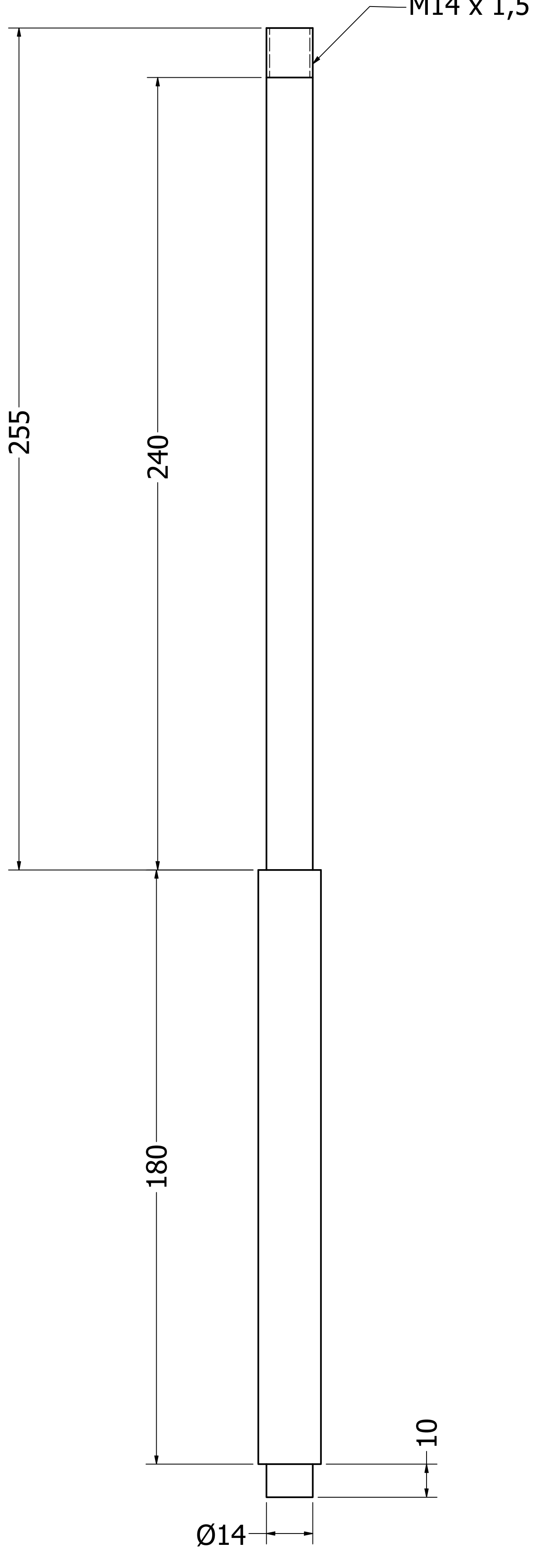
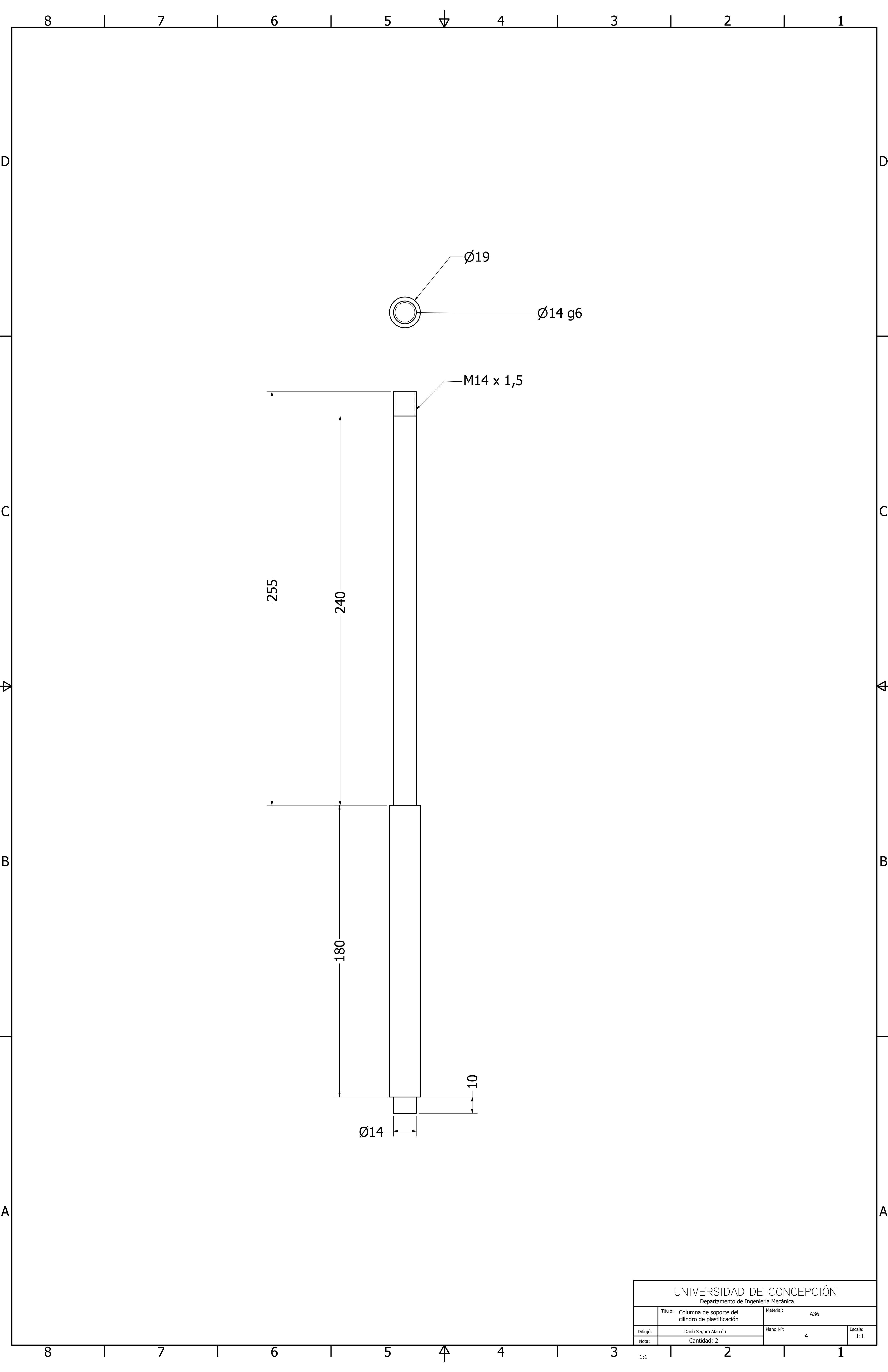
8 7 6 5 4 3 2 1



