

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Diseño e impresión 3D de un tren de laminación para prácticas de laboratorio de Tecnología de fabricación

Autor: Amanda Pérez Moncayo

Tutor: Aida Estévez Urra

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

Sevilla, 2023





Proyecto Fin de Carrera  
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

# **Diseño e impresión 3D de un tren de laminación para prácticas de laboratorio de Tecnología de fabricación**

Autor:

Amanda Pérez Moncayo

Tutor:

Aida Estévez Urra

Profesora colaboradora

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Proyecto Fin de Carrera: Diseño e impresión 3D de un tren de laminación para prácticas de laboratorio de Tecnología de fabricación

Autor: Amanda Pérez Moncayo

Tutor: Aida Estévez Urra

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2013

El secretario del Tribunal





## Agradecimientos

---

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, quienes me han brindado su apoyo incondicional en todo momento. Gracias por confiar en mí y por ser mi fuente de inspiración. Su amor y dedicación han sido fundamentales para alcanzar esta meta.

A mis amigos, quienes han sido un gran estímulo para seguir adelante en momentos de desánimo, han sido un gran impulso para mí durante esta etapa.

A mi profesora y tutora cuya experiencia y conocimientos en el área han sido de gran valor para mi formación. Gracias por su tiempo, esfuerzo y compromiso con mi educación. Su contribución ha sido fundamental en mi desarrollo académico y profesional. Además, quiero expresar mi profundo agradecimiento a los integrantes del grupo Tecnofab de la Escuela de Ingeniería de Barcelona Este (EEBE) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Gracias a su colaboración, fue posible materializar las piezas diseñadas en este trabajo.

Les estaré eternamente agradecida por ser parte de este logro.

*Amanda Pérez Moncayo*

*Sevilla, 2023*



## Resumen

---

El siguiente Trabajo Fin de Grado consiste en el diseño y fabricación de un prototipo funcional destinado a ser utilizado como herramienta educativa en las prácticas de laboratorio de las asignaturas del área de conocimiento de Ingeniería y procesos de fabricación, específicamente en las prácticas de conformado plástico, con el fin de enseñar a los alumnos los procesos de laminación y el estudio de diferentes variables del proceso.

En primer lugar, se realizarán cálculos para evaluar el funcionamiento teórico y realizar mejoras en el diseño antes de la fabricación. Se empleará el software CATIA V5 para diseñar un tren de laminación, teniendo en cuenta los principios y variables involucrados en el proceso.

La fabricación del prototipo se llevará a cabo mediante impresión 3D, demostrando así el potencial de la fabricación aditiva como herramienta educativa para fomentar el aprendizaje y la comprensión de los procesos de fabricación en un entorno académico. El prototipo tendrá la función específica de estudiar la laminación de la plastilina a través de los rodillos, teniendo en cuenta factores como el coeficiente de homogeneidad, el tamaño de los rodillos y el espesor de entrada en cada etapa del proceso de laminación.

Un aspecto clave del diseño es la total desmontabilidad del prototipo, lo que permitirá a los alumnos explorar y comprender cada una de las piezas y su función dentro del proceso completo. Se presentarán varias configuraciones del montaje, ya que las etapas poseen una distancia regulable, y se utilizará plastilina como material de trabajo, destacando su accesibilidad y bajo coste para fines educativos.

Además, la tapa del prototipo se fabricará en metacrilato, lo que proporcionará a los alumnos una visión completa y clara del proceso de laminación en su totalidad. Finalmente, la última etapa del proceso permitirá el estudio del acabado superficial gracias a la existencia de los rodillos de forma.

Este proyecto representa una solución creativa para la enseñanza de procesos de fabricación en entornos educativos, combinando diseño, fabricación aditiva y materiales accesibles para ofrecer una experiencia de aprendizaje enriquecedora y efectiva para los estudiantes.

## Abstract

---

The following Final Degree Project consists of the design and manufacture of a functional prototype intended to be used as an educational tool in the laboratory practices of the subjects of the knowledge area of Engineering and manufacturing processes, specifically in the practices of plastic forming, in order to teach students, the lamination processes and the study of different process variables.

Firstly, calculations will be performed to evaluate theoretical performance and make design improvements before manufacturing. CATIA V5 software will be used to design a rolling mill, taking into account the principles and variables involved in the process.

The manufacturing of the prototype will be carried out using 3D printing, thus demonstrating the potential of additive manufacturing as an educational tool to promote learning and understanding of manufacturing processes in an academic environment. The prototype will have the specific function of studying the lamination of plasticine through the rollers, taking into account factors such as the homogeneity coefficient, the size of the rollers and the input thickness at each stage of the lamination process.

A key aspect of the design is the complete disassembly of the prototype, which will allow students to explore and understand each of the pieces and their function within the entire process. Various assembly configurations will be presented, since the stages have an adjustable distance, and plasticine will be used as work material, highlighting its accessibility and low cost for educational purposes.

In addition, the lid of the prototype will be made of methacrylate, which will provide students with a complete and clear view of the entire lamination process. Finally, the last stage of the process will allow the study of the surface finish thanks to the existence of the forming rollers.

This project represents a creative solution for teaching manufacturing processes in educational settings, combining design, additive manufacturing and accessible materials to offer an enriching and effective learning experience for students.



# Índice

---

1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Tareas a desarrollar .....	3
2. Diseño del tren de laminación .....	4
2.1. ¿Qué es la laminación?.....	6
2.2. ¿Qué parámetros influyen en la laminación?.....	8
2.3. ¿Qué parámetros influyen en el diseño? .....	10
2.4. Catia V5 .....	11
2.5. Implementación y criterios .....	12
2.6. Descripción general del prototipo y elementos.....	13
2.6.1. Descripción general de los elementos.....	13
2.6.2. Diseño prototipo final.....	14
2.7. Descripción detallada de los elementos.....	16
2.7.1. Rodillos .....	16
2.7.2. Ruedas dentadas.....	18
2.7.3. Manivela .....	22
2.7.4. Base .....	22
2.7.5. Soportes laterales.....	23
2.7.6. Tapa .....	24
3. Fabricación del tren de laminación .....	27
3.1. Introducción a la fabricación del prototipo .....	27
3.2. Pasos para la fabricación del prototipo .....	28
3.3. Aspectos a tener en cuenta del diseño .....	29
3.4. Resultado final .....	31
4. Propuesta de práctica de laboratorio .....	35
5. Conclusiones .....	37
6. Bibliografía .....	39
ANEXO .....	41

## Índice de figuras

---

Figura 1.1. Fotografía mecanismo de laminado en joyerías [4].....	2
Figura 2.1. Esquema de los procesos en conformado plástico .....	5
Figura 2.2. Etapas y procesos en un tren de laminado en la industria [9] .....	7
Figura 2.3. Ilustración parámetros que intervienen en proceso de laminado [10] .....	9
Figura 2.4. Fotografía lateral derecho diseñado en CATIA V5 del prototipo final.....	14
Figura 2.5. Fotografía lateral izquierdo diseñado en CATIA V5 del prototipo final.....	15
Figura 2.6. Fotografía vista en planta diseñado en CATIA V5 del prototipo final.....	15
Figura 2.7. Fotografía vista en alzado diseñado en CATIA V5 del prototipo final .....	16
Figura 2.8. Fotografía vista lateral rodillos diseñados en CATIA V5.....	17
Figura 2.9. Ilustración de los parámetros a tener en cuenta de una rueda dentada [13].....	19
Figura 2.10. Ilustración del diámetro primitivo de un engranaje sobre prototipo .....	20
Figura 2.11. Fotografía en isométrica y alzado de ruedas dentadas diseñadas en CATIA V5.....	22
Figura 2.12. Fotografía en isométrica y alzado manivela diseñada en CATIA V5.....	23
Figura 2.13. Fotografía en isométrica y alzado de la base diseñada en CATIA V5.....	24
Figura 2.14. Fotografía en isométrica y alzado soporte lateral inferior diseñado en CATIA V5.....	24
Figura 2.15. Fotografía en isométrica y alzado soporte lateral superior diseñado en CATIA V5.....	25
Figura 2.16. Fotografía diseño de tapa, pieza única .....	25
Figura 2.17. Fotografía del prototipo final y configuración de las etapas en CATIA V5.....	26
Figura 3.1. Impresora Creality Ender 3 Pro [15].....	27
Figura 3.2. Esquema procesos impresión 3D.....	29
Figura 3.3. Fotografía idea primer prototipo.....	29
Figura 3.4. Fotografía de la diferencia entre diámetros en los rodillos.....	30
Figura 3.5. Fotografía unión rodillos .....	30
Figura 3.6. Fotografía unión engranajes y manivela .....	30
Figura 3.7. Fotografía del ángulo que forma el perfil interior del rodillo de forma.....	31
Figura 3.8. Fotografía piezas que componen etapa 1 del tren de laminación.....	32
Figura 3.9. Fotografía rueda dentada y manivela etapa 1 de laminación.....	32
Figura 3.10. Fotografía soporte lateral superior, rueda dentada y manivela.....	33



# 1 Introducción

---

## 1.1. Antecedentes

Desde tiempos remotos, la humanidad ha utilizado técnicas de conformado. La historia del conformado de procesos de manufactura se remonta a la antigüedad, cuando las civilizaciones comenzaron a trabajar con materiales como metales y cerámica para crear objetos y herramientas. A lo largo de los siglos, los procesos de conformado han evolucionado significativamente, impulsados por avances tecnológicos y la demanda de productos más eficientes y precisos.

Los procesos de conformado en la Edad Media se centraron en la forja de metales y la modelación de cerámica. Los herreros utilizaban martillos y matrices para dar forma a los metales en objetos útiles y armamento. Los alfareros moldeaban la arcilla a mano para crear utensilios y recipientes [1].

Sin embargo, fue durante la Revolución Industrial cuando los procesos de fabricación experimentaron un cambio trascendental. Con la Revolución Industrial, se producen avances significativos en los procesos de conformado. La introducción de maquinaria impulsada por energía permitió la producción a gran escala de productos fabricados. El estampado y la forja se desarrollaron en métodos comunes para producir piezas de metal en la industria textil, automotriz y de maquinaria [1].

Los trenes de laminación se establecieron como una herramienta revolucionaria donde estas maquinarias se originaron en la industria siderúrgica para la producción masiva de láminas y perfiles metálicos. Con el tiempo, esta tecnología se adaptó y se expandió al conformado plástico, lo que permitió la creación de piezas y productos con propiedades mecánicas y estéticas excepcionales [1].

En el siglo XX, la manufactura experimentó avances drásticos en la automatización y la precisión. La introducción de la tecnología CNC (Control Numérico Computarizado) permitió el control computarizado de máquinas y procesos [2], lo que llevó a una mayor precisión y repetibilidad en la producción. Además, la introducción de nuevos materiales y aleaciones ayudó a la exploración de técnicas de conformado más avanzadas.

A medida que avanzamos en el siglo XXI, la innovación en las metodologías de fabricación no ha cesado. La enseñanza de los procesos de fabricación ha evolucionado para adaptarse a las necesidades cambiantes de la industria y la tecnología [2]. Se han creado programas de enseñanza especializados que permiten a los estudiantes comprender la ciencia y los principios detrás de estas tecnologías como la incorporación de tecnologías de simulación y software de diseño asistido por computadora (CAD) en el aula lo que ayuda a los estudiantes a comprender mejor los conceptos y a desarrollar habilidades prácticas.

La innovación en la enseñanza también ha llevado a la creación de laboratorios, talleres especializados o *makerspaces*, donde los estudiantes pueden interactuar con prototipos en miniatura o incluso con impresoras 3D para comprender los procesos en un entorno controlado y seguro [3].

Todo esto ha llevado a una mejora en la eficiencia y calidad de los procesos de fabricación. Donde se han optimizado los diseños y procesos, reduciendo costos y tiempos de producción. Además, la integración de técnicas de fabricación aditiva ha abierto nuevas posibilidades para la creación de formas y estructuras complejas.

El conformado plástico es un proceso fundamental en la fabricación y transformación de materiales, y su comprensión y dominio son esenciales para los futuros ingenieros en la industria. La presente investigación se centra en brindar una experiencia de aprendizaje enriquecedora que permita a los estudiantes visualizar y comprender de manera práctica los conceptos teóricos relacionados con el conformado plástico, en este caso en el proceso de laminación sentando las bases para comprender cómo los trenes de laminación se han consolidado como una parte esencial de esta historia evolutiva.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es la fabricación de un prototipo funcional de un tren de laminación mediante el uso de impresión 3D previamente diseñado en CATIA V5. Este prototipo ha sido desarrollado con el propósito de proporcionar una herramienta educativa, innovadora y práctica para el aprendizaje de los procesos de conformado plástico en el ámbito de la laminación, destinado a ser utilizado en prácticas de laboratorio, aprovechando la aplicación práctica de este método en la deformación de la plastilina.

Durante el proceso de desarrollo de este proyecto, se prestó especial atención al diseño de la máquina de laminado que serviría como base para la realización de experimentos y el estudio de procesos de conformado. En las etapas iniciales, el enfoque se orientó hacia una máquina de una sola etapa, similar a la de la Figura 1.1., con un diseño semejante a las máquinas empleadas en la laminación de materiales en joyerías.



Figura 1.1. Fotografía mecanismo de laminado en joyerías [4].

Esta propuesta inicial poseía una estructura mecánica más compleja y con la posibilidad de impresión en 3D en mente, surgió una idea más eficiente y adaptable. Se optó por un enfoque en forma de tren de laminado con múltiples etapas.

Los trenes de laminación son equipos industriales diseñados para llevar a cabo procesos de laminación. Estos equipos consisten en una serie de pares de rodillos que aplican fuerza al material a medida que pasa entre ellos.

La estructura del prototipo de este trabajo de fin de grado está compuesta por varias etapas de laminación, cada una de las cuales desempeña un papel fundamental en el proceso de reducción de espesor de la plastilina. Estas etapas permiten un estudio detallado de cómo evoluciona el espesor y otros parámetros a lo largo del recorrido de la plastilina a través del tren de laminación.

Un aspecto clave del prototipo es la inclusión de una manivela en cada etapa, que actúa como un mecanismo de avance para permitir que la plastilina pase entre los rodillos. Esto replica el proceso

de alimentación de material en una operación de laminación real y ofrece a los usuarios la oportunidad de experimentar de manera tangible cómo las etapas fortalecen las propiedades del material laminado.

Mediante la manipulación de las manivelas y la observación directa de la plastilina en cada etapa, los usuarios podrán entender de manera práctica los conceptos fundamentales de la laminación. Este enfoque experimental complementa el aprendizaje teórico y permite una comprensión más profunda de los procesos de conformado plástico.

En última instancia, este prototipo tiene como objetivo facilitar el proceso de enseñanza y aprendizaje al proporcionar a los estudiantes una experiencia práctica y visual de los conceptos, los usuarios podrán relacionar directamente los principios teóricos con la realidad física, lo que enriquecerá su comprensión y conocimiento en esta área de la fabricación.

Esta metodología busca promover una comprensión más profunda y significativa de los procesos de fabricación gracias a los siguientes requisitos:

- **Prototipo desmontable:** El prototipo ha sido cuidadosamente diseñado para ser completamente desmontable. Cada pieza se puede separar y examinar de forma independiente, permitiendo a los estudiantes acceso a cada parte del proceso. Esta característica fomenta un óptimo estudio acerca de la configuración de los rodillos, los mecanismos de ajuste y los detalles de montaje. En definitiva, una visión más profunda y detallada de cómo funciona el tren de laminación en su totalidad.
- **Ajuste de espacios entre etapas:** El ajuste de las distancias entre las etapas es una característica distintiva de este tren de laminación. Mediante riles y mecanismos de sujeción, los laterales del tren pueden moverse para modificar las distancias entre las etapas. Este ajuste proporciona a los estudiantes la oportunidad de experimentar directamente cómo la variación en las distancias influye en el resultado final.
- **Acabado superficial:** Una característica particularmente notable es la inclusión de rodillos de forma en la última etapa del tren de laminación. Estos rodillos especiales, otorgan a la plastilina un acabado superficial diferente al acabado liso típico. Los estudiantes pueden observar cómo estos rodillos moldean la superficie, lo que demuestra la versatilidad del proceso de laminación y la influencia de los detalles en el resultado final.
- **Ampliando la comprensión teórica:** La combinación de las características mencionadas ofrece una experiencia que va más allá de la teoría. Los estudiantes no pueden solo aprender los conceptos teóricos, sino también aplicarlos de manera práctica. La manipulación de los componentes, el ajuste de las distancias y la observación del acabado superficial agregan una dimensión táctil y visual a su aprendizaje.
- **Preparación de cara a la industria:** El tren de laminación diseñado introduce a los estudiantes en conceptos clave de fabricación, pero también los prepara para innovaciones futuras. La inclusión de características especiales, como el acabado superficial diferenciado, refleja la naturaleza de constante evolución de las tecnologías de fabricación.

En resumen, el presente proyecto se centra en ofrecer una experiencia de aprendizaje más dinámica y efectiva.

### **1.3. Tareas a desarrollar**

La metodología propuesta para realizar este proyecto de fin de grado, que involucra el diseño en CATIA V5, el estudio y comprensión de los trenes de laminación, así como la impresión 3D de las piezas resultantes, se puede dividir en las siguientes etapas:

- Investigación y estudio de los trenes de laminación: Se ha realizado una investigación sobre los principios y procesos de laminación, así como los diferentes tipos de trenes de laminación utilizados en la industria. Esto incluye comprender su funcionamiento, características y aplicaciones.
- Familiarización con CATIA V5: Se ha dedicado tiempo a familiarizarse con el software CATIA V5, especialmente con las herramientas de diseño y modelado necesarias para crear componentes mecánicos.
- Diseño y modelado en CATIA V5: Se ha utilizado el conocimiento adquirido sobre los trenes de laminación para diseñar y modelar cada una de las partes del tren de laminación en CATIA V5. Teniendo en cuenta los requisitos técnicos y funcionales específicos de cada componente.
- Simulación y análisis estructural: Se han realizado pruebas de simulación para validar la integridad estructural y la funcionalidad de los componentes del tren de laminación.
- Impresión 3D de las piezas: La impresión de las piezas se ha realizado en la Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE), perteneciente a la Universidad Politécnica de Barcelona (UPC), como parte de la colaboración en un proyecto de innovación docente de la UPC y la Universidad de Sevilla. El proyecto se titula Elaboración de material didáctico tridimensional mediante tecnologías de fabricación aditiva y sustractiva para docencia en ingeniería y pertenece a la convocatoria Apoyo a la innovación docente - Redes de Colaboración para la Innovación Docente, convocatoria 2022/2023 Ref.: 221B. En este marco, la EEBE ha proporcionado las impresoras 3D necesarias para fabricar las piezas diseñadas en CATIA V5.
- Ensamblaje y verificación: Una vez que las piezas en 3D han sido recibidas, se procede a ensamblarlas siguiendo el diseño y las instrucciones establecidas. Se ha verificado la integridad y la funcionalidad del tren de laminación resultante, asegurándose de que las piezas se ajusten y funcionen correctamente.
- Evaluación de resultados: Se ha evaluado y se ha comparado los resultados obtenidos en términos de eficiencia, precisión y viabilidad del proceso de diseño y la fabricación mediante impresión 3D.

## 2 Diseño del tren de laminación

Para abordar el diseño del tren de laminación primero se debe conocer el proceso de laminación y por consiguiente hay que remontarse al proceso del conformado plástico.

El conformado plástico, como se puede ver en la Figura 2.1, es un conjunto de procesos de fabricación en los cuales los materiales, especialmente metales y plásticos, se deforman permanentemente mediante la aplicación de fuerzas mecánicas para cambiar su forma, tamaño y propiedades sin fractura. Existen dos ramas en estos procesos, en la primera categoría entrarían los procesos por deformación volumétrica y en la segunda categoría serían los procesos por deformación de chapa [1].

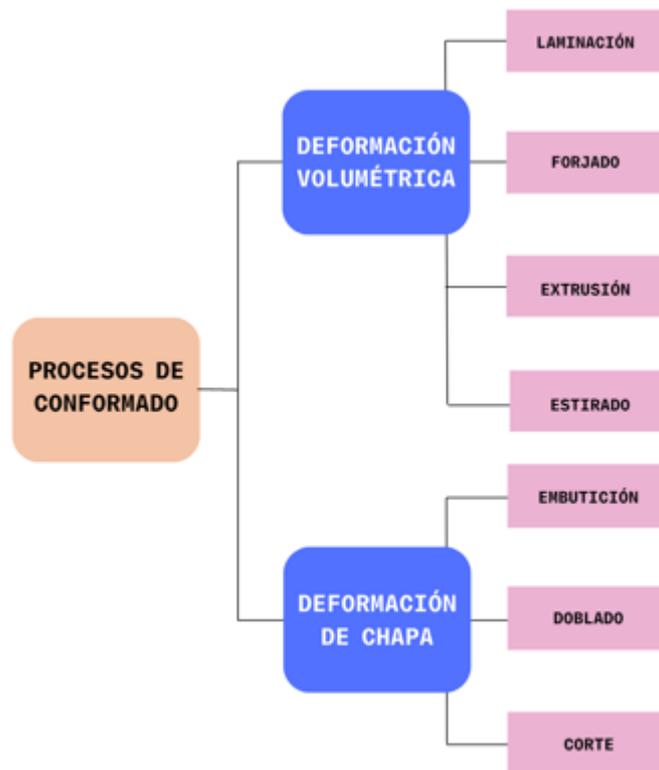


Figura 2.1 Esquema procesos de conformado plástico.

Estos procesos aprovechan la plasticidad de los materiales, permitiendo su deformación en caliente o en frío para obtener productos finales con formas y propiedades específicas.

La deformación volumétrica y la deformación de chapa son dos conceptos distintos en el ámbito de la fabricación y el conformado de materiales.

La deformación volumétrica se refiere a los cambios en las dimensiones tridimensionales de un material, es decir, en su longitud, ancho y espesor. Este tipo de deformación implica cambios en la forma y el volumen del material. Los procesos de deformación volumétrica, como el forjado y la extrusión, se utilizan para dar forma a los materiales en tres dimensiones, cambiando su forma y volumen para crear componentes con formas y propiedades mecánicas específicas deseadas. En la deformación volumétrica, la materialización de la deformación ocurre en todo el volumen del material, y no solo en su superficie [5].