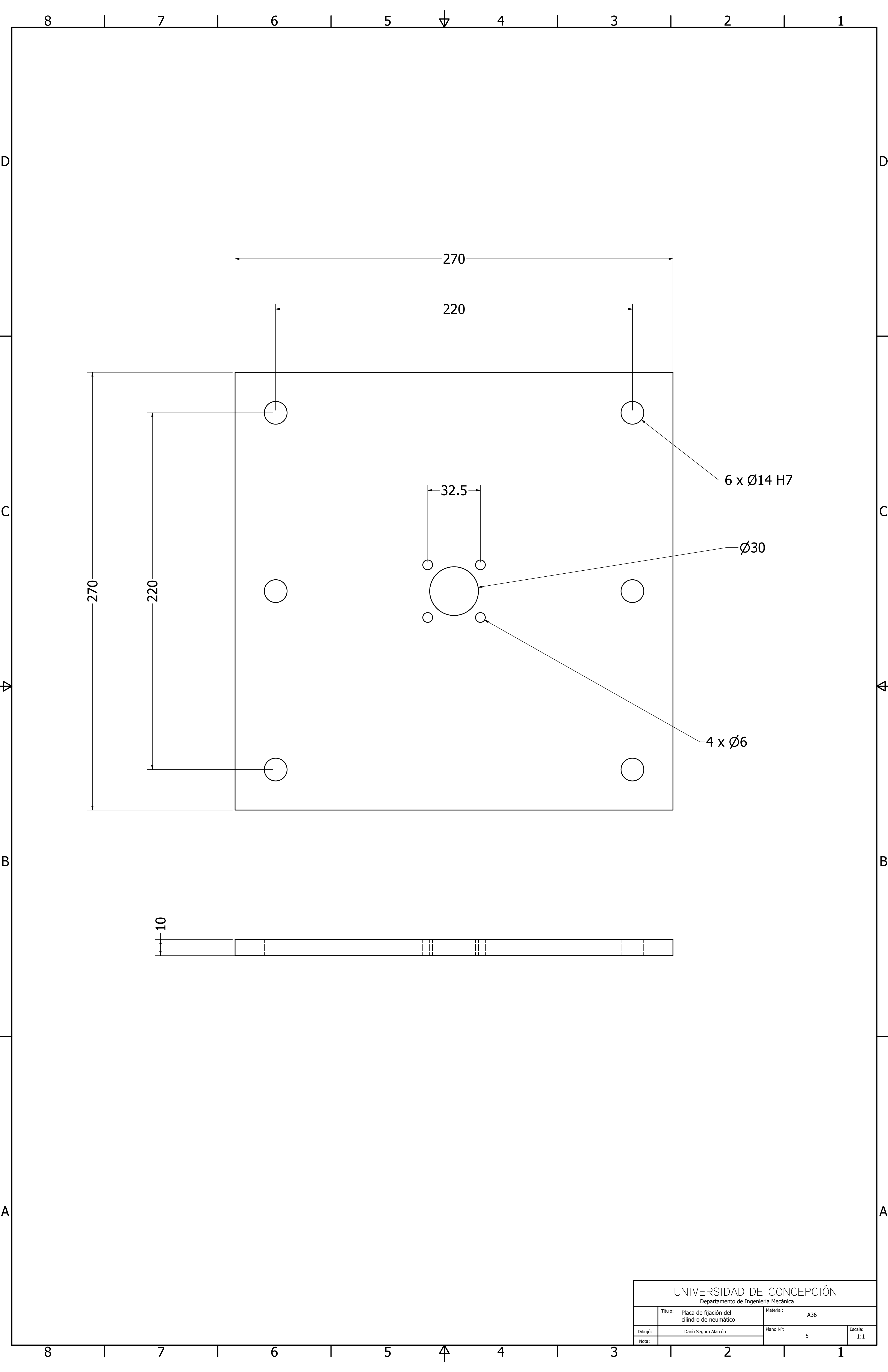
|                                     |                      |           |     |
|-------------------------------------|----------------------|-----------|-----|
| UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN           |                      |           |     |
| Departamento de Ingeniería Mecánica |                      |           |     |
| Título:                             | Placa Base           | Material: | A36 |
| Dibujó:                             | Darío Segura Alarcón | Plano N°: | 2   |
| Nota:                               |                      | Escala:   | 1:1 |



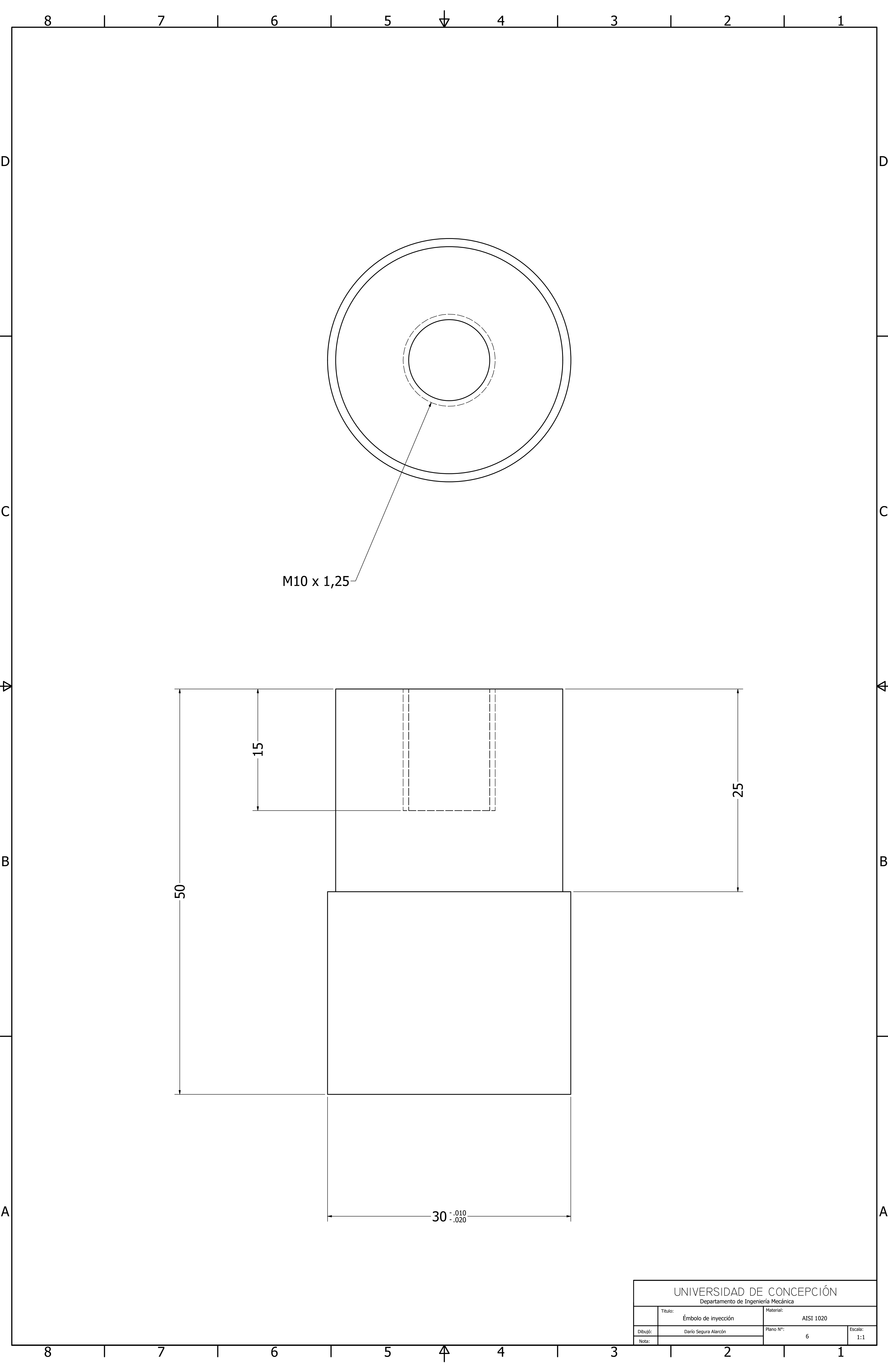
|                                     |                      |           |     |
|-------------------------------------|----------------------|-----------|-----|
| UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN           |                      |           |     |
| Departamento de Ingeniería Mecánica |                      |           |     |
| Título:                             | Columna Principal    | Material: | A36 |
| Dibujó:                             | Darío Segura Alarcón | Plano Nº: | 3   |
| Nota:                               | Cantidad: 4          | Escala:   | 1:1 |



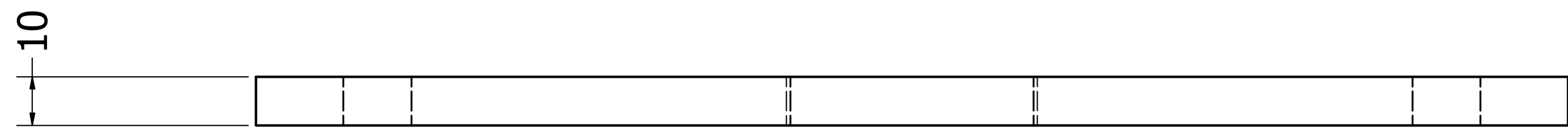
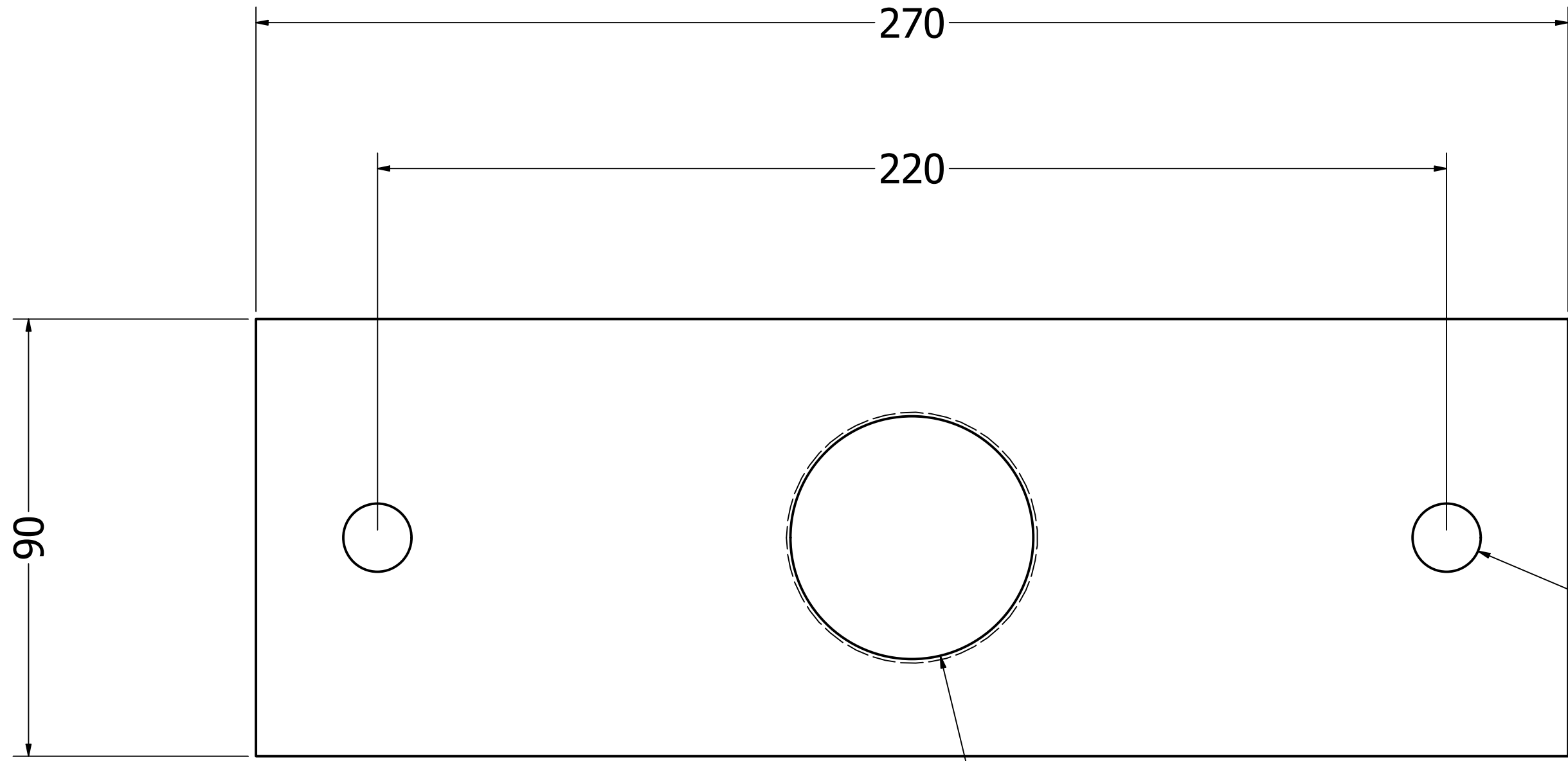
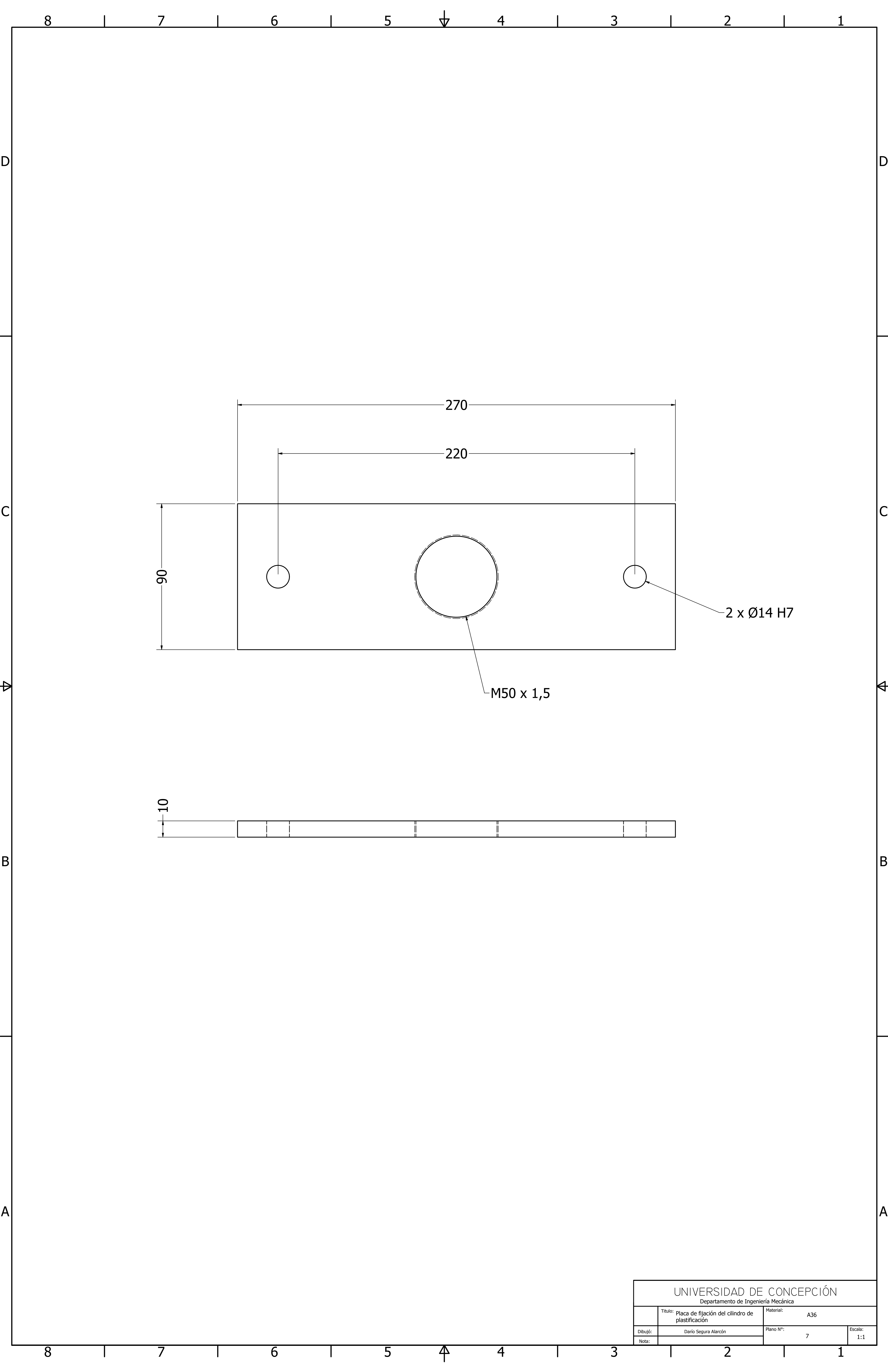
|                                     |   |           |     |
|-------------------------------------|---|-----------|-----|
| UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN           |   |           |     |
| Departamento de Ingeniería Mecánica |   |           |     |
| Título:                             | Columna de soporte del cilindro de plastificación | Material: | A36 |
| Dibujó:                             | Darío Segura Alarcón                              | Plano N°: | 4   |
| Nota:                               | Cantidad: 2                                       | Escala:   | 1:1 |