La deformación de chapa, por otro lado, se refiere específicamente a los cambios en la forma de láminas planas y delgadas, como láminas metálicas o láminas de plástico. Estos procesos se utilizan para producir componentes planos con formas y características específicas, como carcasas de

electrodomésticos, piezas automotrices, componentes electrónicos y más. Los procesos de deformación de chapa incluyen técnicas como la embutición, el troquelado y el doblado, que modifican la forma de la lámina sin cambiar significativamente su volumen [5].

Este proyecto se centrará en la deformación volumétrica del conformado plástico, en concreto, el proceso protagonista de este trabajo de fin de grado es el de laminación.

## 2.1. ¿Qué es la laminación?

El proceso de laminado es un método de conformado que se utiliza para reducir el espesor de una pieza larga, como una lámina o una placa, mediante la aplicación de fuerzas de compresión a través de un juego de rodillos. Este proceso es ampliamente utilizado en la industria para fabricar láminas de metal, plástico y otros materiales en diferentes grosores y formas [6].

Los dos métodos de conformado que se utilizan en laminación son en frío y en caliente. En este proyecto se va a profundizar en el proceso de laminado en frío como método de conformado en la fabricación. El enfoque central será el análisis detallado de la reducción de espesor de la plastilina a temperatura ambiente. Algunas de las características principales tanto positivas como negativas de la laminación en frío serían las siguientes:

- **Temperatura:** Se realiza a temperatura ambiente o a temperaturas moderadas, sin calentar el material por encima de su temperatura de recristalización [9].
- **Precisión:** Proporciona mayor precisión de acabado dimensional y superficial en comparación con el laminado en caliente [9].
- **Propiedades mecánicas:** Generalmente, las propiedades mecánicas del material se mantienen o mejoran debido a la deformación en frío [9].
- **Endurecimiento:** La deformación en frío puede endurecer el material, mejorando su resistencia y dureza [9].
- **Acabado superficial:** Produce una superficie más lisa y uniforme en comparación con el laminado en caliente [9].
- **Tolerancias:** Es adecuado para obtener tolerancias más ajustadas en las dimensiones finales del producto [9].
- **Menos deformabilidad:** Al trabajar el material a temperatura ambiente, algunos materiales pueden ser menos deformables en comparación con el laminado en caliente [9].
- **Mayor fuerza requerida:** Puede requerirse más fuerza para lograr la deformación debido a la resistencia del material a temperaturas más bajas [9].
- **Formas complejas:** Puede ser más difícil lograr formas complejas debido a la menor ductilidad del material [9].

En resumen, el laminado en frío ofrece mayor precisión y acabado superficial, mientras que el laminado en caliente es más adecuado para formas complejas y requiere menos fuerza de aplicación.

La elección del proceso de laminado en frío para este proyecto se basa en las únicas características del material utilizado, en este caso, la plastilina. La plastilina, teniendo en cuenta que será un proceso manual, sin ayuda de ninguna máquina que imprima más fuerza. La plastilina, a temperatura ambiente, exhibe una alta capacidad de deformación plástica, lo que la hace especialmente adecuada para ser sometida a procesos de laminado en frío. Dado que el laminado en frío se realiza a temperaturas moderadas, esta elección permite aprovechar al máximo las propiedades de deformabilidad de la plastilina sin la necesidad de recurrir a temperaturas elevadas. Esto resulta en una oportunidad ideal para la realización de experimentos y pruebas en un entorno seguro, accesible y barato para fines académicos.

La siguiente cuestión a abordar sería cuestionarse sobre cómo y para qué se suelen usar los trenes de laminación.

Los trenes de laminación son esenciales en sectores como la metalurgia, la construcción, la automoción y la fabricación en general y se utilizan en una gran variedad de aplicaciones debido a sus ventajas y versatilidad, como, por ejemplo:

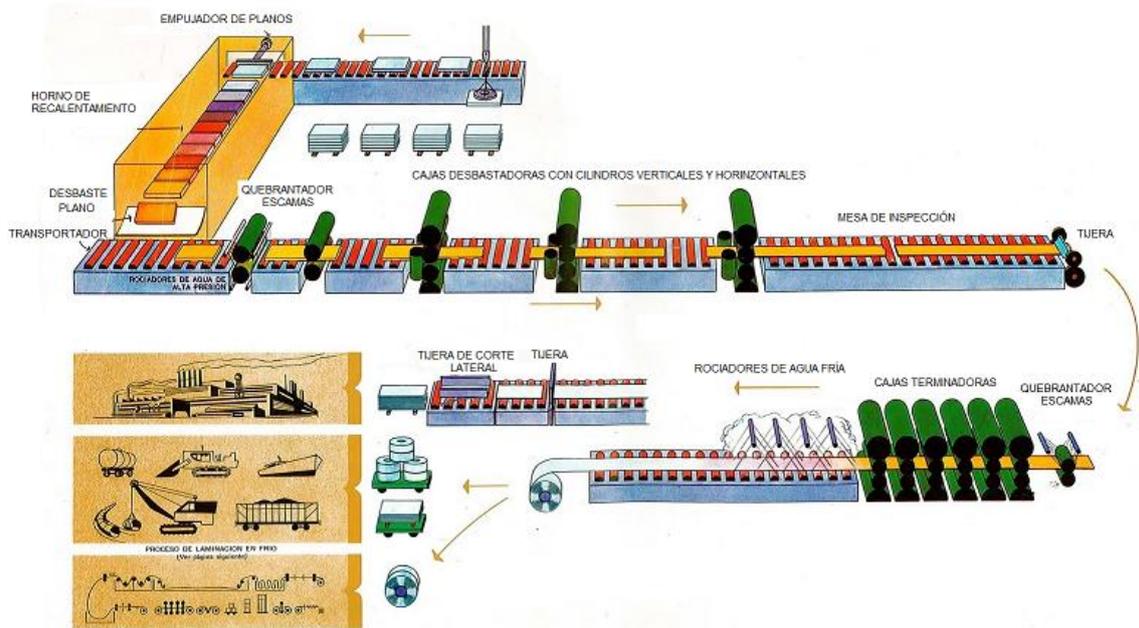


Figura 2.2. Etapas y procesos en un tren de laminado en la industria [7].

- Reducción de espesor de manera precisa y controlada: Esto permite la producción de láminas y placas con grosores específicos y uniformes, lo que es esencial en diversas aplicaciones [7].
- Control de propiedades: Al laminar el material, es posible modificar sus propiedades mecánicas y superficiales. Esto puede aumentar la resistencia, mejorar la textura superficial y ajustar otras características del material según las necesidades [7].
- Fabricación eficiente: Los tiempos de laminación permiten la producción de grandes cantidades de material en un corto período de tiempo de láminas y placas con alta eficiencia [7].
- Consistencia y precisión: Los tiempos de laminación permiten obtener productos con dimensiones y tolerancias precisas. Esto es especialmente importante en aplicaciones donde se requiere un alto grado de uniformidad y consistencia [7].
- Variedad de materiales: Los trenes de laminación pueden utilizarse en una amplia gama de materiales, desde metales como acero, aluminio y cobre hasta plásticos y materiales compuestos. Esto amplía su aplicabilidad en diferentes industrias [7].
- Diversidad de aplicaciones: Los productos laminados se utilizan en diversas aplicaciones industriales, como la construcción, la fabricación de automóviles, la electrónica, la industria aeroespacial, la industria del embalaje y más [7].
- Obtención de formas complejas: Además de la reducción de espesor, los trenes de laminación pueden utilizarse para dar forma a materiales con formas específicas, como perfiles de aluminio o piezas con formas personalizadas [7].
- Desarrollo de prototipos: Los tiempos de laminación también se utilizan en la creación de prototipos y muestras de productos antes de la producción en masa, lo que permite evaluar la viabilidad de ciertos diseños y ajustar parámetros antes de la fabricación completa [7].

## 2.2. ¿Qué parámetros influyen en la laminación?

La optimización de los procesos de fabricación juega un papel crucial en la obtención de productos finales de alta calidad y rendimiento. En el contexto del proceso de laminación, donde se busca reducir el espesor de materiales de manera precisa y controlada, la comprensión de los parámetros que influyen en el proceso es esencial para lograr resultados óptimos.

Estos parámetros abarcan desde las características del material utilizado, hasta las condiciones de operación del equipo de laminación. En este apartado, se explorarán detalladamente los factores que aparecen en la Figura 2.3 que tienen un impacto directo en el proceso de laminación.

En el laminado plano, el trabajo es realizado por los rodillos que ejercen presión al material de manera que su espesor se reduce en una variable denominada *draft* [6].

$$\Delta h = h_0 - h_f \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde:

$\Delta h$  = cantidad de espesor reducida o *draft*

$h_0$  = espesor inicial

$h_f$  = espesor final

La reducción del espesor es la relación entre el espesor inicial del material y el espesor final después de pasar por el proceso de laminado. Se puede expresar como un porcentaje o una fracción [6].

$$r = \frac{(h_0 - h_f)}{h_0} = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

En la Ecuación 2.2,  $r$  representa la disminución en el espesor del material. Si esta disminución del espesor se lleva a cabo en múltiples pasos consecutivos, la reducción total será la suma de los adelgazamientos de espesor, dividida entre el espesor original.

Sin embargo, en el proceso de laminación, no solo se reduce el espesor del material, sino que también suele aumentar el ancho del material de trabajo. Este efecto se conoce como *esparcido*. La magnitud del esparcido tiende a ser mayor cuando la relación entre el ancho y el espesor original del material es menor. Además, el esparcido aumenta en situaciones donde los coeficientes de fricción entre las superficies son bajos [6].

El proceso de laminación se rige por el principio de conservación del material, de tal manera que el volumen de metal que sale de los rodillos es igual al volumen de metal que entra en ellos [6]:

$$w_0 h_0 L_0 = w_f h_f L_f \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Donde:

$w_0$  = ancho inicial

$w_f$  = ancho final

$L_0$  = longitud inicial

$L_f$  = longitud final

Al tener una deformación plástica, el gasto volumétrico a la entrada y salida se podría relacionar de la misma forma [6]:

$$w_0 h_0 v_0 = w_f h_f v_f \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Donde:

$v_0$  = velocidad inicial

$v_f$  = velocidad final

Cada uno de los rodillos tiene un tamaño definido por su radio  $R$ , además, el flujo del material es constante en todo momento. El punto de contacto entre el material y el rodillo ocurre en una sección curvada llamada *arco de contacto*, que está definida por un ángulo  $\vartheta$ . Dentro de este arco de contacto, llegamos a un punto donde la velocidad del material de trabajo se iguala con la velocidad del rodillo [6].

La presión de laminado se aplica sobre el arco de contacto. Esta nueva variable se considerará como longitud proyectada del arco de contacto  $L_p$  [6].

$$L_p = \left( \frac{R\Delta h - \Delta h^2}{2} \right)^2 \quad \text{(Ecuación 2.5)}$$

Donde:

$R$  es el radio del rodillo.

Como  $\Delta h \ll R$ , entonces:

$$L_p = R\Delta h^{1/2} \quad \text{(Ecuación 2.6)}$$

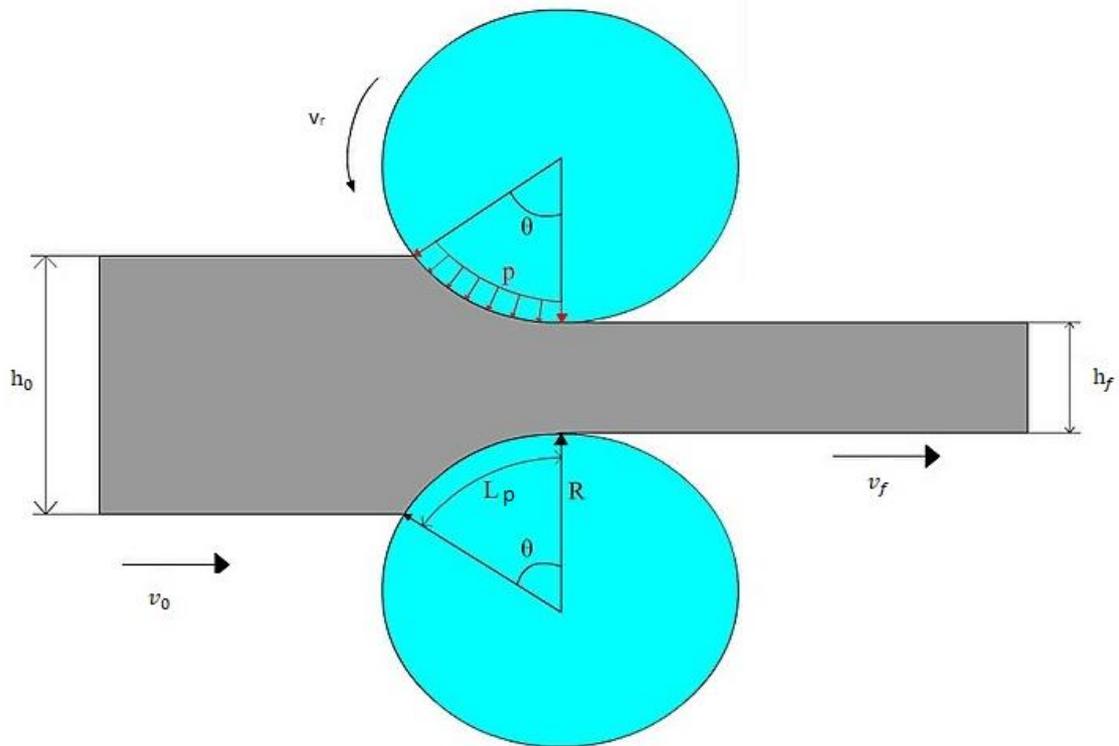


Figura 2.3. Parámetros a tener en cuenta en el proceso de laminado [8].

La fricción en el proceso de laminación es un aspecto crítico que debe ser controlado cuidadosamente para lograr la deformación plástica deseada. Se busca un equilibrio entre tener suficiente fricción para controlar la deformación y minimizar el calor excesivo, mientras se evita un coeficiente de fricción tan alto que pueda generar problemas en la superficie y el proceso [6].

El coeficiente de fricción determina el draft máximo para el proceso de laminado.

$$\Delta h_{max} = \mu^2 R \quad \text{(Ecuación 2.7)}$$

Donde:

$\mu$  es el coeficiente de fricción.

$R$  es el radio del rodillo.

Cuando se determina el draft máximo para que el laminado sea posible, se requerirá una fuerza de

rodillo lo suficientemente grande como para conseguir la separación apropiada entre rodillos [6].

$$F = w \int_0^L p dL \text{ (Ecuación 2.8)}$$

F es la fuerza de laminación.

w es el ancho del material de trabajo que está siendo laminado.

p es la presión de laminado.

L es la longitud de contacto entre rodillo y material.

Un concepto importante es el coeficiente de homogeneidad. Valor que indica cómo se distribuye la deformación en el material durante el proceso de laminación. Este coeficiente es una herramienta importante para evaluar la uniformidad y la consistencia de la deformación a lo largo del material.

Cuando se lleva a cabo la laminación, es deseable que la deformación sea lo más uniforme posible en todo el material, para evitar gradientes excesivos que puedan resultar en propiedades no deseadas o defectos en el producto final. El coeficiente de homogeneidad se utiliza para cuantificar esta uniformidad de deformación [6].

El coeficiente de homogeneidad se define como la relación entre la máxima deformación y la deformación promedio en una dirección particular del material [6].

$$H = \frac{\bar{h}}{L_p} \text{ (Ecuación 2.9)}$$

Siendo  $\bar{h}$  la media de los espesores de entrada y salida del material en cada etapa de laminación [6].

$$\bar{h} = \frac{h_0 - h_f}{2} \text{ (Ecuación 2.10)}$$

Donde:

H es el parámetro del grado de homogeneidad.

$\bar{h}$  es la media de los espesores de entrada y de salida.

$L_p$  es la longitud proyectada del arco de contacto.

Un valor de coeficiente de homogeneidad igual a la unidad indica que la deformación es completamente uniforme [6].

$$H \leq 1 \text{ (Ecuación 2.11)}$$

Mientras que valores por encima de la unidad indican que hay áreas con mayor deformación en relación con la deformación promedio [6].

$$H > 1 \text{ (Ecuación 2.12)}$$

La identificación y comprensión de estos parámetros contribuirá así a la obtención de laminados de alto rendimiento y a la vez presentará una base sólida para la toma de decisiones en futuros procesos de conformado.

### 2.3. ¿Qué parámetros influyen en el diseño?

En el diseño de un prototipo destinado a laminación existen varios parámetros y elementos que juegan un papel esencial para garantizar su funcionalidad y efectividad. Entre los factores significativos se encuentran:

- Rodillos y su diámetro: La selección de la geometría y diámetro de los rodillos es crucial, ya que determina la cantidad de deformación que se aplicará al material durante el proceso de laminación.
- Etapas de laminación: Existencia de diversas etapas, en este caso, tres de ellas se destinan al estudio del proceso de laminado.
- Estudio acabado superficial: Una última etapa, para analizar el acabado superficial, empleando específicamente rodillos de forma para este propósito.
- Desmontabilidad: La capacidad de desmontar completamente el prototipo que facilite el aprendizaje y estudio de las partes, así como la posibilidad de distintas combinaciones.
- Base robusta: Una base sólida y resistente que proporcione la rigidez necesaria para mantener la estabilidad del proceso de laminación y evitar vibraciones indeseadas.
- Sistema de avance: Un sistema de avance de material, como una manivela, es esencial para controlar y alimentar el material de manera precisa y controlada en cada etapa del proceso.
- Tipo de material: El material a laminar afecta directamente el comportamiento del proceso, la deformación y las características finales del producto.
- Distancia entre rodillos: La distancia entre los rodillos es un factor crucial para determinar la deformación y la eficiencia del proceso y esto a su vez se traduce a la reducción de espesores para cada etapa.
- Ajustes, lubricación y uniones: Asegurar ajustes precisos, una lubricación adecuada y uniones sólidas entre las piezas es fundamental para el funcionamiento sin problemas del prototipo.
- Costes y recursos: Evaluar los costes y recursos es vital, especialmente si el prototipo se fabrica utilizando impresión 3D.

En resumen, el diseño del prototipo de un tren de laminación requiere una consideración integral de múltiples factores. Cada uno de estos elementos contribuye a la eficacia y éxito del proceso de laminación simulado en el prototipo.

## 2.4. Catia V5

CATIA V5 es un software de diseño asistido por computadora (CAD) desarrollado por Dassault Systèmes. Es ampliamente utilizado en la industria para el diseño, modelado y desarrollo de productos en 3D, con una amplia gama de capacidades que abarcan desde el diseño de piezas individuales hasta la simulación de sistemas complejos. Es especialmente valioso en industrias que requieren un alto grado de precisión en el diseño y fabricación de productos.

Una descripción general de sus utilidades y funciones principales sería:

- Diseño en 3D: CATIA V5 permite crear modelos tridimensionales de productos, piezas y ensamblajes. Los usuarios pueden diseñar y visualizar productos de manera detallada y precisa [10].
- Modelado paramétrico: El enfoque paramétrico en CATIA V5 permite modificar los modelos de manera rápida y eficiente ajustando parámetros específicos, lo que facilita la iteración y el refinamiento del diseño [10].
- Ensamblajes: Permite crear ensamblajes complejos de múltiples componentes, ajustando y probando la interacción entre piezas. También es posible simular movimientos y animaciones para verificar el funcionamiento [10].
- Superficies: CATIA V5 ofrece herramientas avanzadas para crear y manipular superficies

complejas, lo que resulta útil para diseñar formas orgánicas y superficies complejas [10].

- **Análisis y simulación:** Además del diseño, CATIA V5 ofrece capacidades de análisis y simulación que permiten evaluar la resistencia estructural, el rendimiento térmico y otros aspectos de los productos diseñados [10].
- **Dibujo técnico:** La herramienta de generación de dibujos técnicos permite crear planos de fabricación precisos a partir de los modelos 3D [10].
- **Renderización y visualización:** CATIA V5 ofrece herramientas para renderizar modelos y crear imágenes realistas, lo que facilita la comunicación del diseño con los equipos y los clientes [10].
- **Integración en el ciclo de vida del producto:** CATIA V5 permite gestionar el ciclo de vida del producto, lo que incluye el diseño, la fabricación, la documentación y el mantenimiento [10].
- **Módulos especializados:** CATIA V5 se compone de varios módulos especializados para áreas específicas, como chapa metálica, diseño de superficies avanzado, ingeniería inversa y más [10].
- **Colaboración:** El software permite la colaboración en tiempo real, lo que facilita el trabajo en equipo en proyectos de diseño complejos [10].
- **Personalización:** Los usuarios pueden personalizar CATIA V5 según sus necesidades específicas, lo que incluye la creación de macros y scripts para automatizar tareas [10].

Además, CATIA V5 ofrece una amplia gama de módulos especializados que se adaptan a diversas necesidades de diseño, simulación y análisis en diferentes industrias. Algunos de los módulos más comunes y que se han utilizado para obtener el diseño del prototipo de este proyecto son:

- **Part Design:** Permite la creación y modificación de piezas en 3D, utilizando operaciones como extrusión, revolución, barrido y más [10].
- **Assembly Design:** Facilita la creación y gestión de ensamblajes complejos, definiendo relaciones y restricciones entre componentes [10].
- **DMU Kinematics:** Permite simular movimientos y animaciones realistas en ensamblajes para verificar el funcionamiento [10].

## **2.5. Implementación y criterios.**

En el desarrollo del diseño de este proyecto, se han considerado determinados valores para los parámetros de laminación, teniendo en cuenta factores relevantes para el diseño y la futura fabricación de los elementos por impresión 3D se optó por asignar valores enteros tanto al diámetro de los rodillos como a los espesores de entrada y salida del material. Este enfoque facilitará la posterior producción de los componentes.

Es importante señalar que el prototipo está compuesto por cuatro etapas en su proceso. No obstante, es necesario aclarar que el análisis de la disminución de los espesores en el proceso de laminación se limitará exclusivamente a las tres primeras etapas. La cuarta etapa, por su parte, como se ha dicho anteriormente, estará enfocada únicamente a estudiar del acabado superficial mediante el uso de los rodillos de forma.