|                                     |   |               |             |
|-------------------------------------|---|---------------|-------------|
| UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN           |   |               |             |
| Departamento de Ingeniería Mecánica |   |               |             |
|                                     | Título: Placa de fijación del cilindro de neumático | Material: A36 |             |
|                                     | Dibujó: Darío Segura Alarcón                        | Plano N°: 5   | Escala: 1:1 |
|                                     | Nota:   |               |             |



|                                     |                      |           |           |
|-------------------------------------|----------------------|-----------|-----------|
| UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN           |                      |           |           |
| Departamento de Ingeniería Mecánica |                      |           |           |
| Título:                             | Émbolo de inyección  | Material: | AISI 1020 |
| Dibujó:                             | Darío Segura Alarcón | Plano N°: | 6         |
| Nota:                               |                      | Escala:   | 1:1       |



2 x Ø14 H7

M50 x 1,5

|                                     |  |           |             |
|-------------------------------------|--|-----------|-------------|
| UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN           |  |           |             |
| Departamento de Ingeniería Mecánica |  |           |             |
| Título:                             | Placa de fijación del cilindro de plastificación | Material: | A36         |
| Dibujó:                             | Darío Segura Alarcón                             | Plano N°: | 7           |
| Nota:                               |  |           | Escala: 1:1 |

8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1

D

D

C

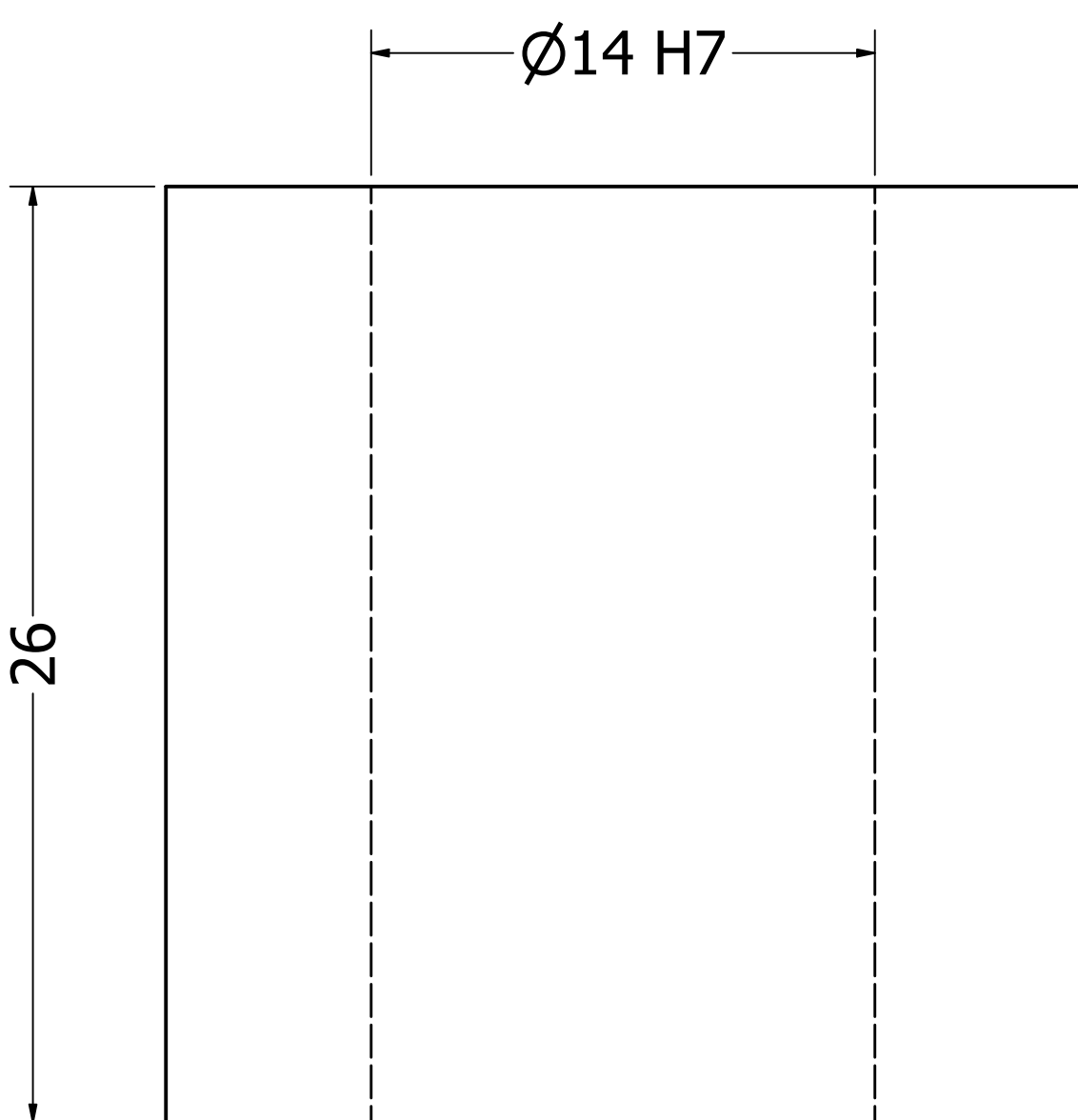
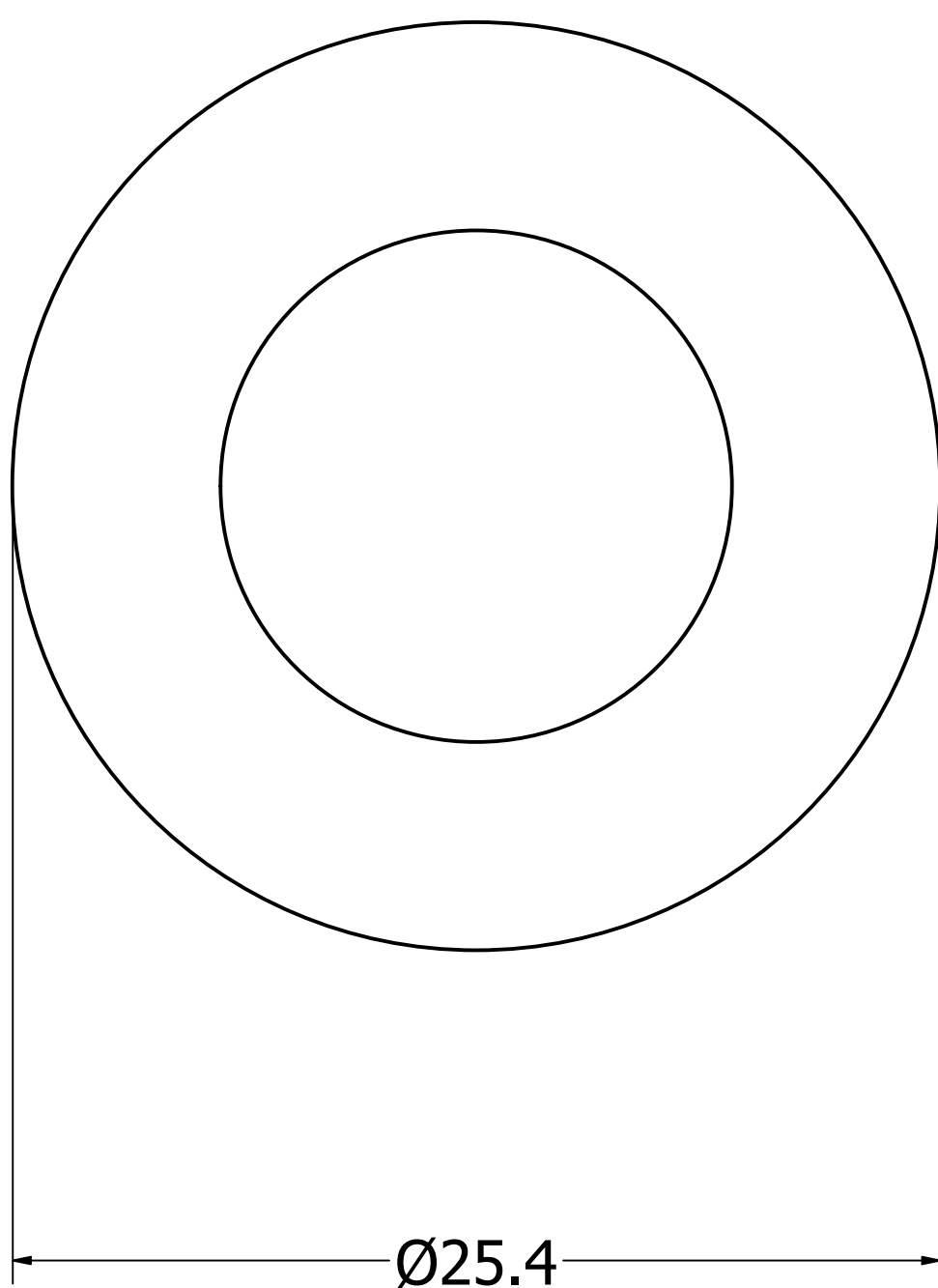
C