Antes de la presentación de los valores específicos para los diámetros de los rodillos, así como los espesores de entrada y salida del material, se procedió a completar una hoja de cálculo en Excel con una amplia gama de posibles combinaciones de estos valores. Esta tarea tuvo como objetivo garantizar que los parámetros obtenidos fueran los más óptimos para el diseño en cuestión.

Durante este proceso, se tomaron en consideración los parámetros teóricos relacionados con el coeficiente de homogeneidad.

En la primera etapa, se definió que este coeficiente no superaría la unidad (Ecuación 2.11), mientras que, en las etapas posteriores, su valor sería mayor que la unidad (Ecuación 2.12).

Esto sugiere que en la primera etapa se buscó una deformación más uniforme en el material, mientras que en las etapas posteriores se permitió una mayor variación en la deformación a lo largo del material.

En coherencia con este coeficiente de homogeneidad, se evaluaron tanto la longitud proyectada del arco de contacto, que depende tanto del radio del rodillo como del "draft" (Ecuación 2.6), como la media de los espesores de entrada y salida del material (Ecuación 2.10).

Una vez exploradas las distintas posibilidades y considerando las dimensiones del prototipo, se seleccionaron los valores que se indican en la Tabla 2.1 donde se  $D$  sería el diámetro de los rodillos,  $h_0$  el espesor de entrada y  $h_f$  el espesor de salida:

Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
$D_1 = 65 \text{ mm}$	$D_2 = 45 \text{ mm}$	$D_3 = 30 \text{ mm}$
$h_{01} = 15 \text{ mm}$	$h_{02} = 12 \text{ mm}$	$h_{03} = 10 \text{ mm}$
$h_{f1} = 12 \text{ mm}$	$h_{f2} = 10 \text{ mm}$	$h_{f3} = 8 \text{ mm}$

Tabla 2.1. Tabla valores fijos de laminado del prototipo.

Se debe destacar que los espesores de entrada y salida del material estarán directamente vinculados a la distancia entre los rodillos de las diferentes etapas del proceso. Una vez obtenidos los parámetros que influyen en el proceso de laminado, se procedió a diseñar el resto de componentes del mecanismo de acuerdo con las dimensiones del prototipo.

## 2.6. Descripción general del prototipo y elementos

En las etapas iniciales, el enfoque se orientó hacia una máquina de una sola etapa, como ya se mencionó en el primer capítulo.

Sin embargo, con la posibilidad de la impresión en 3D en mente del prototipo, se optó por un enfoque en forma de tren de laminado con múltiples etapas en la que la uniformidad en las etapas y la distancia fija entre rodillos, permitió un modelo más sistemático y simplificado para su fabricación.

Este tren de laminación posee cuatro etapas, de las cuales las tres primeras tendrán como objetivo principal investigar y analizar el proceso de laminación. Durante estas etapas, se estudiará la forma en que el espesor del material disminuye progresivamente. La cuarta y última etapa está específicamente diseñada para el acabado superficial, aprovechando la aplicación de los rodillos de forma.

### 2.6.1. Descripción general de los elementos

Estudiando lo anterior, se procede a la descripción general de los elementos clave que componen el diseño del tren de laminación.

- Base: El prototipo cuenta con una base sólida que proporciona la rigidez necesaria para el mecanismo en su conjunto. Esta pieza adquiere una importancia significativa debido a que alberga la conexión entre sí misma y las paredes laterales que actúan como soporte para los

rodillos.

- Soporte laterales rodillos: Cada una de las paredes encargadas de sostener los rodillos se compone de dos piezas distintas, correspondientes al apoyo del rodillo superior e inferior.
- Rodillos: Los diámetros de los rodillos se han determinado considerando detenidamente los diversos parámetros de laminación previamente mencionados. En la última etapa del proceso, se utilizarán rodillos de forma.
- Engranaje: Uno de los componentes fundamentales en este proyecto ha sido la implementación de engranajes. Estos engranajes han sido esenciales para lograr una transmisión eficaz del movimiento entre los rodillos en cada etapa del proceso. Cada etapa ha requerido un par de engranajes cuidadosamente diseñados con una relación de transmisión igual a 1:1.
- Manivela: Se reconoció la importancia de crear una manivela que facilitara el inicio del proceso de laminado. Dado que cada etapa del proceso es independiente de las demás, se diseñó una manivela individual para cada una de ellas. La incorporación de estas manivelas resultó esencial para iniciar el movimiento de cada una de las etapas.
- Tapa: Para esta componente, se ha optado por utilizar metacrilato como material de fabricación. Esta elección tiene un propósito educativo fundamental, ya que el metacrilato, al ser transparente, permitirá a los estudiantes obtener una experiencia de aprendizaje más enriquecedora.

### 2.6.2. Diseño del prototipo final

Después de realizarse una exposición exhaustiva de todos los componentes que conforman el prototipo, es relevante acompañar esta descripción con imágenes que ilustren visualmente el resultado del tren de laminación diseñado. A continuación, se presentan fotografías que capturan diferentes perspectivas del prototipo, brindando una representación visual del diseño en su conjunto.

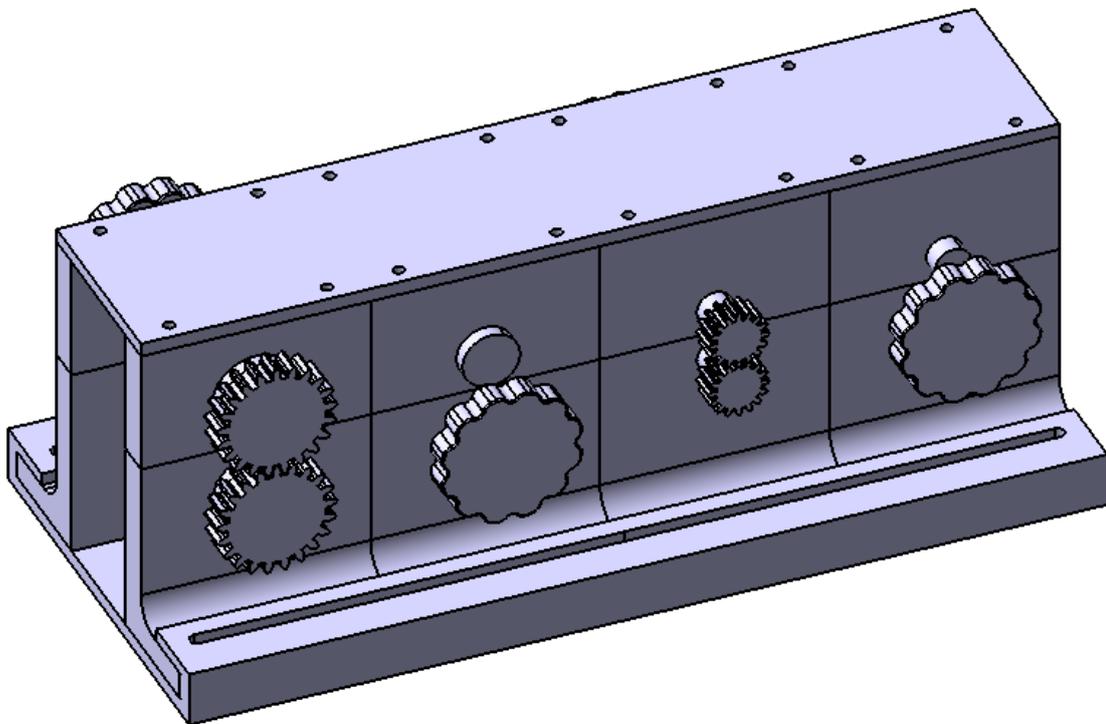


Figura 2.4 Figura vista lateral derecho prototipo final

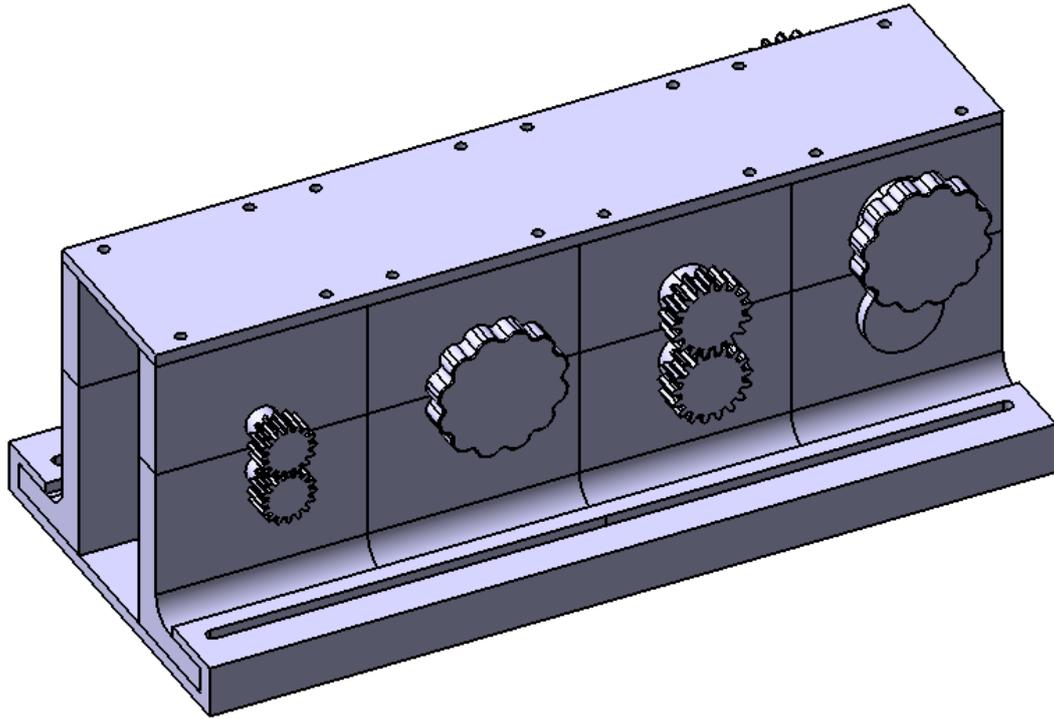


Figura 2.5 Figura vista lateral izquierdo prototipo final

En las Figura 2.4 y Figura 2.5 se ofrece una vista lateral del prototipo del tren de laminación, permitiendo apreciar la disposición de los componentes principales y las diferentes etapas existentes en el mecanismo.

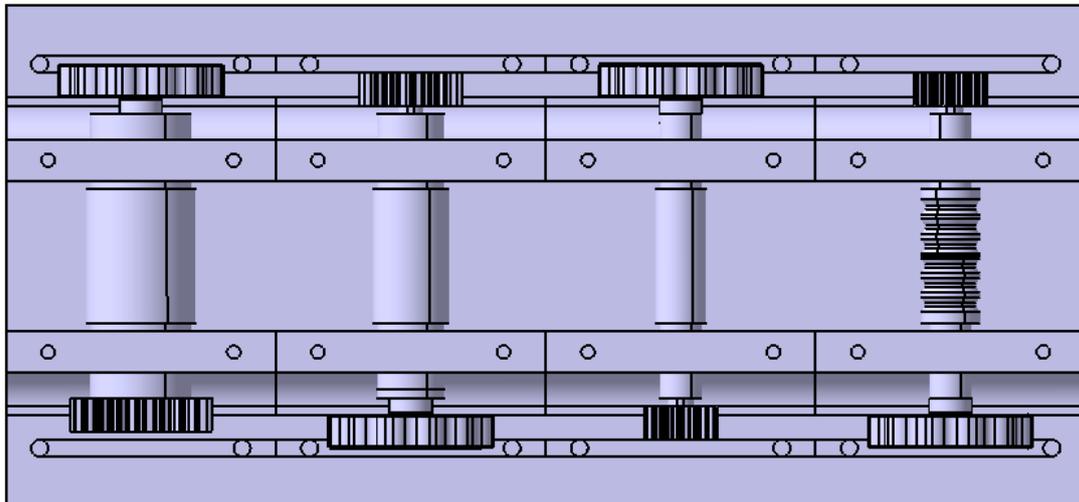
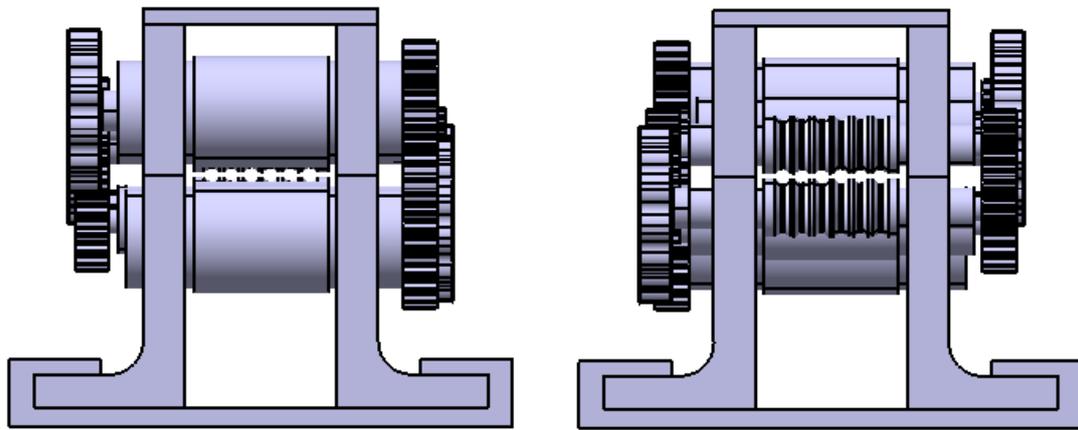


Figura 2.6 Figura vista en planta prototipo final

La vista en planta brinda una visión aérea del prototipo, permitiendo apreciar la disposición espacial de las etapas de laminación. En la Figura 2.6, se logra captar el tamaño relativo de los rodillos, abarcando incluso el de la última etapa, que presenta la particularidad de ser un rodillo de forma. Esta vista proporciona una representación visual que resalta la dimensión de los componentes y cómo interactúan dentro del diseño global.



*Figura 2.7 Figura vista en alzado prototipo final*

Por último, la vista en alzado de la Figura 2.7 proporciona una perspectiva frontal del prototipo, revelando la disposición vertical de las etapas y de la dimensión de los componentes principales.

## **2.7. Descripción detallada de elementos**

Una vez presentada la descripción general del prototipo y haber expuesto su funcionamiento en términos generales, el siguiente paso es proporcionar una descripción detallada de los elementos individuales que componen el prototipo.

En esta sección, se abordarán las dimensiones específicas de cada componente y se expondrá de manera precisa cómo se llevaron a cabo los cálculos necesarios para obtener los resultados finales.

### **2.7.1. Rodillos**

Los rodillos que se han contemplado en la Figura 2.8 se han calculado teniendo en cuenta los parámetros de laminación y las dimensiones específicas. Cada etapa del prototipo incorpora un conjunto compuesto por un par de rodillos: uno superior y otro inferior. Específicamente, uno de estos rodillos se conectará directamente a la manivela, actuando como el componente que iniciará el movimiento en cada etapa.

Además de esta conexión con la manivela, este rodillo estará unido a un engranaje. Este engranaje, a su vez, se encuentra sincronizado con su contraparte correspondiente, formando un sistema que permite la transmisión eficiente del movimiento al segundo rodillo. De esta manera, se establece una cadena de transmisión que garantiza el funcionamiento coordinado de ambos rodillos en cada etapa del proceso.

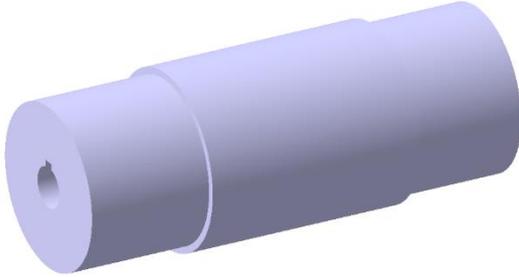
La configuración de la unión entre la manivela y el engranaje con los rodillos se ha realizado de manera que el rodillo incorpora una unión "hembra", mientras que el engranaje cuenta con la correspondiente unión "macho". Esto significa que es la manivela y el engranaje los componentes que encajan en el rodillo, asegurando una conexión sólida y funcional entre estas partes clave del mecanismo.

Cada etapa presenta un primer rodillo con una única unión, mientras que el otro tiene dos. El rodillo con dos uniones está conectado tanto a la manivela como al engranaje en su lado opuesto. Por otro lado, el segundo rodillo se vincula exclusivamente al engranaje complementario.

Ambas restricciones se implementaron con la intención de prevenir posibles rupturas por fatiga en la pieza, garantizando así la solidez estructural durante todo el proceso de impresión y uso. De esta

manera, se persigue asegurar tanto la longevidad como la eficacia operativa de los soportes de los rodillos en el contexto de la fabricación y el funcionamiento.

**Etapa 1**



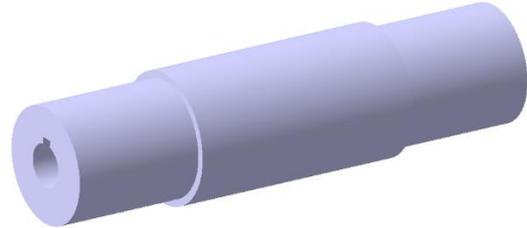
$$D_1 = 65 \text{ mm}$$

$$D_{apoyo1} = 60 \text{ mm}$$

$$L_{rodsup} = 170 \text{ mm}$$

$$L_{rodinf} = 165 \text{ mm}$$

**Etapa 2**



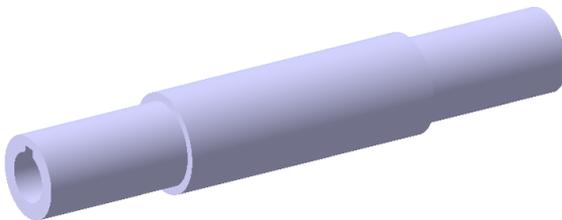
$$D_2 = 45 \text{ mm}$$

$$D_{apoyo2} = 40 \text{ mm}$$

$$L_{rodsup} = 165 \text{ mm}$$

$$L_{rodinf} = 170 \text{ mm}$$

**Etapa 3**



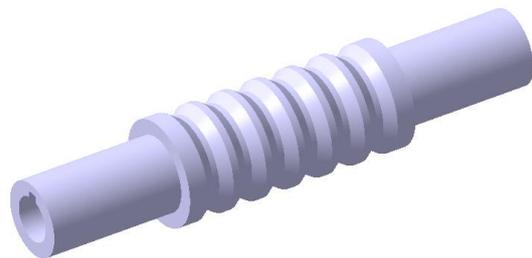
$$D_3 = 30 \text{ mm}$$

$$D_{apoyo3} = 25 \text{ mm}$$

$$L_{rodsup} = 170 \text{ mm}$$

$$L_{rodinf} = 165 \text{ mm}$$

**Etapa 4**



$$D_{exterior} = 35 \text{ mm}$$

$$D_{interior} = 30 \text{ mm}$$

$$D_{apoyo4} = 25 \text{ mm}$$

$$L_{rodsup} = 165 \text{ mm}$$

$$L_{rodinf} = 170 \text{ mm}$$

$$\alpha = 35^\circ$$

Figura 2.8 Especificaciones geométricas de los rodillos diseñados.

Estos rodillos presentarán perfiles con geometrías distintas a los rodillos lisos utilizados en etapas anteriores. En concreto el ángulo que forman el diámetro exterior e interior es de  $35^\circ$  que resulta el ángulo óptimo para su posterior impresión en 3D. Estos rodillos permitirán crear un acabado superficial singular en el material laminado, otorgándole características especiales.

## 2.7.2. Ruedas dentadas

Una rueda dentada es un componente mecánico que se utiliza para transmitir movimiento y potencia entre ejes rotativos. La parte más importante de ellos son los dientes. Estos permiten entrelazarse con otros dientes y permitir el funcionamiento del mecanismo.

Una forma de asegurar que el engranaje sea óptimo es estudiando la geometría completa del diente. Para el diseño se han tenido en cuenta los siguientes parámetros:

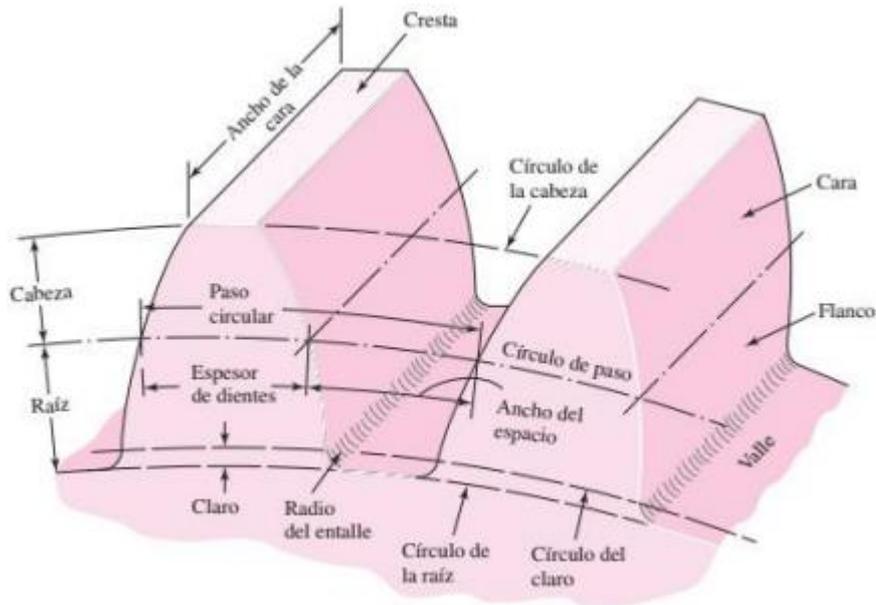


Figura 2.9 Ilustración elementos de la geometría de una rueda dentada [11]

Paso: Es la distancia axial entre dientes consecutivos que afecta directamente la relación de transmisión y el perfil del diente [12].

$$p = \frac{\pi \cdot d}{z} \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

Donde:

$p$  = el paso del diente

$d$  = el valor del diámetro primitivo

$Z$  = el número de dientes

Módulo: Una medida estandarizada que establece la relación entre el número de dientes y el diámetro primitivo del engranaje. Para que dos ruedas dentadas engranen, deben tener el mismo módulo [14].

$$p = m \cdot \pi \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

Donde:

$m$  = módulo del diente

Para ambos valores se han seleccionado valores estandarizados de paso y módulo a partir de una tabla extraída de las normas UNE 3121 [13]. Esta elección asegura coherencia con estándares industriales y facilita la integración con otros componentes.

Diámetro primitivo: Es la circunferencia imaginaria que simula el contacto que se tendría en el caso de tener dos ruedas sin dientes. Este se ubica a la mitad de la altura del diente. En este caso su valor se muestra en la Figura 2.10 y sería la distancia que existe entre ejes de los rodillos

[14].

$$D_p = R_1 + R_2 + h_f \quad (\text{Ecuación 2.15})$$

Donde:

$D_p$  = diámetro primitivo

$R_1$  = radio rodillo superior

$R_2$  = radio rodillo inferior

$h_f$  = distancia entre rodillos

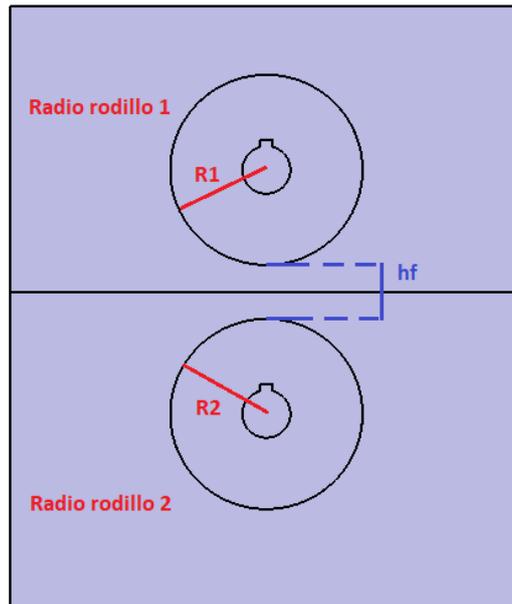


Figura 2.10 Ilustración distancia entre centros de rodillos.

Diámetro de cabeza: Correspondiente a la circunferencia que engloba la parte superior del diente [14].

$$D_e = D_p + 2 \cdot m \quad (\text{Ecuación 2.16})$$

Donde:

$D_e$  = diámetro de cabeza.

Diámetro de pie: Correspondiente a la circunferencia que engloba la base del diente [14].

$$D_i = D_p - 2,5 \cdot m \quad (\text{Ecuación 2.17})$$

Donde:

$D_i$  = diámetro de pie.

Número de dientes: Una característica que define la interacción entre engranajes y la transferencia de movimiento. Queda definido una vez calculado el diámetro primitivo y el módulo [14].

$$Z = \frac{D_p}{m} \quad (\text{Ecuación 2.18})$$

Altura de cabeza: La dimensión vertical en la parte superior del diente. Obtenido una vez seleccionado el módulo [14].

$$h_a = m \quad (\text{Ecuación 2.19})$$

Donde:

$h_a$  = altura cabeza del diente

Altura de pie: La dimensión vertical en la base del diente. Obtenido una vez seleccionado el módulo [14].

$$h_f = 1,25 \cdot m \quad (\text{Ecuación 2.20})$$

Donde:

$h_f$  = altura pie del diente

Espesor: La dimensión entre la cara frontal y la cara trasera del diente, que afecta la forma y la resistencia. Obtenido una vez calculado el paso del diente [14].

$$s = \frac{19}{40} \cdot p \quad (\text{Ecuación 2.21})$$

Ancho: La dimensión a lo largo del engranaje que determina el área de contacto entre los dientes. Obtenido una vez calculado el paso del diente [14].

$$w = \frac{21}{40} \cdot p \quad (\text{Ecuación 2.22})$$

El proceso de modelado de un engranaje con CATIA V5 suele presentar ciertas complejidades. Existen diversas aproximaciones para definir el perfil de un engranaje y en este caso, se ha optado por utilizar el método conocido como "Odontógrafo de Grant" [10].

Este método, se implementa gracias a una tabla específica conocida como la "tabla de Grant". Esta Tabla 2.2 contiene coeficientes de cabeza y base predefinidos. Estos coeficientes son seleccionados en base al número de dientes del engranaje en consideración. Cuando estos coeficientes son multiplicados por el módulo del engranaje, se obtienen los radios correspondientes a los perfiles del frente y flanco de cada diente.

Tabla de Grant (ángulo de ataque = 15°)										
No. Dientes	Coeficiente		No. dientes	Coeficiente		No. dientes	Coeficiente		No. dientes	Coeficiente Único
	Cabeza	Base		Cabeza	Base		Cabeza	Base		
10	2.28	0.69	19	3.22	1.79	28	3.92	2.59	37 – 40	4.20
11	2.40	0.83	20	3.32	1.89	29	3.99	2.67	41 – 45	4.63
12	2.51	0.96	21	3.41	1.98	30	4.06	2.76	46 – 51	5.06
13	2.62	1.09	22	3.49	2.06	31	4.13	2.85	52 – 60	5.74
14	2.72	1.22	23	3.57	2.15	32	4.20	2.93	61 – 70	6.52
15	2.82	1.34	24	3.64	2.24	33	4.27	3.01	71 – 90	7.72
19	2.92	1.46	25	3.71	2.33	34	4.33	3.09	91 – 120	9.78
17	3.02	1.57	26	3.78	2.42	35	4.39	3.16	121 – 180	13.38
18	3.12	1.69	27	3.85	2.50	36	4.45	3.23	181 – 360	21.62

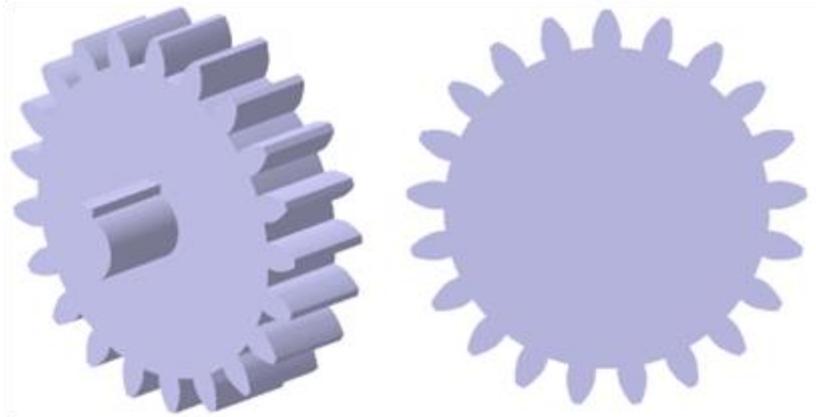
Tabla 2.2 Tabla de Grant para perfiles de ruedas dentadas [14].

$$R_a = c \cdot m \quad (\text{Ecuación 2.23})$$

$$R_f = b \cdot m \quad (\text{Ecuación 2.24})$$

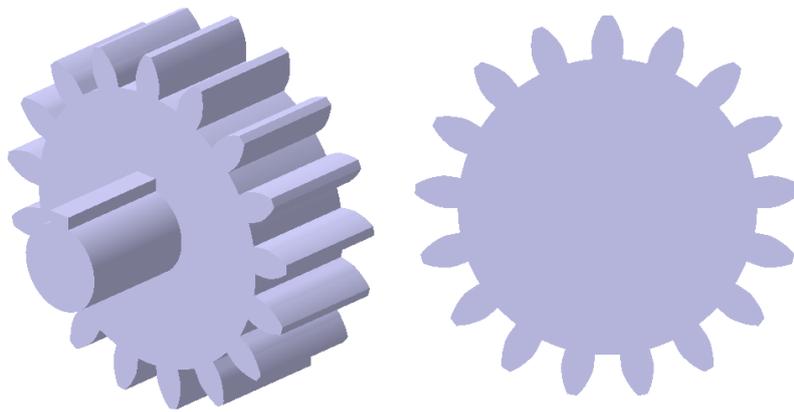
A continuación, en la Figura 2.11 se muestra el resultado del diseño gracias a los cálculos anteriores:

**Etapa 1**



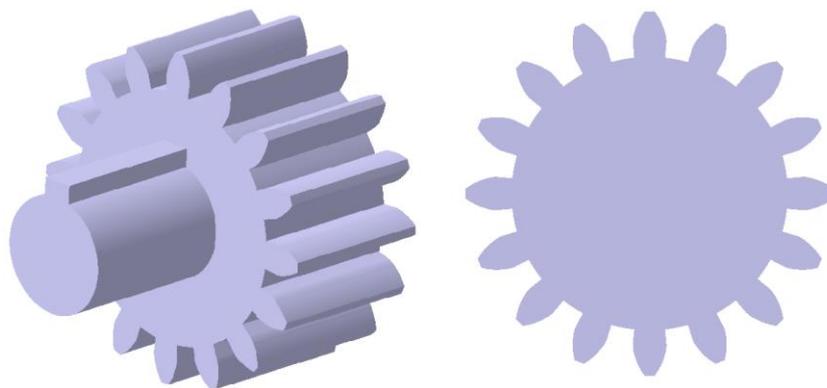
$$Z_1 = 22 \quad D_p = 77 \text{ mm} \quad D_a = 84 \text{ mm} \quad D_f = 68,25 \text{ mm}$$

**Etapa 2**



$$Z_2 = 18 \quad D_p = 55 \text{ mm} \quad D_a = 61,11 \text{ mm} \quad D_f = 47,36 \text{ mm}$$

**Etapa 3**



$$Z_3 = 16 \quad D_p = 38 \text{ mm} \quad D_a = 42,75 \text{ mm} \quad D_f = 32,06 \text{ mm}$$

*Figura 2.11 Diseño ruedas dentadas.*

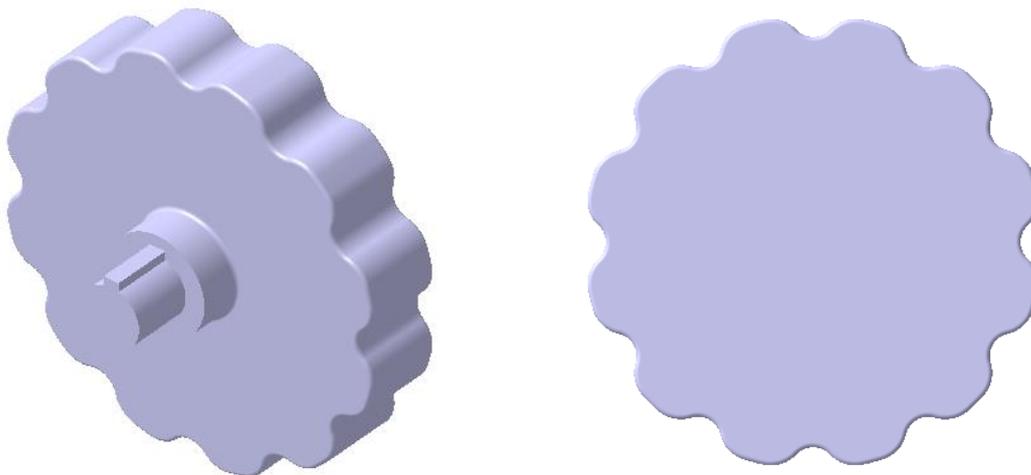
Cada etapa posee un par de engranajes con mismo número de dientes, lo que implica una relación de transmisión igual a 1:1. Esta característica tiene un impacto directo en el funcionamiento del sistema. En este caso, por cada vuelta completa que realiza uno de los engranajes, el engranaje complementario también completará una revolución entera, asegurando que no haya alteraciones en la velocidad ni en la dirección del movimiento.

Como se ha mencionado anteriormente, en el diseño de los engranajes se puede apreciar el tipo de unión prevista para su integración con los rodillos. Todo este enfoque ha sido desarrollado con el propósito de facilitar el proceso de fabricación en 3D de las piezas y evitar posibles roturas por fatiga en el futuro.

### 2.7.3. Manivela

Cada manivela circular se diseñó para proporcionar un agarre cómodo y eficiente.

En este diseño, se optó por una forma circular para las manivelas, una elección que se basa en la consideración de evitar la aplicación de fuerzas en una dirección específica que pudiera generar momentos flectores, potencialmente causando fatiga y fallos en la estructura. En el caso de la manivela, se puede observar en la Figura 2.12 que se ha considerado la misma unión de los engranajes prevista para su conexión con los rodillos.



$$D_{\text{exterior}} = 10 \text{ mm}$$

Figura 2.12 Diseño de la manivela

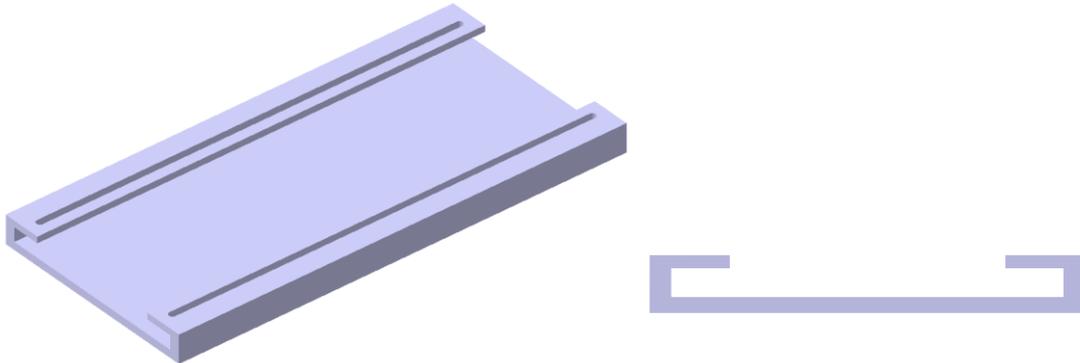
Además de la forma circular, se le dio a cada manivela un perfil redondeado, contribuyendo así a un diseño más ergonómico. Esta elección no solo optimiza la operación, sino que también busca mejorar la comodidad y la eficiencia durante la manipulación de las manivelas en cada etapa del proceso de laminado.

### 2.7.4. Base

La base del prototipo será fabricada en chapa de aluminio para asegurar el diseño de una estructura robusta. La vista en alzado presenta una geometría que permitirá la unión con las paredes laterales.

En la Figura 2.13 se puede observar como la base está equipada con una hilera que sirve como guía para las paredes laterales que sostienen los rodillos. La hilera permite la unión precisa entre la base

y las paredes laterales del prototipo. Importante destacar que las paredes cuentan con la versatilidad de ser colocadas en múltiples posiciones a lo largo de la base. Para lograr este ajuste, las paredes laterales se aseguran mediante presillas que garantizan la estabilidad y la configuración deseada del prototipo.



$$L = 640 \text{ mm} \quad W = 300 \text{ mm} \quad e = 20 \text{ mm}$$

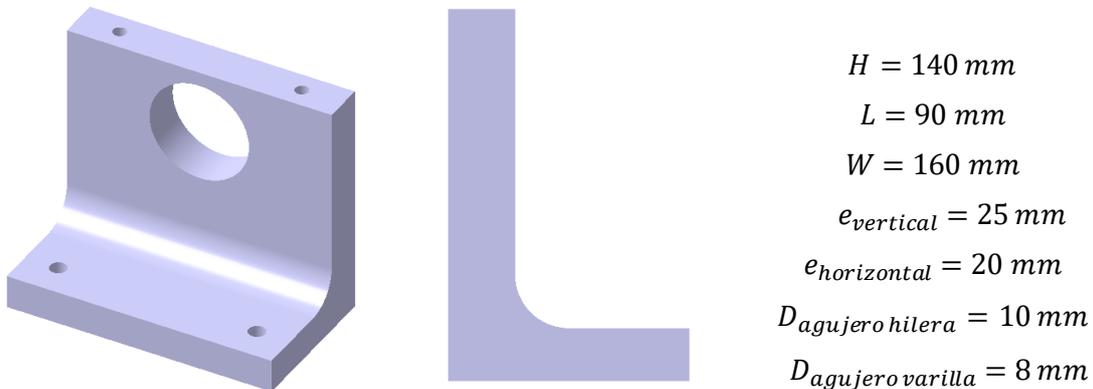
$$L_{\text{hilera}} = 600 \text{ mm} \quad W_{\text{hilera}} = 10 \text{ mm}$$

Figura 2.13 Diseño de la base.

### 2.7.5. Soportes laterales

Cada pared lateral consta de dos piezas: una superior y otra inferior. Los agujeros de montaje en la pieza superior y el agujero roscado en la pieza inferior se dimensionaron cuidadosamente para asegurar una conexión estable y ajustada.

En la Figura 2.14 se puede observar la pieza inferior que compone la pared de apoyo a los rodillos.



$$H = 140 \text{ mm}$$

$$L = 90 \text{ mm}$$

$$W = 160 \text{ mm}$$

$$e_{\text{vertical}} = 25 \text{ mm}$$

$$e_{\text{horizontal}} = 20 \text{ mm}$$

$$D_{\text{agujero hilera}} = 10 \text{ mm}$$

$$D_{\text{agujero varilla}} = 8 \text{ mm}$$

Figura 2.14 Diseño de los soportes laterales inferiores.

En la Figura 2.15 se puede observar la pieza superior que compone la pared de apoyo a los rodillos.

El diámetro del agujero de apoyo de los rodillos es diferente para cada etapa:

$$D_{\text{apoyo1}} = 60 \text{ mm} \quad D_{\text{apoyo2}} = 40 \text{ mm} \quad D_{\text{apoyo3}} = 25 \text{ mm}$$

La unión entre estas dos piezas se llevará a cabo mediante una varilla que cuenta con una punta roscada. En este sistema, el agujero presente en la pieza superior será pasante, mientras que, en la pieza inferior, el agujero estará roscado. Esta configuración garantiza un ajuste sólido y seguro entre ambas piezas, asegurando la integridad del mecanismo.

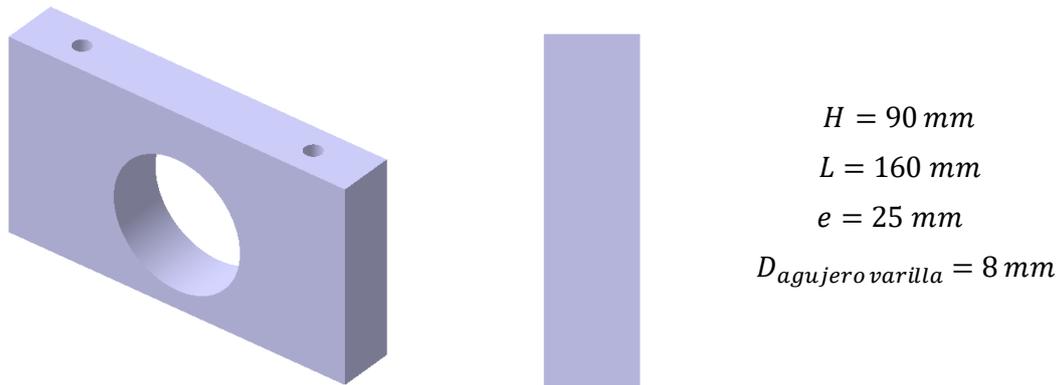
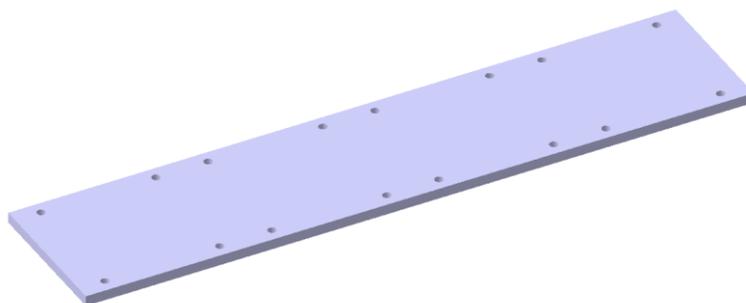


Figura 2.15 Diseño de los soportes laterales superiores.

### 2.7.6. Tapa

La tapa resulta un elemento fundamental en el prototipo que aporta rigidez al mecanismo (ver Figura 2.16). La elección del metacrilato tiene como objetivo principal facilitar la observación completa del proceso de laminado en todas y cada una de las etapas. Su propiedad de transparencia brindará la oportunidad de visualizar claramente cómo se desarrolla el proceso de reducción de espesor del material en cada etapa. Esta característica proporcionará una comprensión más profunda y visual del funcionamiento interno del tren de laminación, contribuyendo así a una experiencia de aprendizaje más efectiva y práctica para los alumnos.



$$L = 640 \text{ mm} \quad W = 140 \text{ mm} \quad e = 10 \text{ mm} \quad D_{\text{agujero}} = 8 \text{ mm}$$

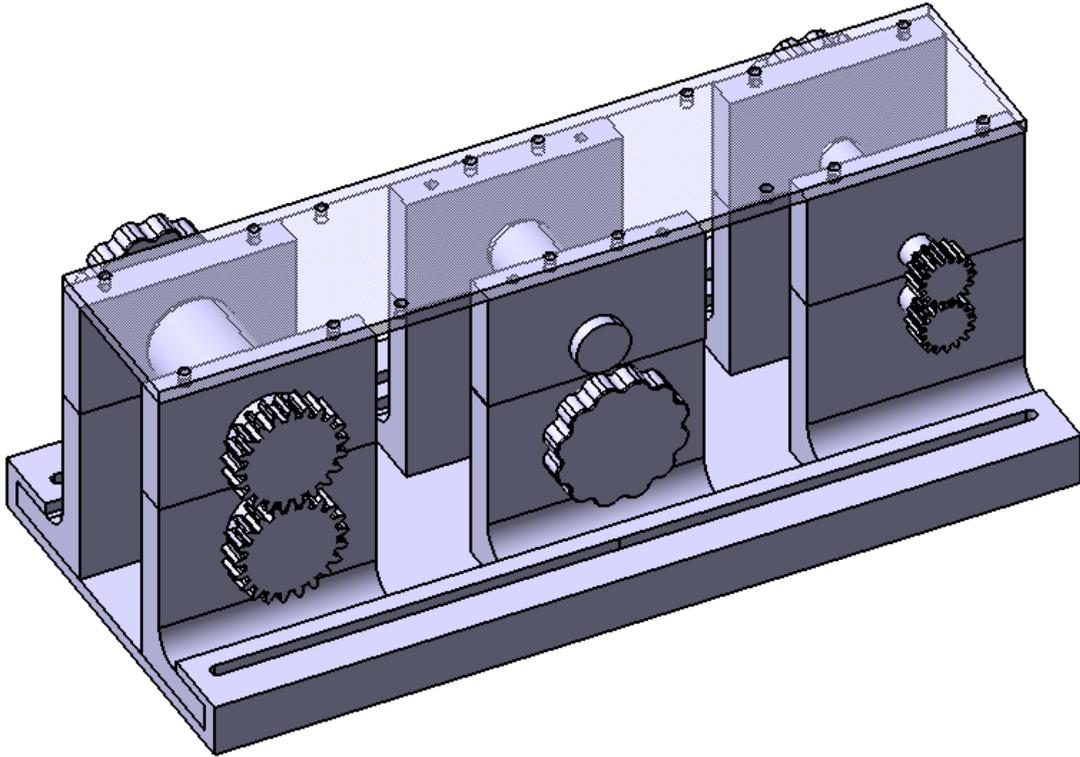
Figura 2.16 Diseño tapa del prototipo, pieza única.