B

B

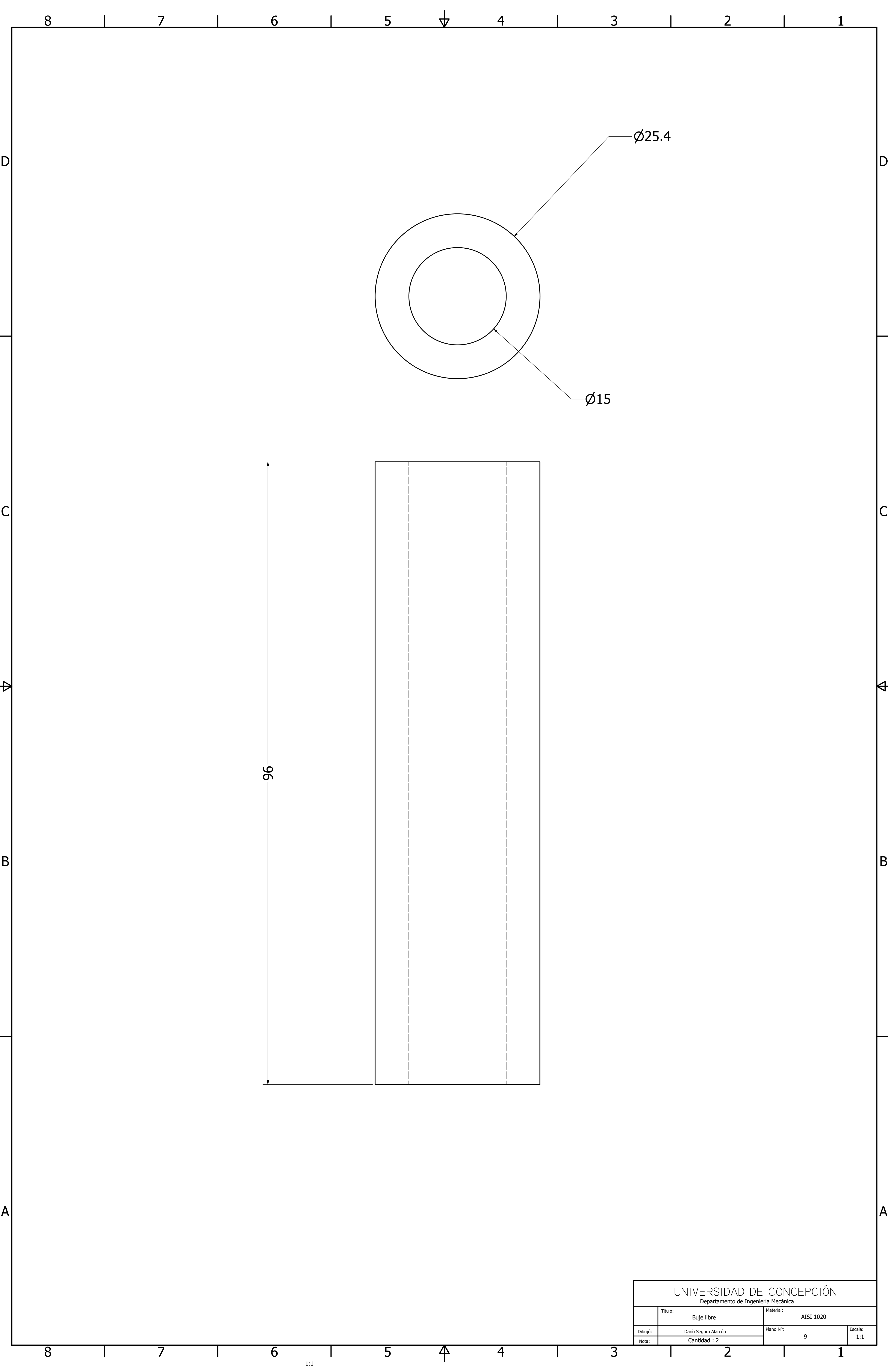
A

A



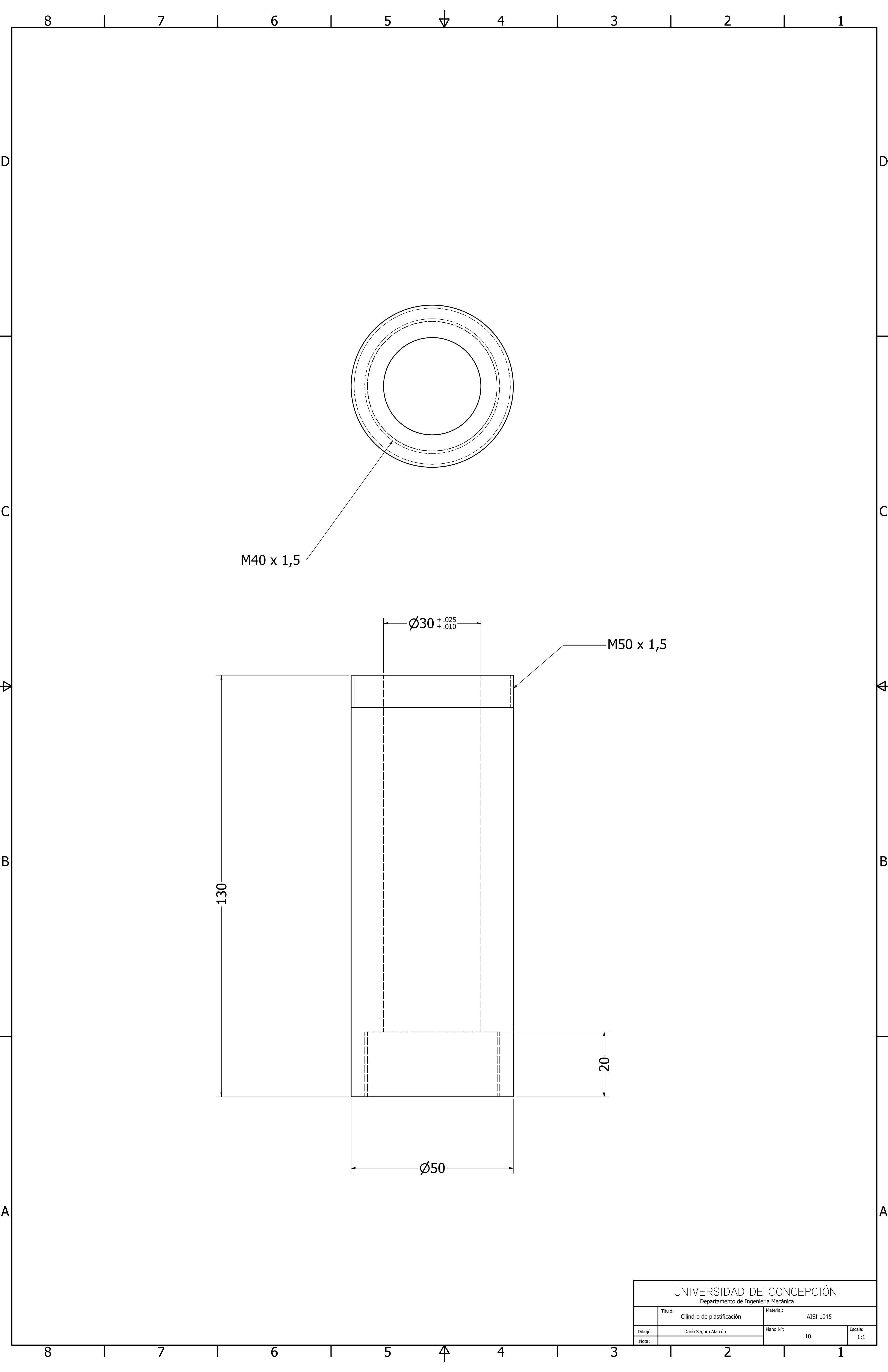
|                                     |                      |           |           |
|-------------------------------------|----------------------|-----------|-----------|
| UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN           |                      |           |           |
| Departamento de Ingeniería Mecánica |                      |           |           |
| Título:                             | Buje guía            | Material: | AlSi 1020 |
| Dibujó:                             | Darío Segura Alarcón | Plano N°: | 8         |
| Nota:                               | Cantidad: 2          | Escala:   | 1:1       |

8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1



|                                     |                      |           |             |
|-------------------------------------|----------------------|-----------|-------------|
| UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN           |                      |           |             |
| Departamento de Ingeniería Mecánica |                      |           |             |
| Título:                             | Buje libre           | Material: | AISI 1020   |
| Dibujó:                             | Darío Segura Alarcón | Plano N°: | 9           |
| Nota:                               | Cantidad : 2         |           | Escala: 1:1 |