En resumen, la descripción detallada de los elementos del prototipo incluye dimensiones específicas y cómo se realizaron los cálculos para obtener las dimensiones y configuraciones finales. Esta sección proporciona una comprensión exhaustiva de cómo cada componente fue diseñado y dimensionado para lograr un prototipo funcional y eficiente en el proceso de laminación.

Como se puede ver en la Figura 2.17 lo destacable de este prototipo radica en su versatilidad, ya que permite configurar las etapas en diversas posiciones, lo que permite explorar las implicaciones de cada configuración individual y la posibilidad de combinar las etapas de manera personalizada.

Esta capacidad de ajuste y configuración flexible es esencial para analizar cómo diferentes disposiciones afectan el proceso de laminado.

La imagen ilustra claramente la adaptabilidad de este prototipo, proporcionando una representación visual de una de las múltiples configuraciones posibles.



*Figura 2.17 Fotografía del prototipo final y configuración de las etapas.*

Durante el proceso de diseño, se han considerado aspectos clave que han sido fundamentales para alcanzar un prototipo de alta calidad. La prioridad central fue garantizar que el diseño fuera completamente óptimo, particularmente con la perspectiva de utilizarlo como herramienta de enseñanza. Se ha dado énfasis en lograr un equilibrio entre la funcionalidad, la integridad estructural y la facilidad de uso, con el objetivo de crear una herramienta educativa efectiva y eficiente.



## 3 Fabricación del tren de laminación

---

### 3.1. Introducción a la fabricación 3D

En la búsqueda constante de innovación y avance tecnológico en la industria del diseño y fabricación, la impresión tridimensional ha surgido como una herramienta revolucionaria que ha transformado la manera en la que concebimos la producción de piezas y prototipos.

La impresión 3D, en particular, ha demostrado ser un recurso valioso para la creación de prototipos y componentes personalizados, como los que formarán parte del tren de laminación diseñado en este proyecto.

El siguiente objetivo de este trabajo será imprimir las piezas resultantes en 3D y obtener un prototipo funcional que sirva como plataforma para la enseñanza en el campo del conformado plástico.

La integración de la impresión en 3D en este proyecto introduce un elemento innovador en el proceso. La impresión tridimensional, o fabricación aditiva, se ha convertido en una alternativa sólida a los métodos de fabricación convencionales. Su capacidad para crear objetos capa por capa a partir de diversos materiales ha demostrado su valía en la industria.

Es de importante valor el hecho de que la realización de la impresión en 3D para este proyecto ha sido posible gracias a la colaboración con la Universidad de Barcelona. El intercambio de experiencias y capacidades ha ayudado a llevar a cabo la fabricación de piezas tridimensionales de alta calidad y precisión. Este puente entre universidades ejemplifica la importancia de la colaboración en la investigación.

Dado que las piezas diseñadas para el tren de laminación eran de considerable tamaño, fue necesario emplear una impresora 3D que pudiera manejar estas dimensiones. En este sentido, la colaboración con la Universidad de Barcelona brindó acceso a una impresora 3D capaz de imprimir objetos de gran envergadura, lo que resultó fundamental para la materialización de las piezas del prototipo.

El modelo de la impresora que se ha utilizado es una 3D Creality Ender 3 Pro (ver Figura 3.1):



*Figura 3.1 Impresora Creality Ender 3 Pro [15].*

La Creality Ender 3 Pro es una impresora 3D popular y ampliamente reconocida en la comunidad de impresión 3D debido a su excelente relación calidad-precio y su rendimiento confiable.

- La Ender 3 Pro tiene un diseño de marco abierto que facilita el acceso y la observación de la impresión en curso. Esto también la hace más fácil de ensamblar y mantener [15].
- Ofrece un volumen de construcción respetable para su tamaño, lo que significa que se puede imprimir piezas relativamente grandes en comparación con otras impresoras 3D de nivel de entrada [15].
- Viene con una cama caliente que ayuda a mejorar la adherencia del material de impresión a la plataforma y reduce el riesgo de deformación en piezas grandes o con geometrías complicadas.
- La versión "Pro" de la Ender 3 incluye un extrusor mejorado, lo que facilita la carga y la extrusión del filamento, lo que conduce a una impresión más precisa y confiable [15].
- La Ender 3 Pro ha mejorado su sistema de control de ruido, lo que la hace más silenciosa en comparación con modelos anteriores [15].
- Puede imprimir con varios tipos de filamentos, incluyendo PLA, ABS, PETG y más, lo que la hace versátil para diferentes aplicaciones [15].
- Una de las principales ventajas de la Ender 3 Pro es su precio asequible en comparación con otras impresoras 3D con características similares [15].

Además del tamaño, la calidad superficial de las piezas impresas desempeñó un papel crítico en la funcionalidad y la estética del prototipo. En un tren de laminación, donde la precisión y la interacción entre piezas son esenciales, se requería un acabado superficial de alta calidad para asegurar un funcionamiento adecuado. La tecnología de impresión 3D utilizada fue capaz de proporcionar este nivel de detalle y acabado, lo que permitió la creación de piezas que no solo eran visualmente atractivas, sino también funcionales y efectivas dentro del prototipo.

### **3.2. Pasos para la fabricación del prototipo**

Los pasos para imprimir una pieza en 3D pueden variar según la impresora que se utilice, pero en el caso de este proyecto, los pasos generales que se han llevado a cabo han sido:

- Diseño de la pieza: Utilizar CATIA V5 como software de modelado 3D para diseñar las piezas [3].
- Exportar el modelo: Una vez diseñadas las piezas, exportar el modelo en un formato compatible con la impresora 3D, en este caso formato STL. Este formato contiene la información geométrica necesaria para imprimir la pieza [3].
- Preparación del modelo: Se importa el archivo STL en Ultimaker Cura. En este software, se pueden realizar ajustes para preparar el modelo para la impresión. Esto incluye orientar la pieza, ajustar la escala si es necesario y agregar soportes donde sea requerido [3].
- Configuración de la impresión: Configurar los parámetros de impresión en el software de preparación. Esto incluye ajustar la temperatura de extrusión, la velocidad de impresión, la densidad de relleno y otros ajustes específicos de la impresora y del material [3].
- Slicing: Es un proceso donde el software de preparación divide el modelo en capas y genera un archivo G-code que contiene las instrucciones detalladas para la impresora 3D. Este archivo se carga en la impresora [3].
- Preparación de la impresora: Asegurarse de que todo esté en condiciones óptimas para comenzar la impresión, como la calibración de la misma [3].
- Monitoreo del proceso: Durante la impresión, cerciorarse de que todo esté yendo bien. Por último, se retira con cuidado la pieza de la plataforma de impresión y se retiran los soportes.

- Post-Procesamiento: Se lijan las piezas para un acabado superficial deseado [3].

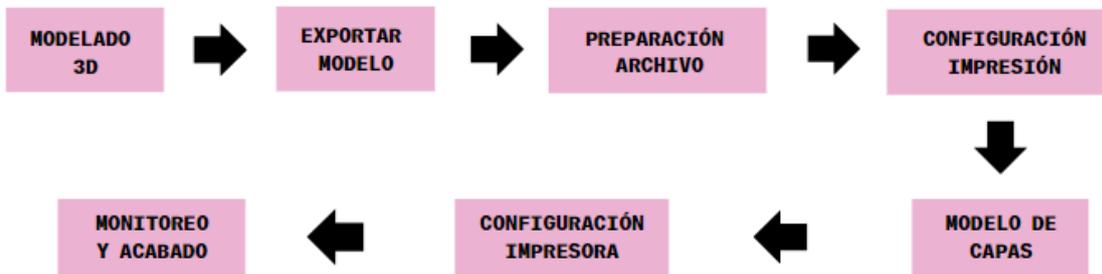


Figura 3.2 Esquema procesos impresión 3D

### 3.3. Aspectos a tener en cuenta del diseño

En las etapas iniciales, el enfoque se orientó hacia una máquina de una sola etapa, como ya se mencionó en el primer capítulo. Esta propuesta inicial implicaba una configuración de ajuste de distancia entre rodillos. Esta distancia se controlaba mediante un juego de manivelas en la parte superior y una estructura mecánica más compleja como se muestra en la Figura 3.3:

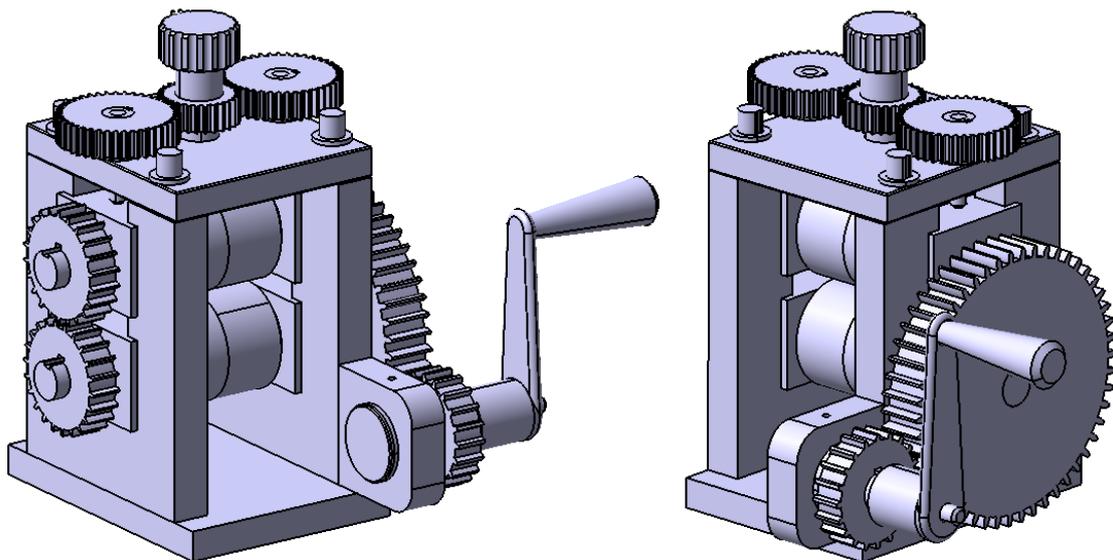


Figura 3.3 Fotografía del diseño del primer prototipo

Sin embargo, con la posibilidad de la impresión en 3D en mente del prototipo, se optó por un enfoque en forma de tren de laminado con múltiples etapas. Cada etapa fue concebida como una entidad completamente independiente de las demás, con una disposición de rodillos fijos para asegurar una geometría más sencilla en relación con la impresión en 3D. Este diseño presentó una ventaja crucial ya que la uniformidad en las etapas permitió un enfoque simplificado para su implementación en la fabricación.

Adicionalmente, esta configuración ofrece la posibilidad de ajustar y variar la distancia entre etapas según los requerimientos del estudio. Esto permitiría a los estudiantes explorar cómo evoluciona el espesor de la plastilina a medida que atravesase cada etapa del proceso de laminación. La principal fuente de estudio se centra en analizar cómo el cambio de espesor se relaciona con los distintos parámetros y variables del proceso, ofreciendo una experiencia práctica de estudio que complementa el aprendizaje teórico del conformado plástico.

Para la cuestión de los rodillos, es relevante destacar que el diseño del diámetro de los apoyos de los rodillos ha sido estratégicamente pensado. Se estableció que, la diferencia del diámetro de la zona de contacto con el material y el diámetro de la zona de los soportes del rodillo, no debería superar los 5 mm como se puede ver en la Figura 3.4. Evitar cambios drásticos en el diámetro contribuye no solo a una impresión más precisa, sino también a una funcionalidad coherente y un rendimiento óptimo en el prototipo final. Es decir, en el caso de los rodillos de este proyecto:

$$D_{\text{superficie contacto material}} = D_{\text{superficie apoyo}} - 5 \text{ mm}$$

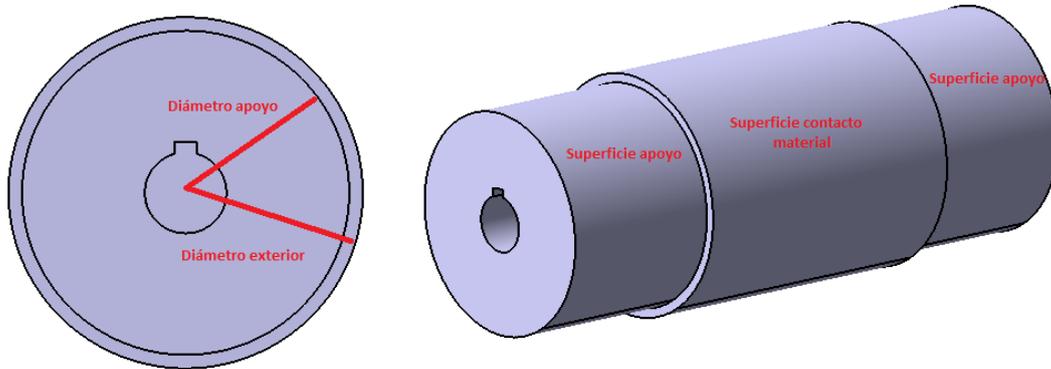


Figura 3.4 Fotografía de la diferencia entre diámetros en los rodillos.

Además, la configuración de la unión entre la manivela y el engranaje (ver Figura 3.5) con los rodillos se ha realizado de manera en la que, es la manivela y el engranaje, los componentes que encajan en el rodillo (ver Figura 3.6), asegurando una conexión sólida y funcional entre estas partes clave del mecanismo. Esta configuración está pensada para garantizar la resistencia a la fatiga de los elementos y las uniones.



Figura 3.5. Fotografía método de unión rueda dentada y manivela.

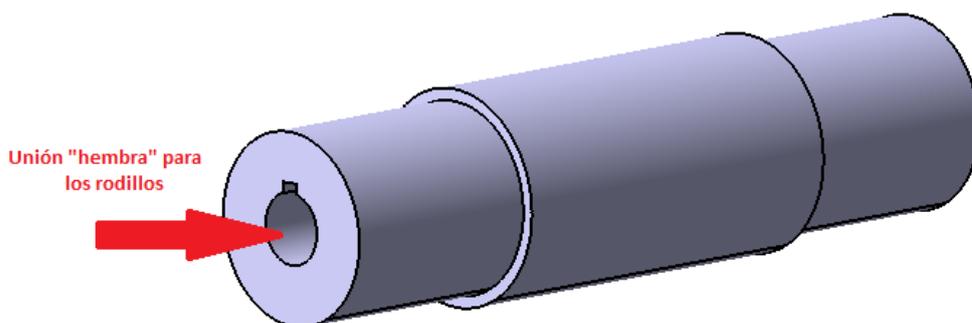


Figura 3.6. Fotografía método de unión rodillos.

Para la configuración de los rodillos de forma y su posterior impresión 3D, se observa en la figura 3.7 que su geometría distinta a los rodillos lisos utilizados en etapas anteriores se planteó de la siguiente manera. En concreto, el ángulo que forman el diámetro exterior e interior es de  $35^\circ$  que resulta el ángulo óptimo del perfil para su impresión. Estos rodillos permitirán crear un acabado superficial singular en el material laminado, otorgándole características especiales.

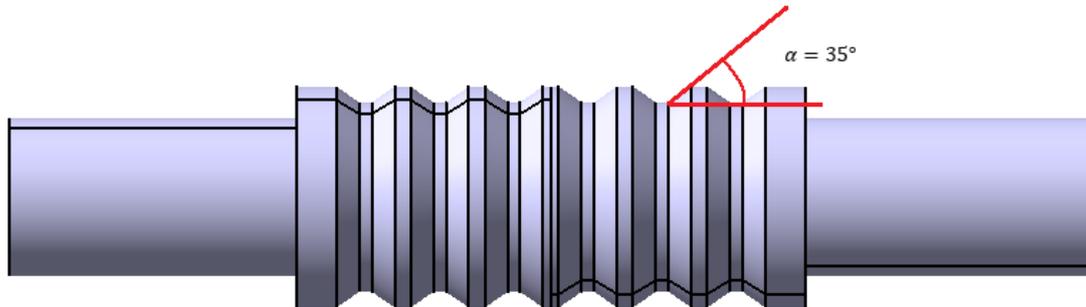


Figura 3.7 Fotografía del ángulo que forma el perfil interior del rodillo de forma.

En resumen, el diseño de ciertas piezas posee un claro enfoque centrado en su posterior impresión en 3D. Además, ejemplifica una planificación para garantizar una funcionalidad óptima y una resistencia a fatiga adecuada en el prototipo.

### 3.4. Resultado final

La culminación de este proyecto se refleja en la fase de fabricación de las piezas esenciales de nuestro tren de laminación, concebido previamente mediante el software CATIA V5.

Durante las etapas iniciales de nuestro proyecto, se mostró la tarea de diseñar un tren de laminación que sirviera como herramienta educativa para el estudio de procesos de conformado plástico. Ahora, tras la finalización de la fase de diseño, se visualizarán la fabricación de las piezas que componen la etapa 1 de este dispositivo.

En este punto, se presentarán los resultados de la fabricación de estas piezas clave, y se harán de una manera visual a través de fotografías que capturan el proceso de fabricación y el estado final de las piezas. Estas imágenes son testigos visuales de los logros que se han alcanzado en la investigación.

Estos resultados representan un hito significativo en el camino hacia la creación de una herramienta educativa que promete mejorar la enseñanza de los procesos de laminación en entornos académicos. La fabricación exitosa de estas piezas, documentada en las fotografías que se presentan, sienta las bases para futuras pruebas y experimentos, así como para la consecución de nuestros objetivos finales.

Cada etapa del tren de laminación está compuesta por las siguientes piezas fabricadas en 3D: dos soportes laterales inferiores, dos paredes laterales superiores, dos rodillos, dos ruedas dentadas y una manivela.

En la Figura 3.8 se exhiben el soporte lateral superior, un par de ruedas dentadas y la manivela:



Figura 3.8 Piezas que componen la primera etapa del tren de laminación.

En la Figura 3.9 se muestra una rueda dentada y la manivela:

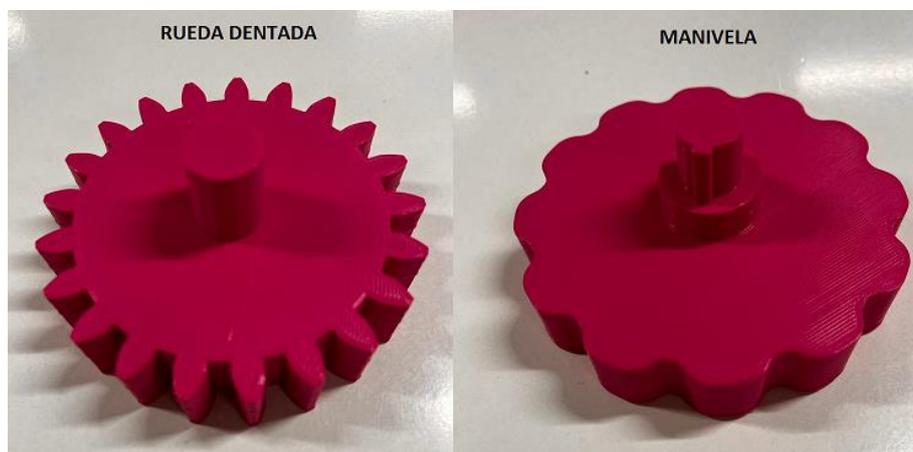
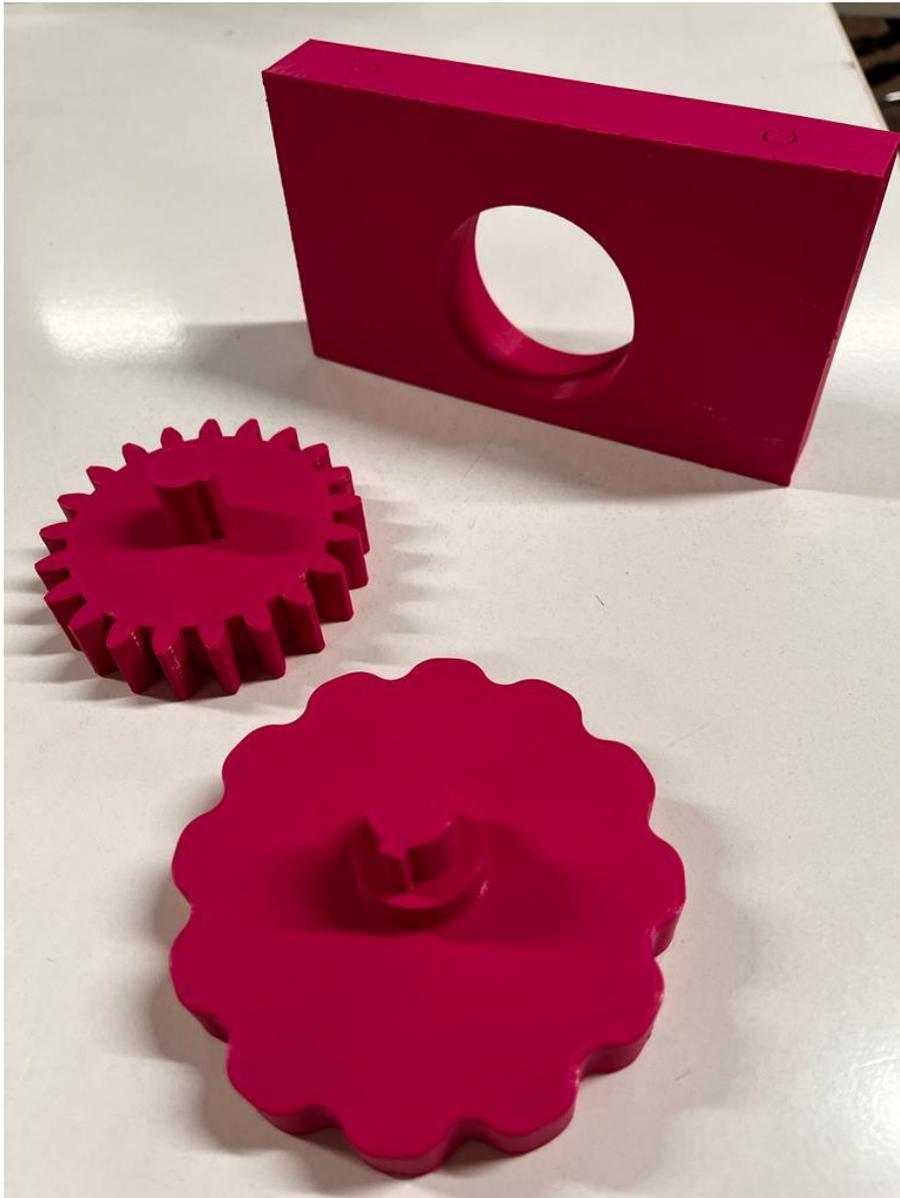


Figura 3.9 Rueda dentada y manivela

En la Figura 3.10 se muestra un soporte lateral superior, una rueda dentada y la manivela:



*Figura 3.10 Soporte lateral superior, rueda dentada y manivela.*



## 4 Propuesta de práctica de laboratorio

---

En este punto, se presentan propuestas específicas de ejercicios a realizar por los estudiantes en las prácticas de laboratorio, usando el equipo y destacando su utilidad para el aprendizaje práctico y la comprensión de los procesos de laminación. Cada práctica propuesta se enfocará en un aspecto particular del proceso de laminación, permitiendo a los estudiantes explorar, analizar y aprender de manera efectiva.