1:1



M40 x 1,5

$\varnothing 30^{+0.025}_{+0.010}$

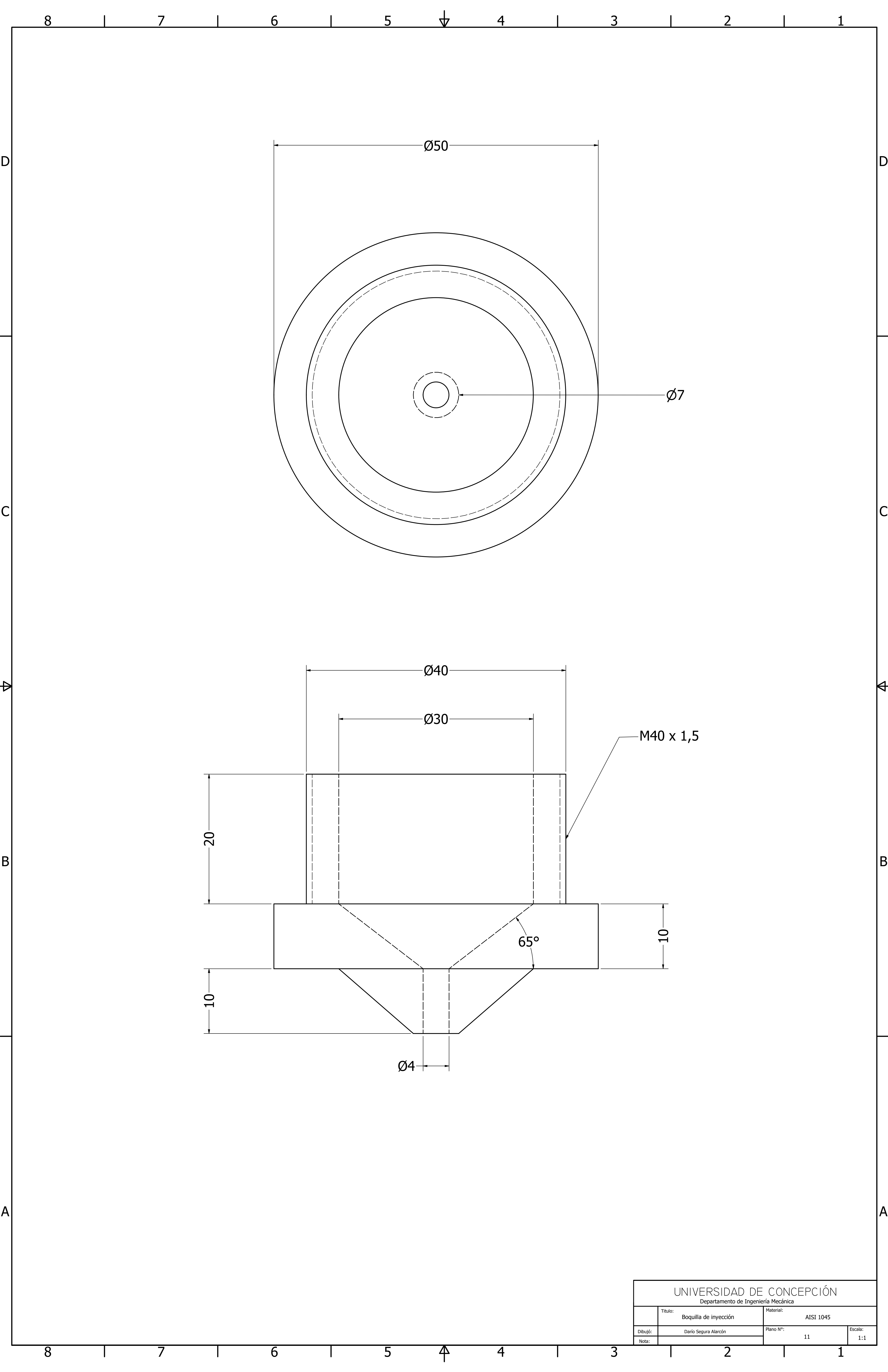
M50 x 1,5

130

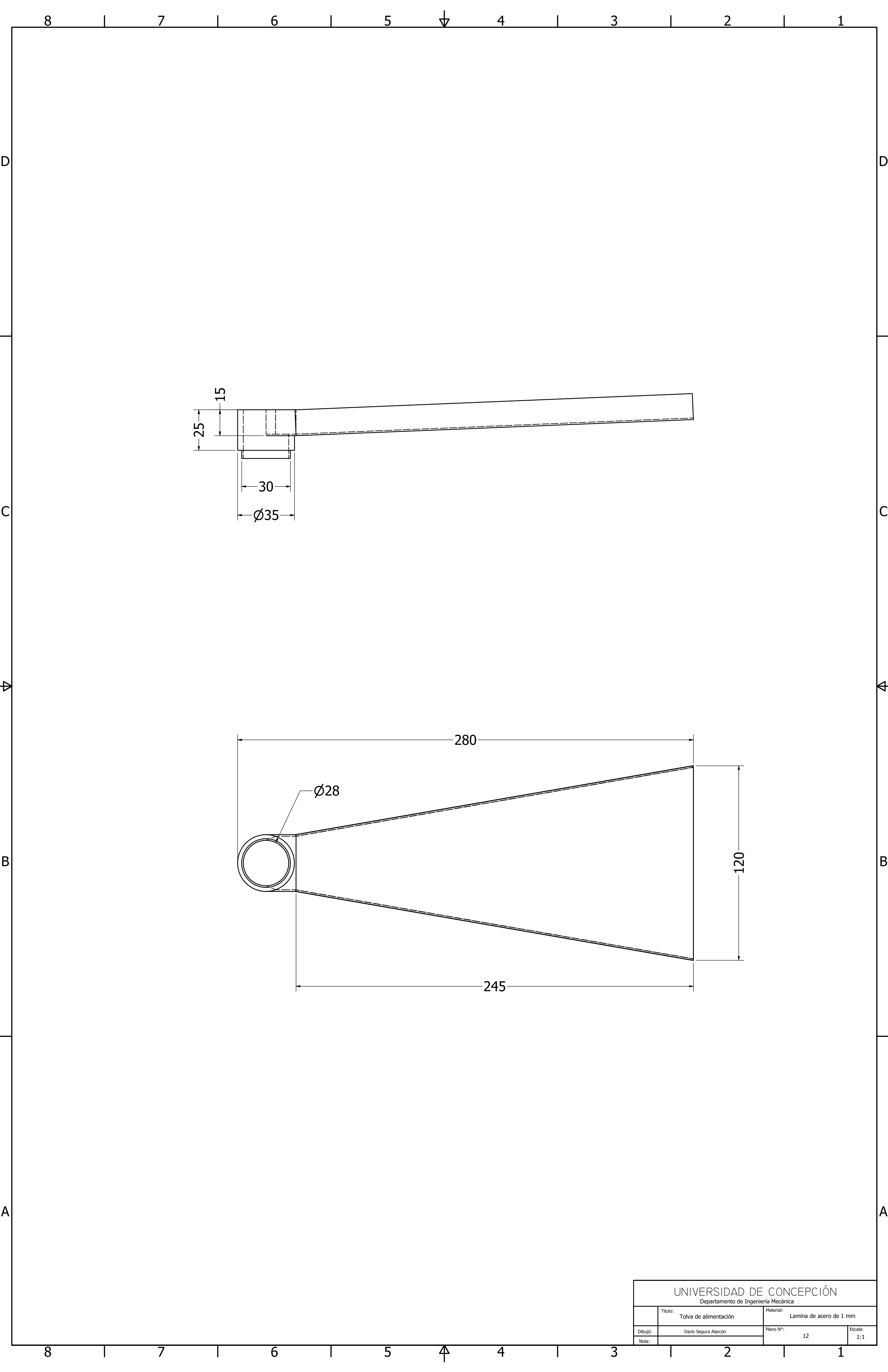
20

$\varnothing 50$

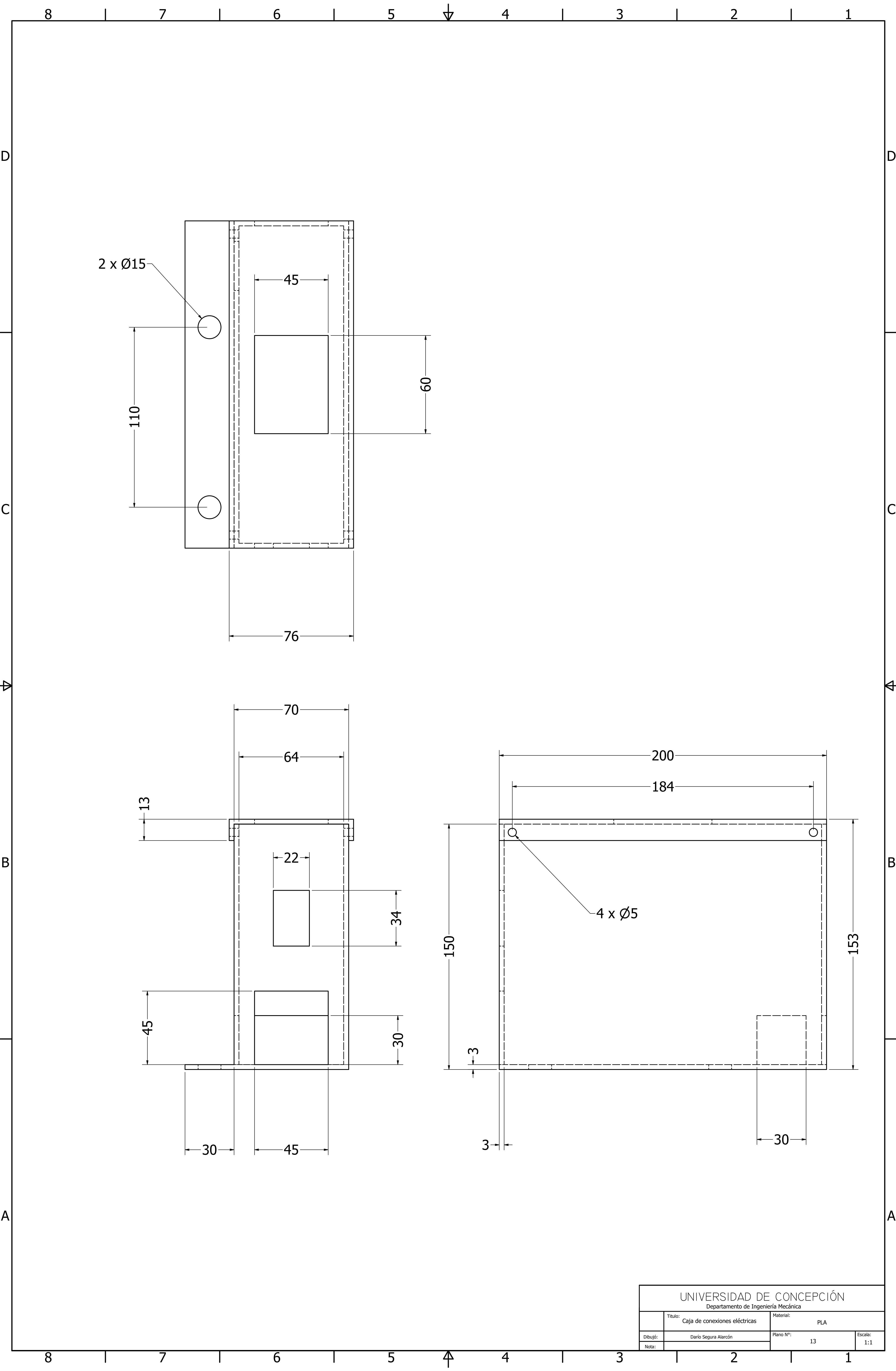
|                                     |                            |           |           |
|-------------------------------------|----------------------------|-----------|-----------|
| UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN           |                            |           |           |
| Departamento de Ingeniería Mecánica |                            |           |           |
| Título:                             | Cilindro de plastificación | Material: | AISI 1045 |
| Dibujó:                             | Darío Segura Alarcón       | Plano N°: | 10        |
| Nota:                               |                            | Escala:   | 1:1       |