Es importante que a los estudiantes se les proporcione una guía detallada para cada práctica, asegurándose de que comprendan los objetivos, los procedimientos y las expectativas. A continuación, se presentan propuestas de ejercicios que podrían realizarse de cara a las prácticas de laboratorio.

Se parten de probetas hechas con plastilina, de sección rectangular, con anchos adecuados al ancho del equipo y espesores de entrada variables para los estudios que se quieran realizar.

---

Ejercicio 1: Influencia de la reducción de espesor	Se laminarán probetas con iguales espesores de entrada, pero con distancias entre rodillos variables para ver cómo influye la reducción de espesor en el ensanchamiento, en la fuerza a emplear para hacer el proceso, y en las deformaciones que tendrán lugar en el producto laminado.
Ejercicio 2: Variación del diámetro de los rodillos	Se variarán los diámetros de los rodillos para iguales condiciones de reducción de espesor para estudiar el efecto de la no homogeneidad y de la fricción.
Ejercicio 3: Influencia de la lubricación en el proceso	Para las mismas condiciones de laminación, se harán procesos en seco y lubricados para ver el efecto que esto tiene sobre la fuerza y el estado final del producto laminado.
Ejercicio 4: Laminado de forma	Hacer una demostración de un proceso de laminado de forma.

---

Después de cada práctica, los estudiantes pueden presentar sus resultados, analizar las conclusiones y discutir cómo se pueden aplicar en situaciones industriales reales.



## 5 Conclusiones

---

La culminación del diseño del tren de laminación ha sido acompañada de notables logros. En este proceso, he adquirido habilidades valiosas en el manejo de CATIA, así como una apreciación más profunda de la trascendencia del diseño en el ámbito de la fabricación. Además, este trayecto me ha permitido fortalecer mi comprensión de las aplicaciones matemáticas en contextos reales.

En cuanto al impacto potencial de este equipo en el ámbito para el cual fue concebido, se anticipa un efecto altamente positivo. Se espera que el prototipo juegue un papel esencial en la enseñanza y comprensión de los conceptos de conformado plástico, específicamente en el contexto de la laminación.

Con su enfoque didáctico, se prevé que el tren de laminado contribuirá de manera significativa al enriquecimiento del aprendizaje de los alumnos, proporcionándoles una visión práctica y tangible de los principios involucrados en el proceso de laminación.

La versatilidad del prototipo, que permite realizar cálculos, brinda a los estudiantes la oportunidad de realizar experimentos significativos.

La capacidad de desmontaje del laminador y la opción de configuraciones variables hace que los estudiantes puedan estudiar cada componente del proceso de laminación de manera detallada.

La elección de la plastilina como material de trabajo es acertada para fines educativos, ya que es económica y ampliamente accesible. Esto garantiza que el equipo pueda ser utilizado en una variedad de entornos educativos.

Es importante que a los estudiantes cuenten con un aprendizaje adquirido a través de metodologías prácticas. Este método puede ser mucho más efectivo y duradero que el aprendizaje puramente teórico. Los estudiantes recuerdan y comprenden mejor cuando aplican activamente lo que han aprendido. Gracias a ellas, se aseguran de que comprendan los objetivos y los procedimientos. Esto les ayudará a desarrollar habilidades de diseño experimental y resolución de problemas.



## 6 Bibliografía

- [1] Espinosa Escudero, María del Mar. Introducción a los procesos de fabricación. Año 2000. Editorial UNED. Disponible: <https://www.worldcat.org/es/title/46865042>
- [2] Julián Rodríguez Montes, Lucas Castro. Procesos industriales para materiales metálicos. Año 2023. Editorial CEO. Disponible: [https://books.google.co.ve/books?id=SVBGgraQiREC&printsec=copyright&source=gbs\\_pu\\_b\\_info\\_r#v=onepage&q&f=false](https://books.google.co.ve/books?id=SVBGgraQiREC&printsec=copyright&source=gbs_pu_b_info_r#v=onepage&q&f=false)
- [3] Implementación de la impresión 3D en la fabricación, "Tool and Manufacturing Engineers Handbook" de William H. Cubberly y Ramón Bakerjian. Año 1983. Editorial: Society of Manufacturing Engineers. Disponible: <https://www.worldcat.org/es/title/927528454>
- [4] Amazon (Año 2023). *Imagen laminadora para metales, herramienta usada en joyerías* (Figura 1.1). Extraído de: [https://p-y3-www-amazon-es-kalias.amazon.es/Vevor-laminaci%C3%B3n-combinaci%C3%B3n-herramienta-herramientas/dp/B0865WP3PG/ref=sr\\_1\\_8?mk\\_es\\_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=1S8JMU9WC7NUV&keywords=laminadora%2Bjoyeria&qid=1692871974&sprefix=laminadora%2Bjoyeria%2Caps%2C164&sr=8-8&ufe=app\\_do%3Aamzn1.fos.5e544547-1f8e-4072-8c08-ed563e39fc7d&th=1](https://p-y3-www-amazon-es-kalias.amazon.es/Vevor-laminaci%C3%B3n-combinaci%C3%B3n-herramienta-herramientas/dp/B0865WP3PG/ref=sr_1_8?mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=1S8JMU9WC7NUV&keywords=laminadora%2Bjoyeria&qid=1692871974&sprefix=laminadora%2Bjoyeria%2Caps%2C164&sr=8-8&ufe=app_do%3Aamzn1.fos.5e544547-1f8e-4072-8c08-ed563e39fc7d&th=1)
- [5] Procesos industriales para materiales metálicos de Rodríguez Montes, Julián Castro Martínez, Lucas, y Real Romero, Juan Carlos del. Año 2006. Editorial: Vision Net. Disponible: [https://books.google.co.ve/books?id=SVBGgraQiREC&printsec=copyright&source=gbs\\_pu\\_b\\_info\\_r#v=onepage&q&f=false](https://books.google.co.ve/books?id=SVBGgraQiREC&printsec=copyright&source=gbs_pu_b_info_r#v=onepage&q&f=false)
- [6] Universidad Nacional Mayor de San Marcos, UNMSM, Física I, capítulo 5. Teoría parámetros geométricos que influyen en el proceso de laminado. Extraído de: <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-mayor-de-san-marcos/fisica-1/04-mpm-cap5-laminacion-42-pag/8780006>
- [7] WordPress, metales ferrosos (Año 2023). *Imagen tren de laminación y sus etapas*. (Figura 2.2). Extraído de: <https://metalesferrosos.wordpress.com/2017/06/07/fases-del-proceso-de-laminacion/>
- [8] Wikipedia (Año 2023). *Imagen parámetros de laminación*. (Figura 2.3). Extraído de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Esquema-rodillos-laminado.jpg>
- [9] COLD ROLLING OF STEEL de William L, Roberts, editado por Geoffrey Boothroyd y George E. Dieter. Año 1978. Editorial: Marcel Dekker, Inc. Disponible: [Download PDF - Cold Rolling Of Steel. \[PDF\] \[46d5ung4m780\] \(vdoc.pub\)](#)
- [10] CATIA V5-6R2014 for Designers de Tickoo, Sham. Año 2015. Editorial: Indiana: CADCIM Technologies. Disponible: <https://www.worldcat.org/es/title/922689559>
- [11] Diseño en ingeniería mecánica de Shigley de Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett. Año 2008. Editorial McGraw-hill Interamericana, 8ª Edición. *Imagen componentes a tener en cuenta en la geometría y diseño de ruedas dentadas*. (Figura 2.9). Extraído de: [- 39 -](https://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2015/03/disec3b1o-en-ingenierc3ada-</a></li></ol></div><div data-bbox=)

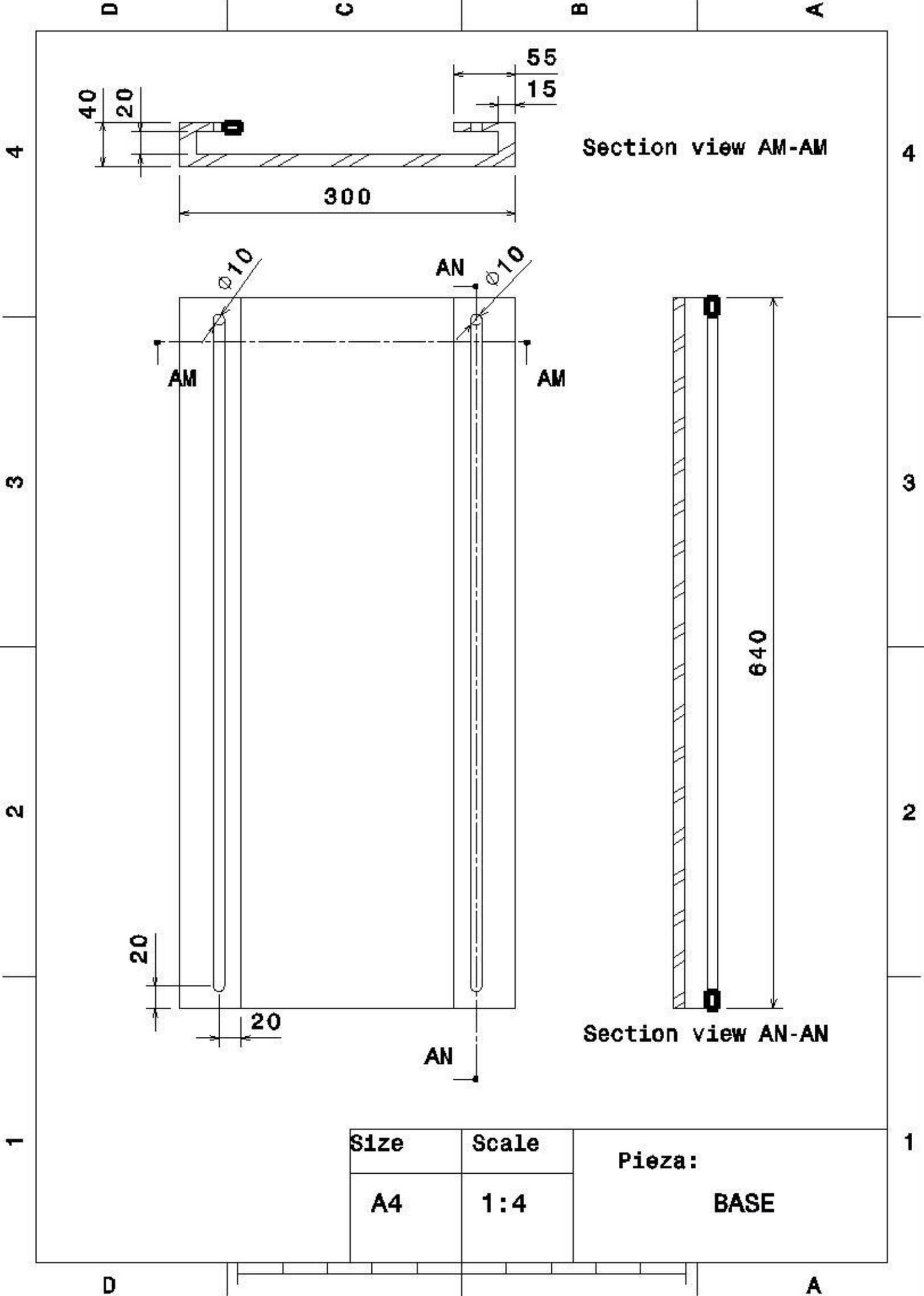
- [mecc3a1nica-de-shigley-8-edicic3b3n-budynas.pdf](https://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2015/03/disec3b1o-en-ingenierc3ada-mecc3a1nica-de-shigley-8-edicic3b3n-budynas.pdf)
- [12] Diseño en ingeniería mecánica de Shigley de Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett. Año 2008. Editorial McGraw-hill Interamericana, 8ª Edición. Disponible: <https://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2015/03/disec3b1o-en-ingenierc3ada-mecc3a1nica-de-shigley-8-edicic3b3n-budynas.pdf>
- [13] Adrián Pérez. Engranajes ANSI ISO, capítulo 18. UNI 3521, tabla 18.1. *Tabla valores módulo y paso normalizados para el diseño de las ruedas dentadas*. Extraído de: <https://es.slideshare.net/adrianperezdi/engranajes-ansi-e-iso>
- [14] Adrián Pérez. Engranajes ANSI ISO, capítulo 18. *Tabla de Grant para el diseño del perfil del diente de las ruedas dentadas*. (Tabla 2.2). Extraído de: <https://es.slideshare.net/adrianperezdi/engranajes-ansi-e-iso>
- [15] Manual de usuario de la impresora 3D Creality Ender 3D (Año 2019). *Imagen y características impresora 3D Creality Ender 3 Pro*. Extraído de: <https://www.bidcom.com.ar/manuales/IMP3D002.pdf>

En esta sección, se presentan los planos detallados de las diversas piezas que componen el prototipo diseñado utilizando el apartado de *Drawing* de CATIA V5. Los planos desempeñan un papel fundamental en la comunicación precisa de las características geométricas y dimensionales de cada componente, proporcionando una representación visual completa. Estos planos permiten una comprensión clara de la estructura y diseño del prototipo, así como de las relaciones y proporciones entre las diferentes partes.

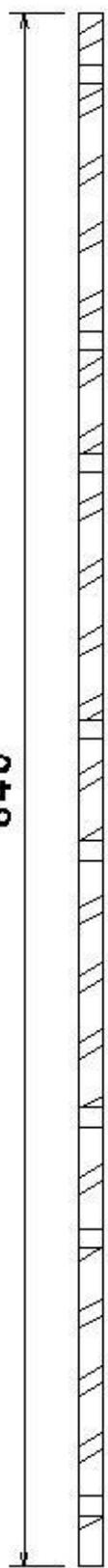
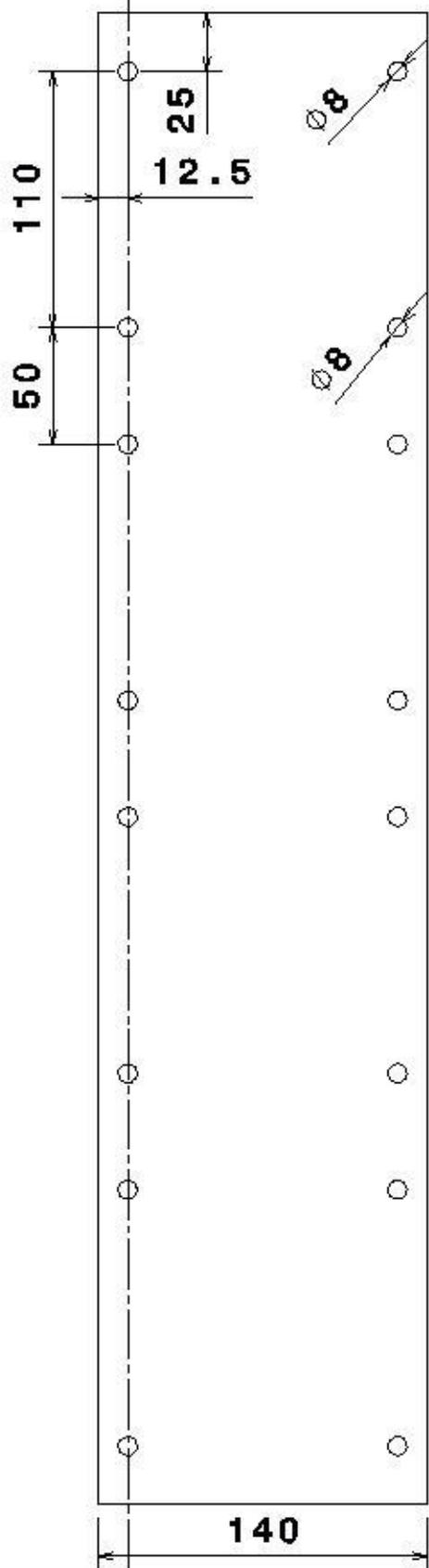
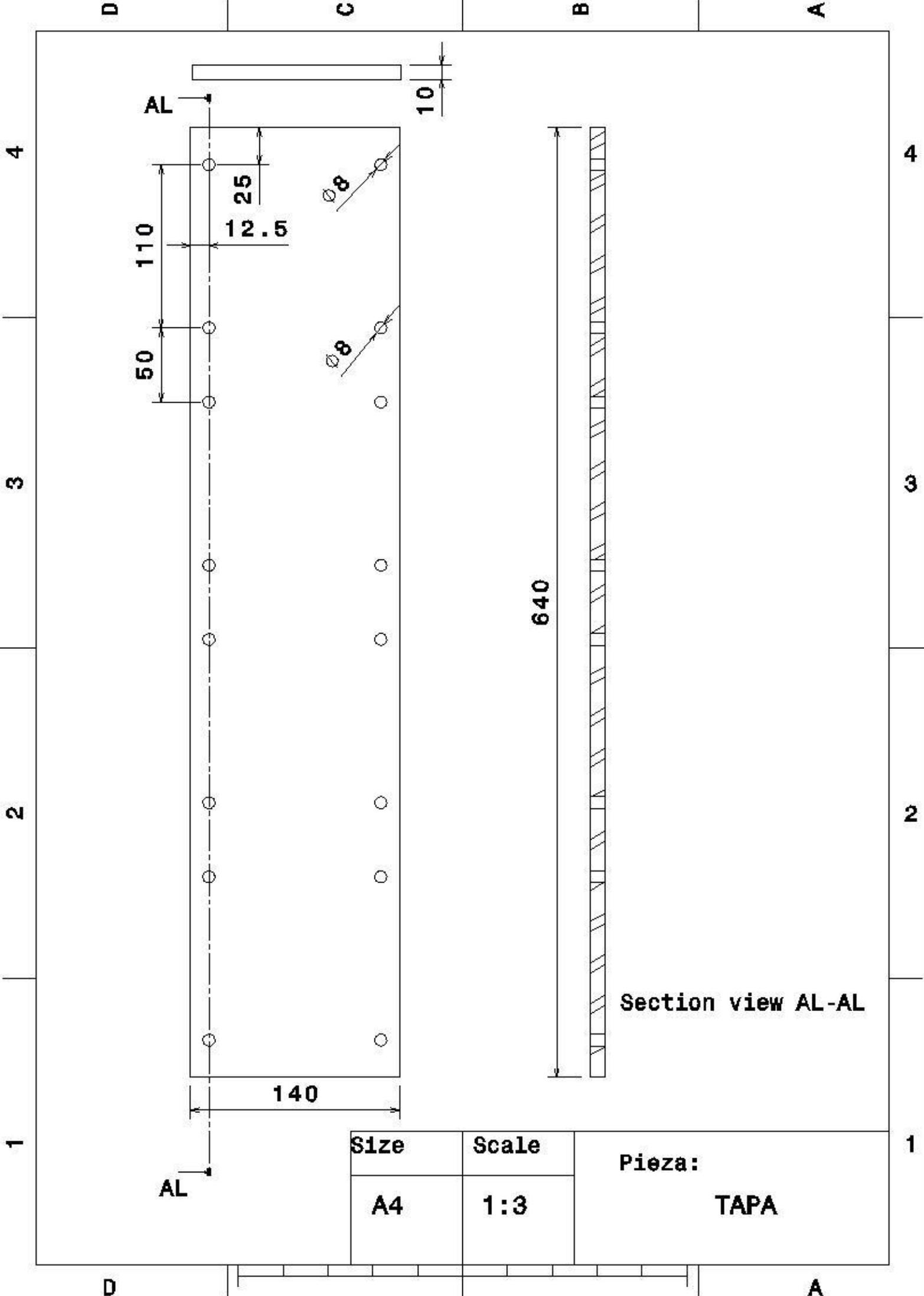
A continuación, se presenta el listado de las piezas contempladas en esta sección:

- Plano 1: BASE
- Plano 2: TAPA
- Plano 3: LATERAL SUPERIOR ETAPA 1
- Plano 4: LATERAL INFERIOR ETAPA 1
- Plano 5: LATERAL SUPERIOR ETAPA 2
- Plano 6: LATERAL INFERIOR ETAPA 2
- Plano 7: LATERAL SUPERIOR ETAPA 3-4
- Plano 8: LATERAL INFERIOR ETAPA 3-4
- Plano 9: RODILLO SUPERIOR ETAPA 1
- Plano 10: RODILLO INFERIOR ETAPA 1
- Plano 11: RODILLO SUPERIOR ETAPA 2
- Plano 12: RODILLO INFERIOR ETAPA 2
- Plano 13: RODILLO SUPERIOR ETAPA 3
- Plano 14: RODILLO INFERIOR ETAPA 3
- Plano 15: RODILLO SUPERIOR ETAPA 4
- Plano 16: RODILLO INFERIOR ETAPA 4
- Plano 17: ENGRANAJE ETAPA 1
- Plano 18: ENGRANAJE ETAPA 2
- Plano 19: ENGRANAJE ETAPA 3-4
- Plano 20: MANIVELA

La presentación de este repertorio de planos no solo proporciona una comprensión visual precisa, sino que también subraya la importancia de la documentación técnica en la implementación del prototipo.

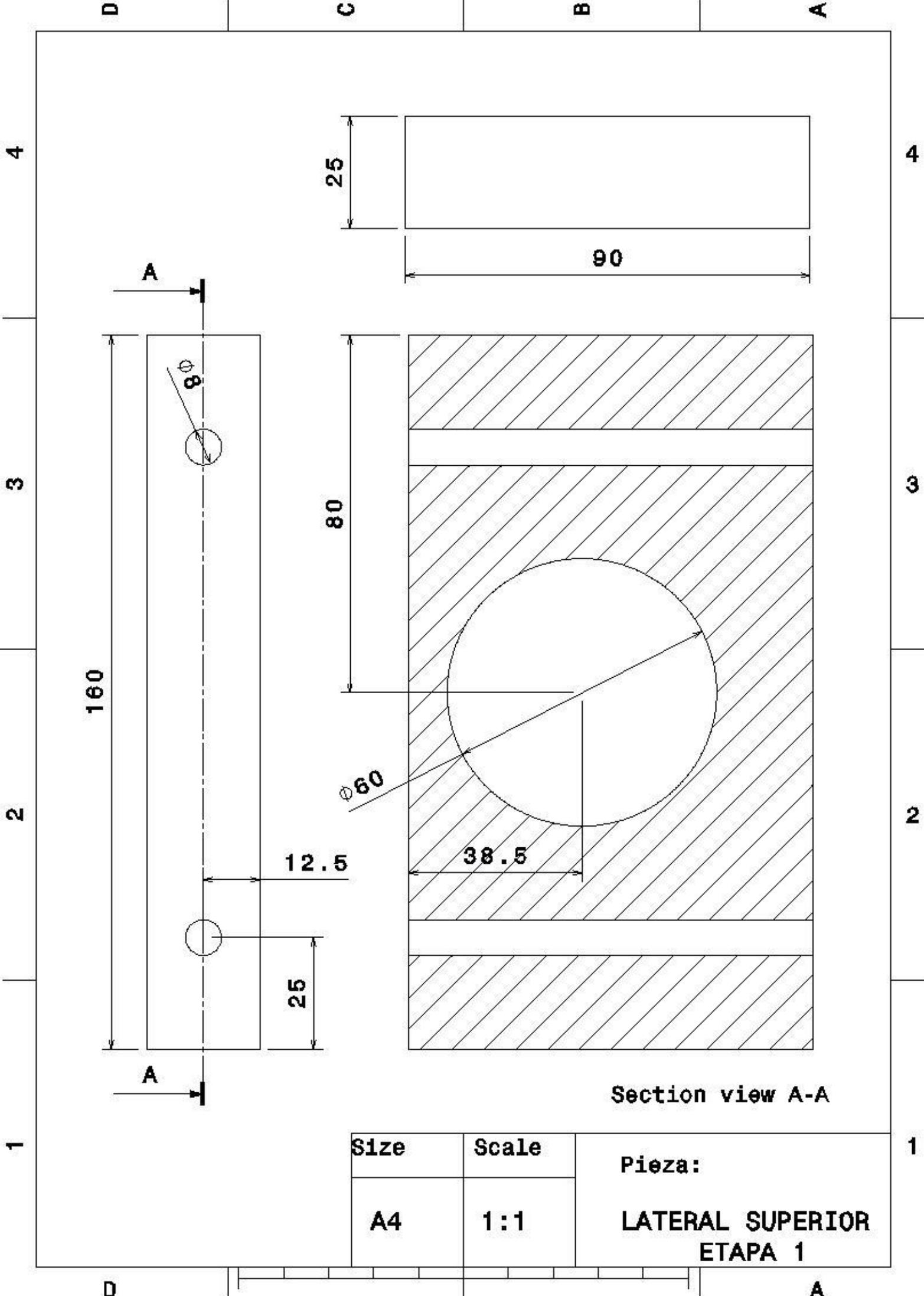


Size	Scale	Pieza: <b>BASE</b>
A4	1:4	



Section view AL-AL

Size	Scale	Pieza: <b>TAPA</b>
A4	1:3	



Section view A-A

Size	Scale	Pieza: <b>LATERAL SUPERIOR ETAPA 1</b>
A4	1:1	

D

A

D

C

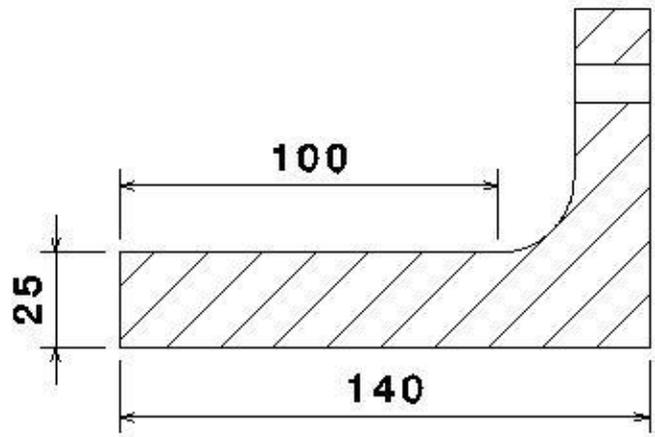
B

A

4

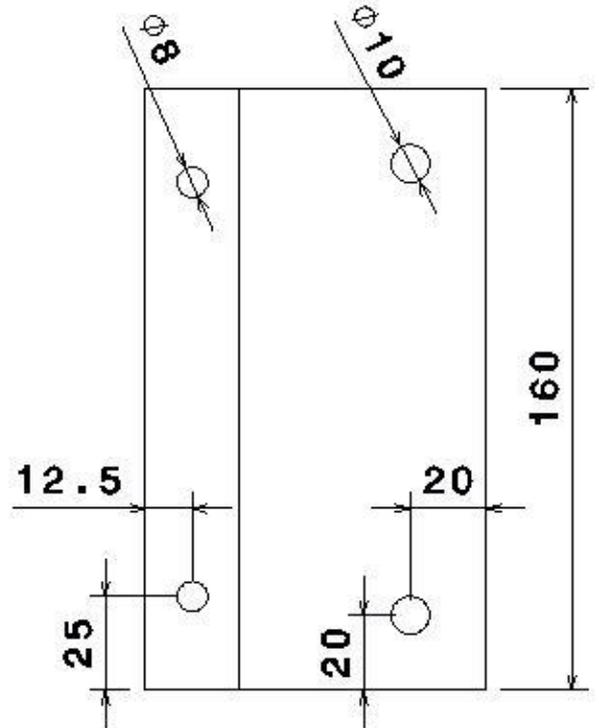
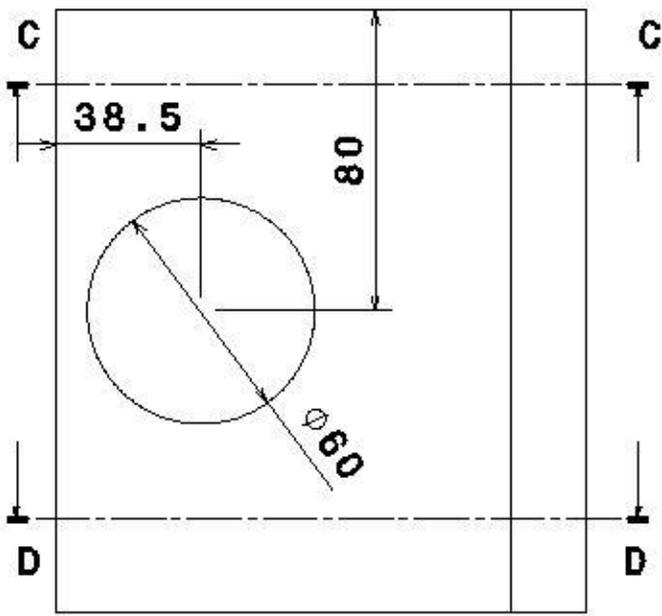
4