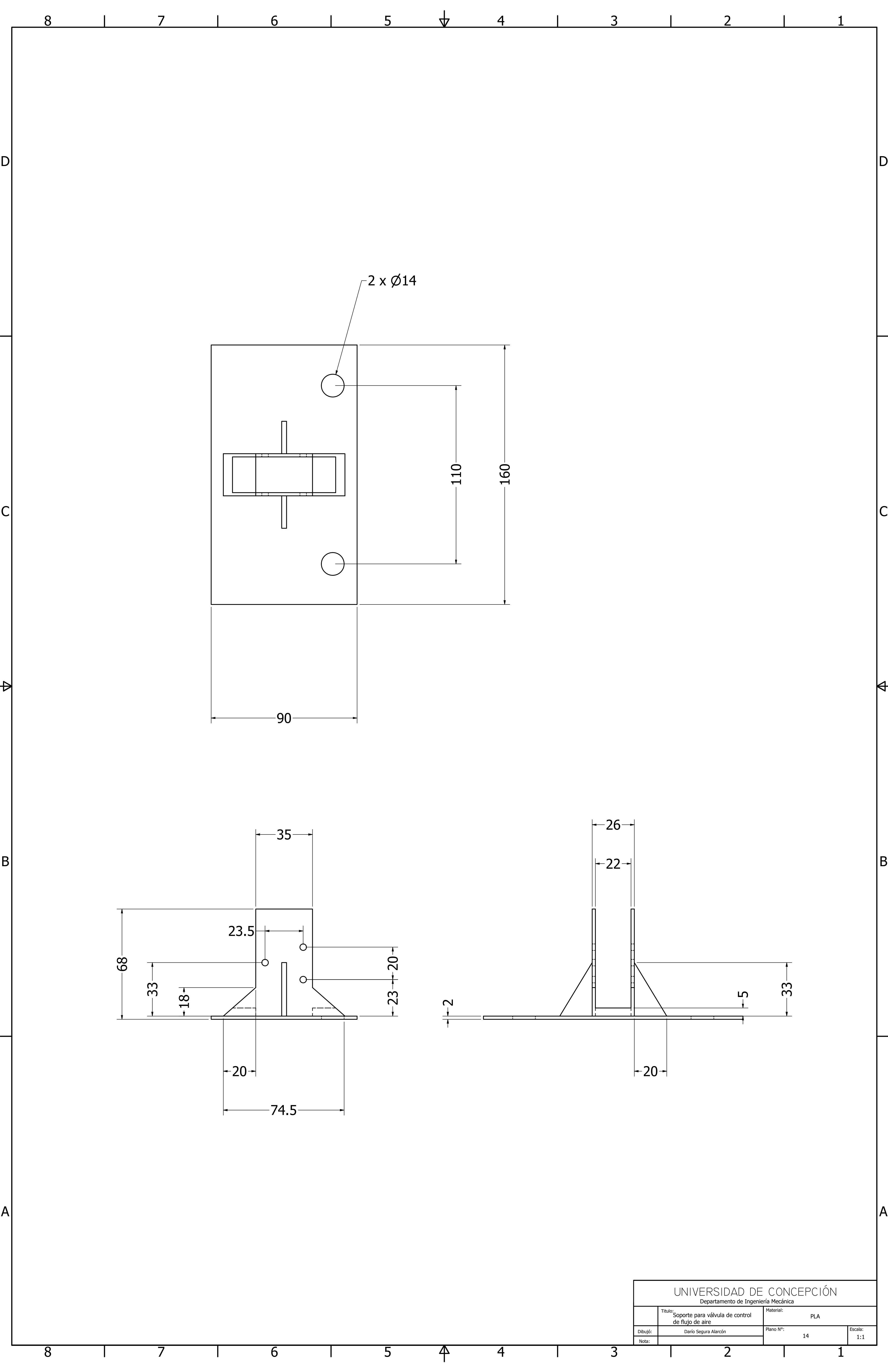
|                                     |                       |           |           |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------|-----------|
| UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN           |                       |           |           |
| Departamento de Ingeniería Mecánica |                       |           |           |
| Título:                             | Boquilla de inyección | Material: | AISI 1045 |
| Dibujó:                             | Darío Segura Alarcón  | Plano N°: | 11        |
| Nota:                               |                       | Escala:   | 1:1       |



|                                     |                       |           |                         |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------|-------------------------|
| UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN           |                       |           |                         |
| Departamento de Ingeniería Mecánica |                       |           |                         |
| Título:                             | Tolva de alimentación | Material: | Lamina de acero de 1 mm |
| Dibujó:                             | Darío Segura Alarcón  | Plano N°: | 12                      |
| Nota:                               |                       |           | Escala: 1:1             |



|                                     |  |                  |     |
|-------------------------------------|--|------------------|-----|
| UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN           |  |                  |     |
| Departamento de Ingeniería Mecánica |  |                  |     |
|                                     | Título:<br>Caja de conexiones eléctricas | Material:<br>PLA |     |
| Dibujó:                             | Darío Segura Alarcón                     | Plano N°:        | 13  |
| Nota:                               |  | Escala:          | 1:1 |



|                                     |  |           |     |
|-------------------------------------|--|-----------|-----|
| UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN           |  |           |     |
| Departamento de Ingeniería Mecánica |  |           |     |
| Título:                             | Soporte para válvula de control de flujo de aire | Material: | PLA |
| Dibujó:                             | Darío Segura Alarcón                             | Plano N°: | 14  |
| Nota:                               |  | Escala:   | 1:1 |