Section view C-C



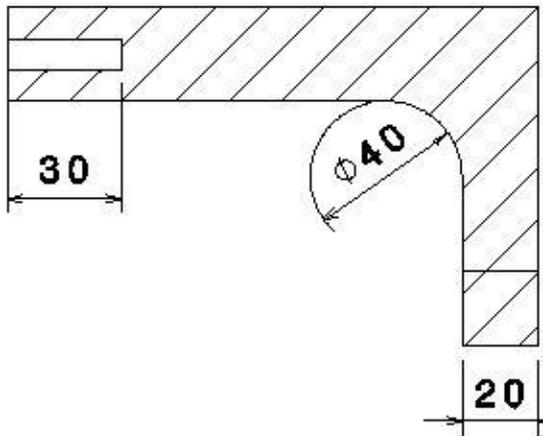
3

3



2

2



Section view D-D

1

1

Size	Scale	Pieza: <b>LATERAL INFERIOR ETAPA 1</b>
A4	1:2	

D

A

D

C

B

A

4

4

3

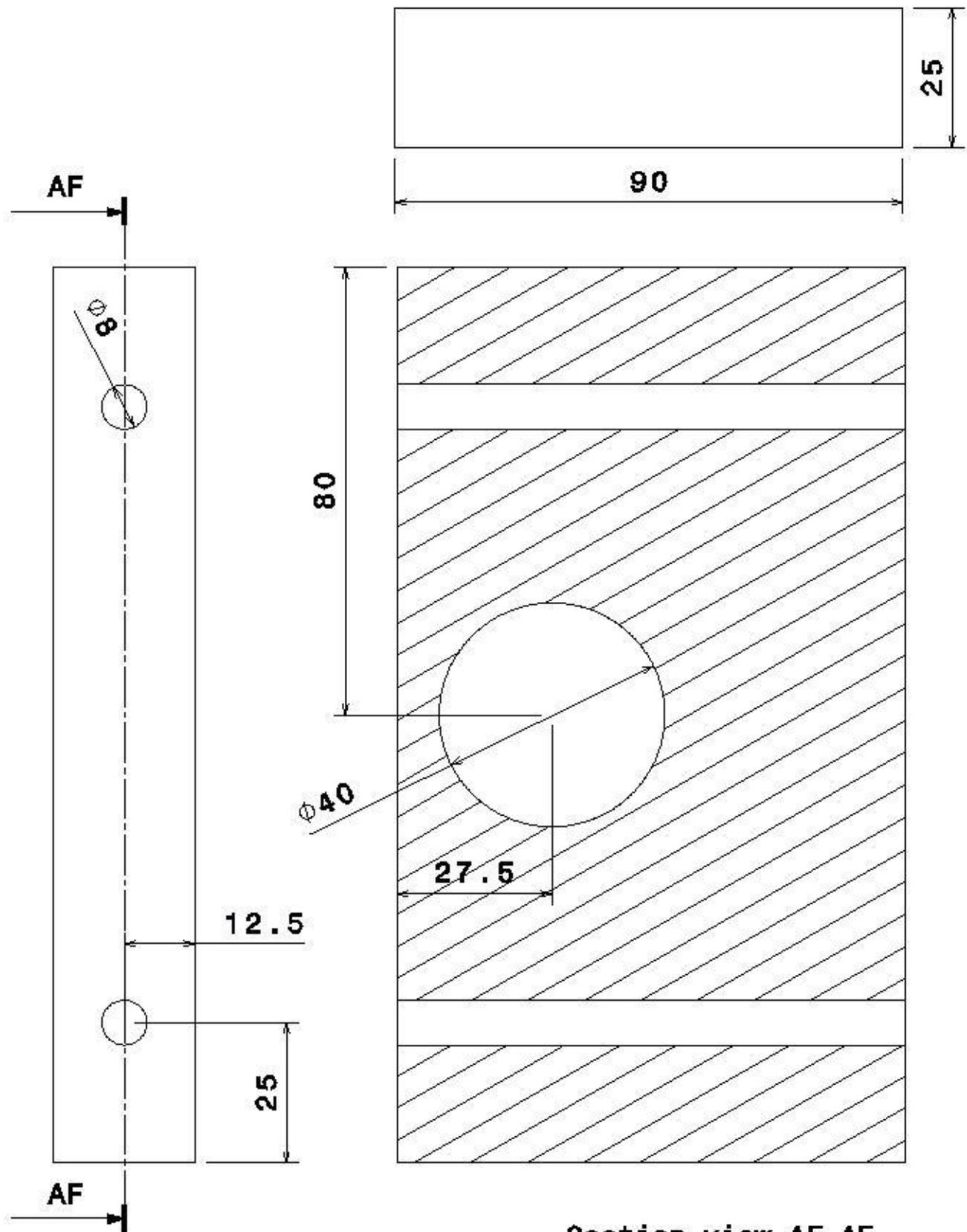
3

2

2

1

1



Section view AF-AF

Size	Scale	Pieza:
A4	1:1	

D

A

D

C

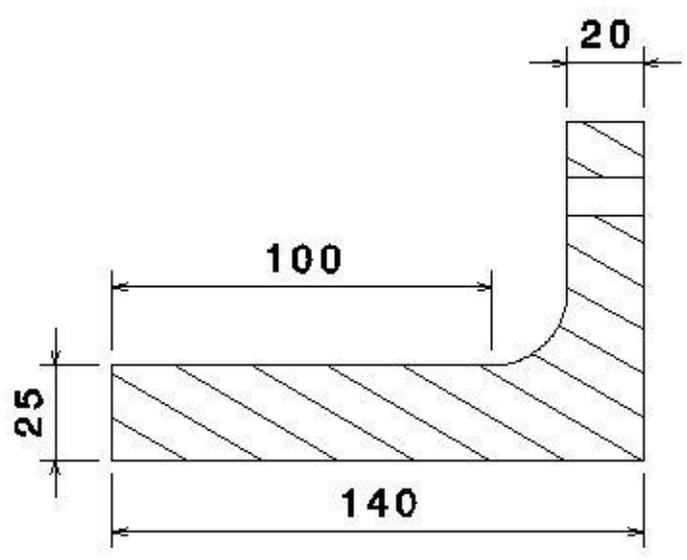
B

A

4

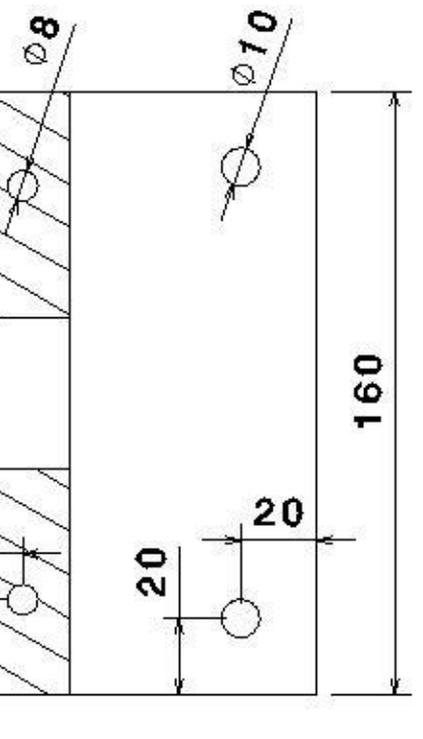
4

Section view AD-AD



3

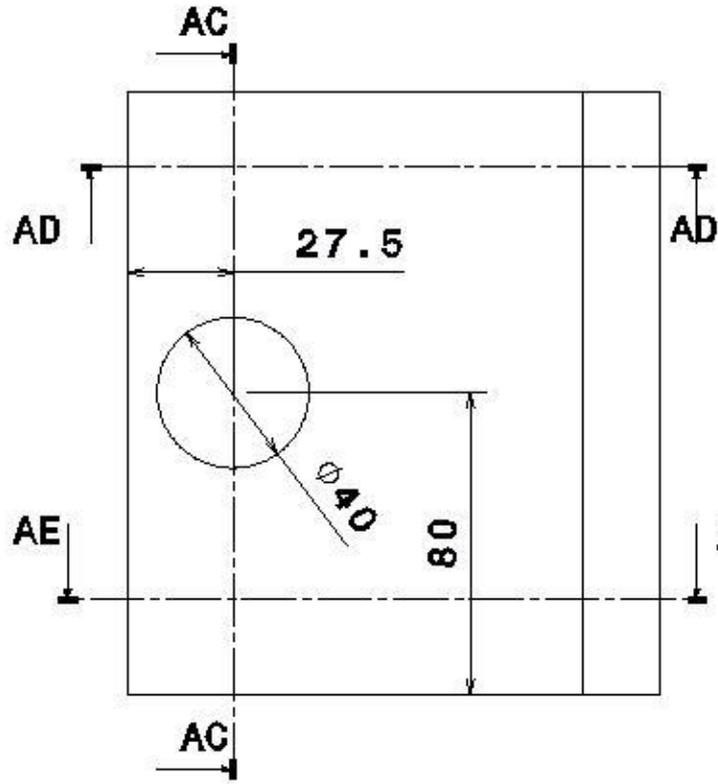
3



Section view AC-AC

2

2



Section view AE-AE

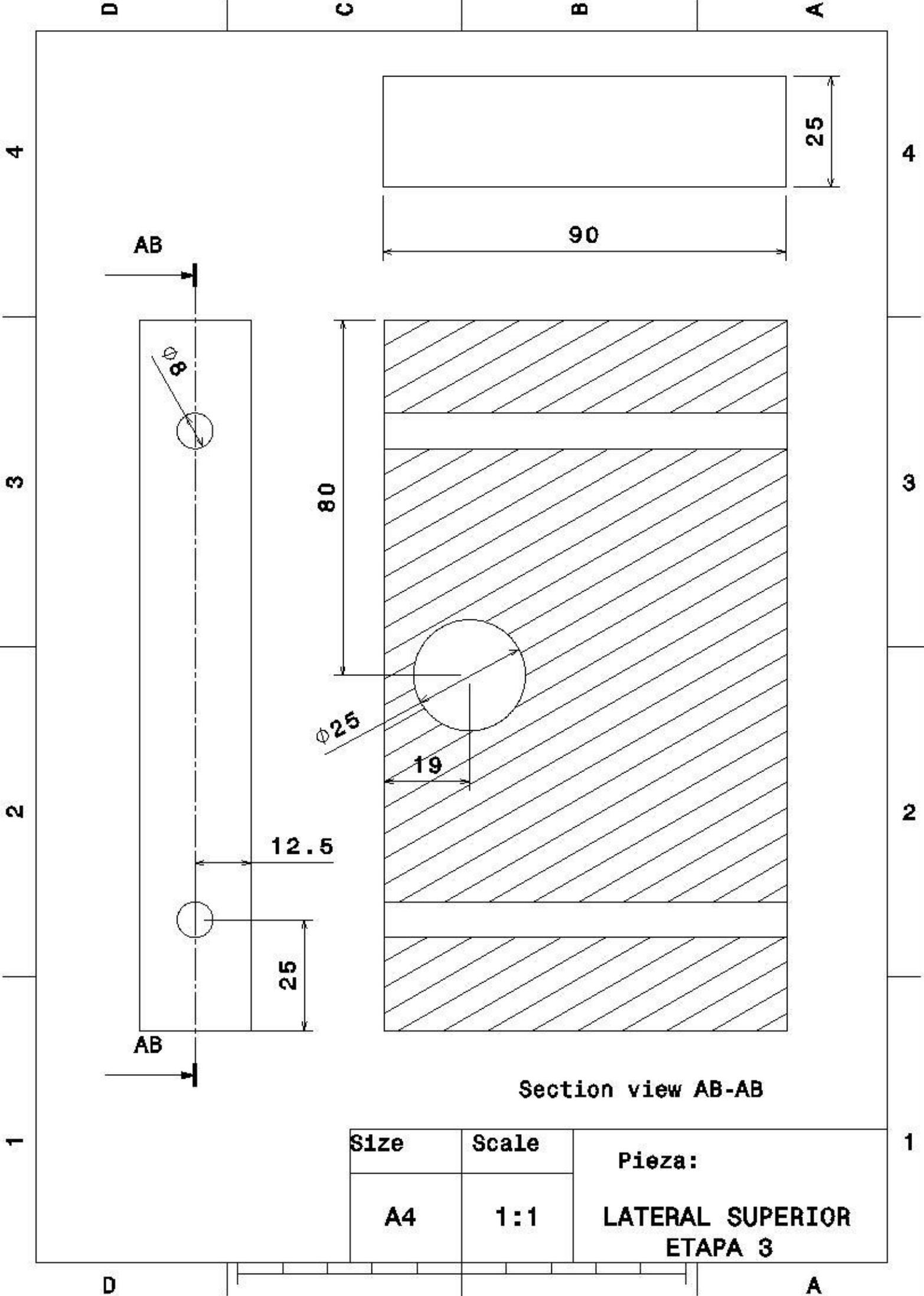
1

1

Size	Scale	Pieza: <b>LATERAL INFERIOR ETAPA 2</b>
A4	1:2	

D

A



AB

AB

$\phi 8$

$\phi 25$

90

25

80

19

12.5

25

Section view AB-AB

Size	Scale	Pieza:
A4	1:1	

D

A

4

4

3

3

2

2

1

1

D

C

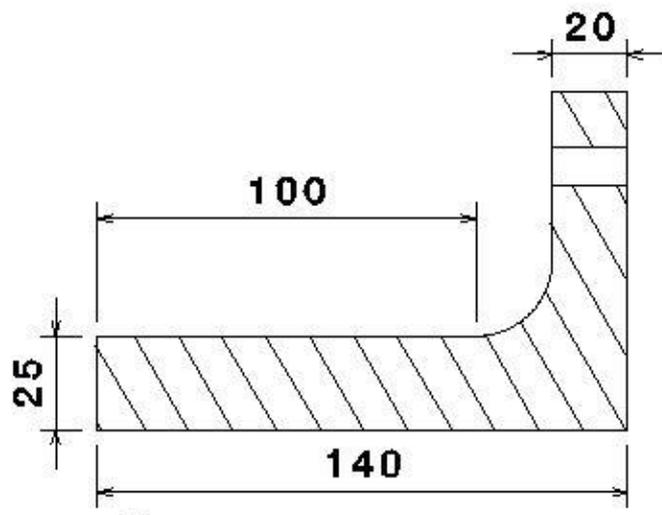
B

A

4

4

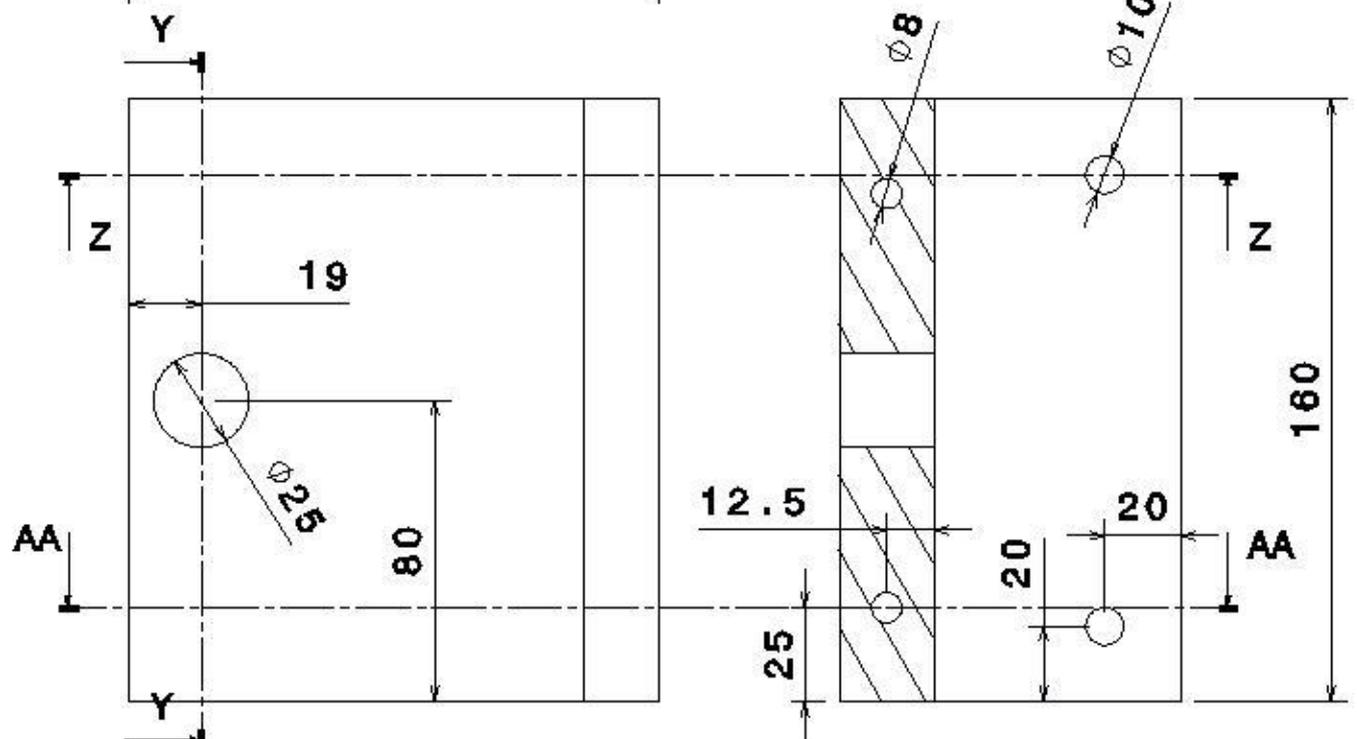
Section view Z-Z



3

3

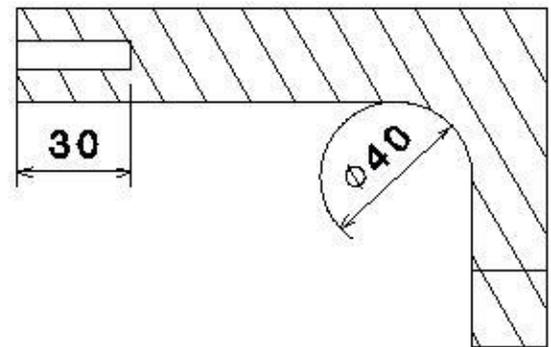
Section view Y-Y



2

2

Section view AA-AA



1

1

Size	Scale	Pieza: LATERAL INFERIOR ETAPA 3
A4	1:2	

D

A

D C B A

4

3

2

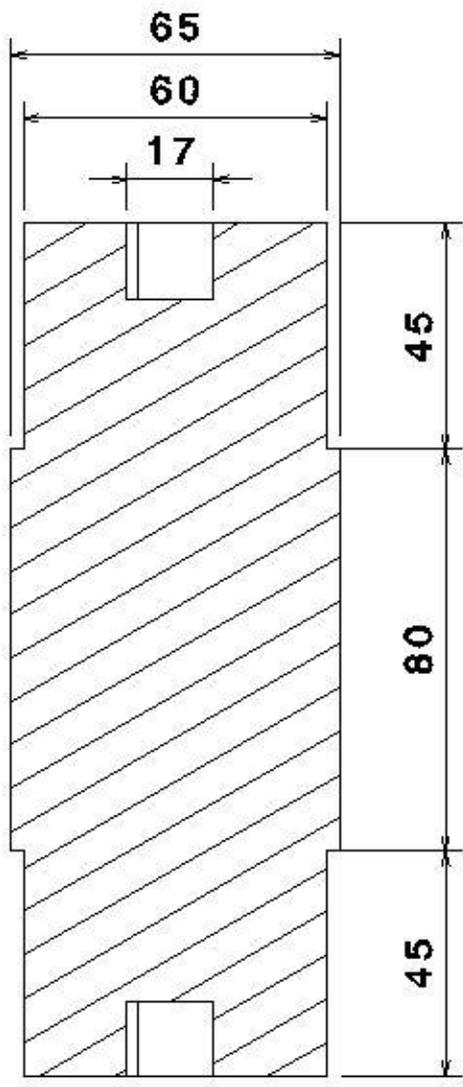
1

4

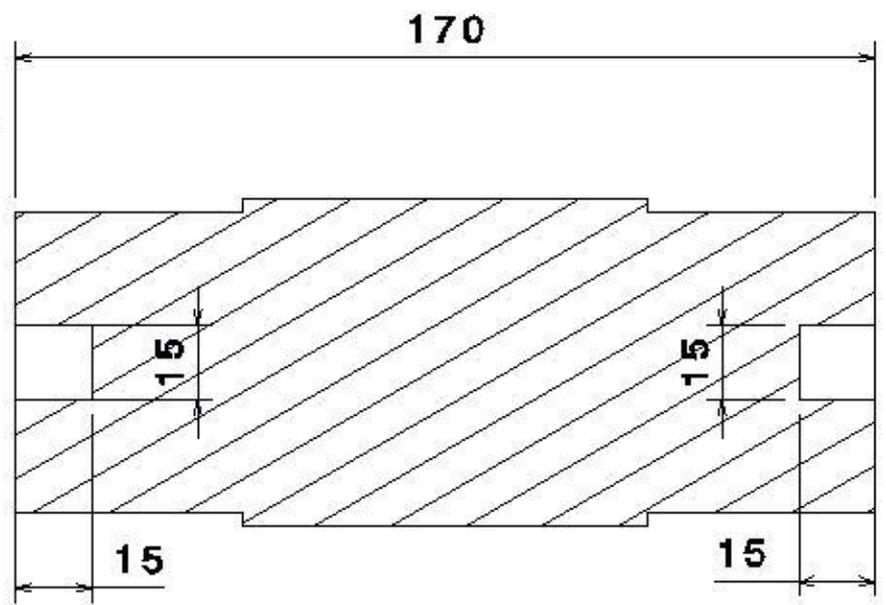
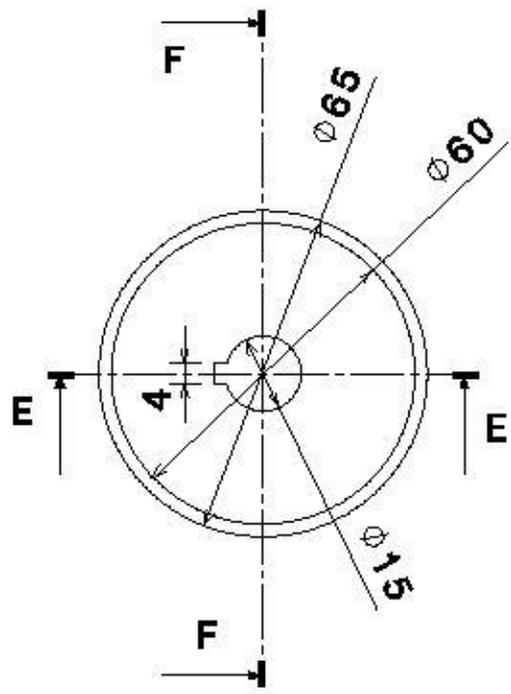
3

2

1



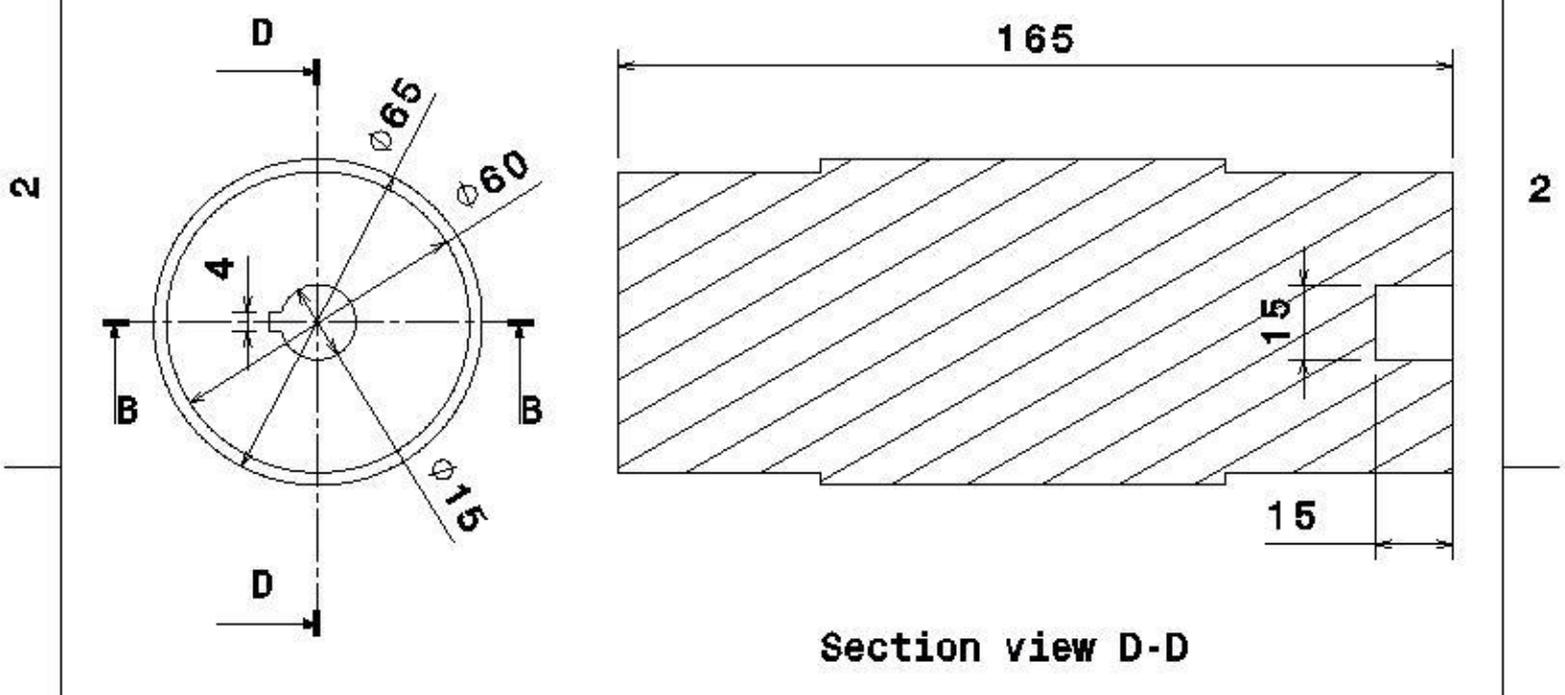
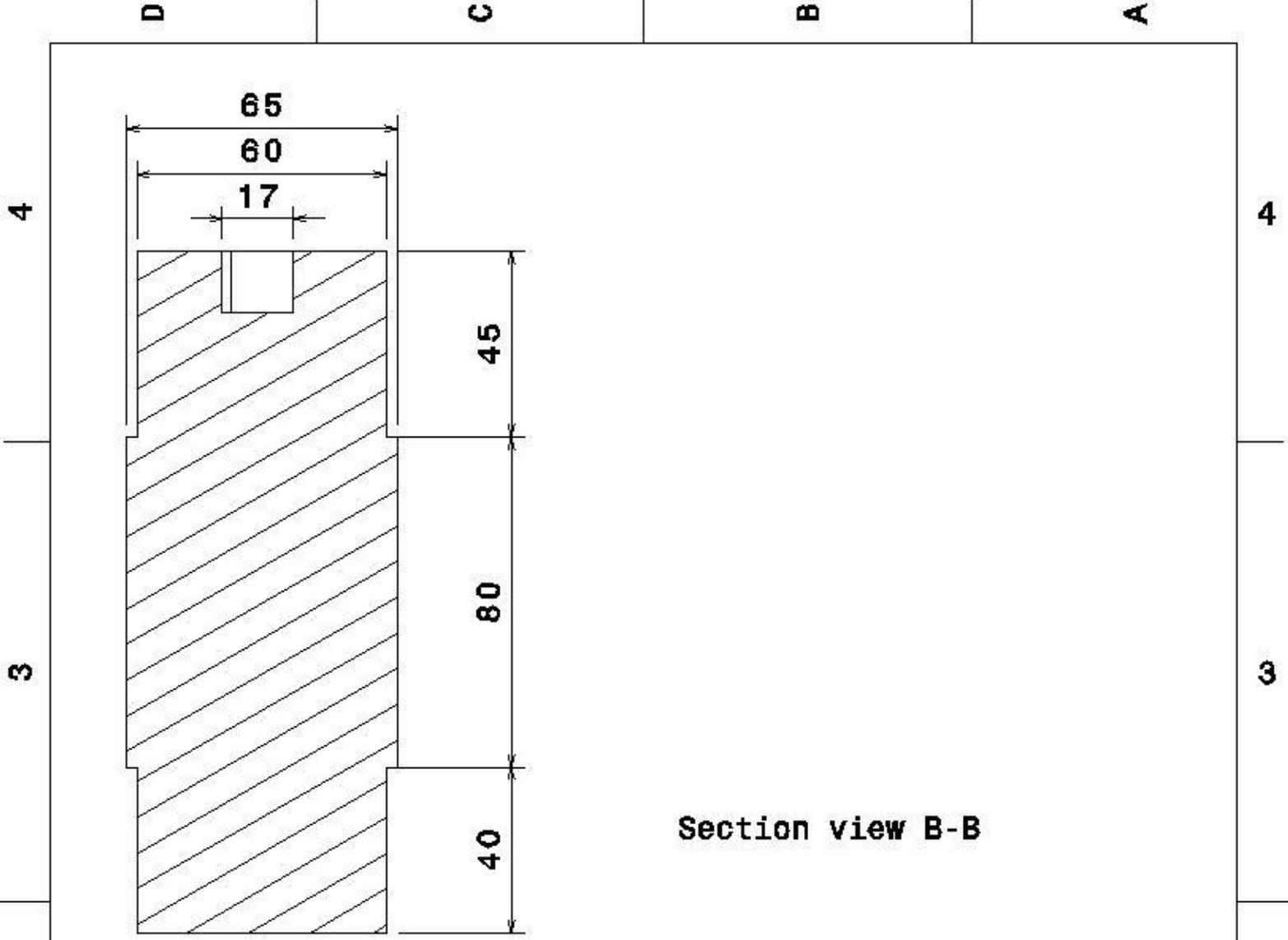
Section view E-E



Section view F-F

Size	Scale	Pieza: <b>RODILLO SUPERIOR ETAPA 1</b>
<b>A4</b>	<b>2:3</b>	

D A



<b>Size</b>	<b>Scale</b>	<b>Pieza:</b> <b>RODILLO INFERIOR</b> <b>ETAPA 1</b>
<b>A4</b>	<b>2:3</b>	

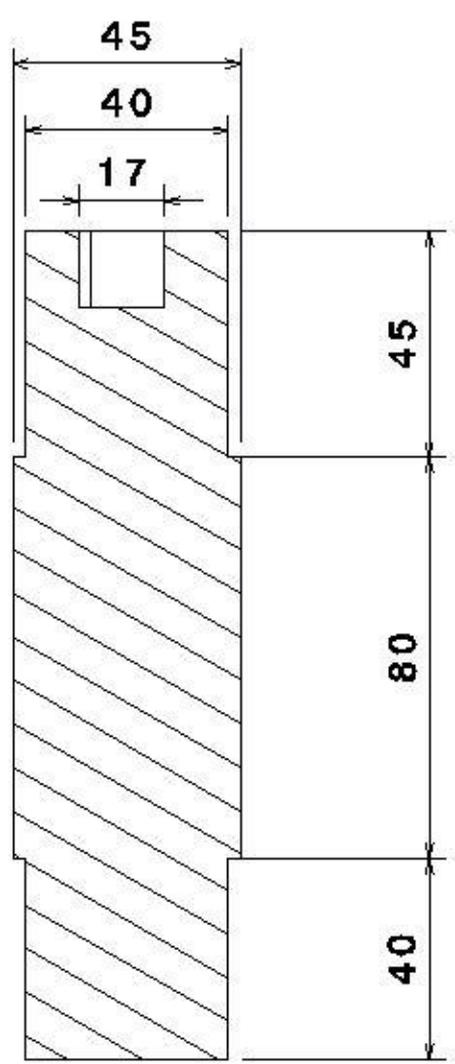
D C B A

4

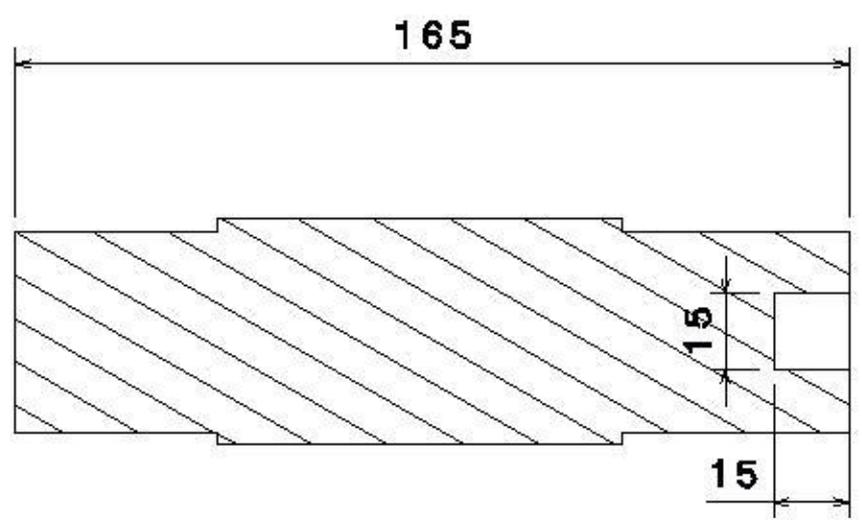
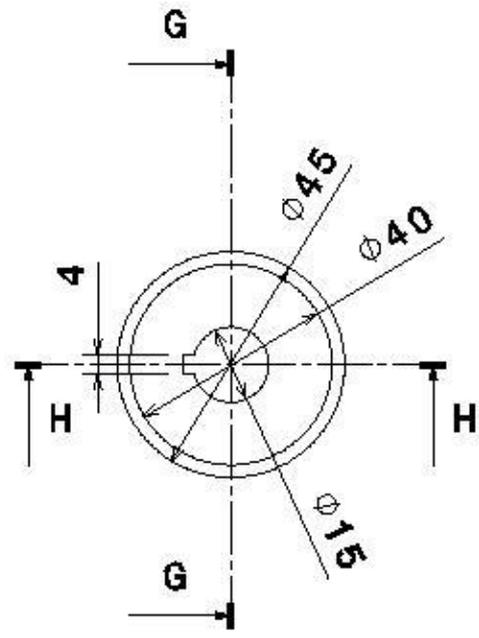
3

2

1



Section view H-H



Section view G-G

Size	Scale	Pieza: <b>RODILLO SUPERIOR ETAPA 2</b>
A4	2:3	

D A

D

C

B

A

4

4

3

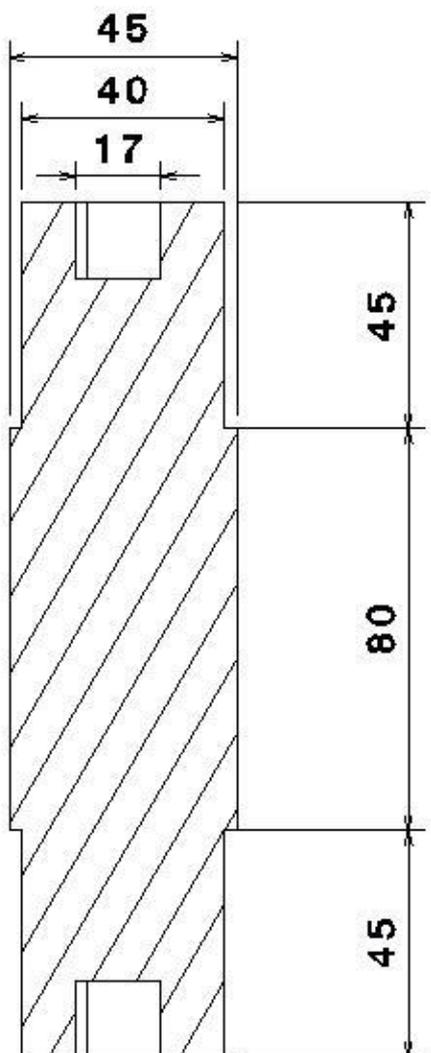
3

2

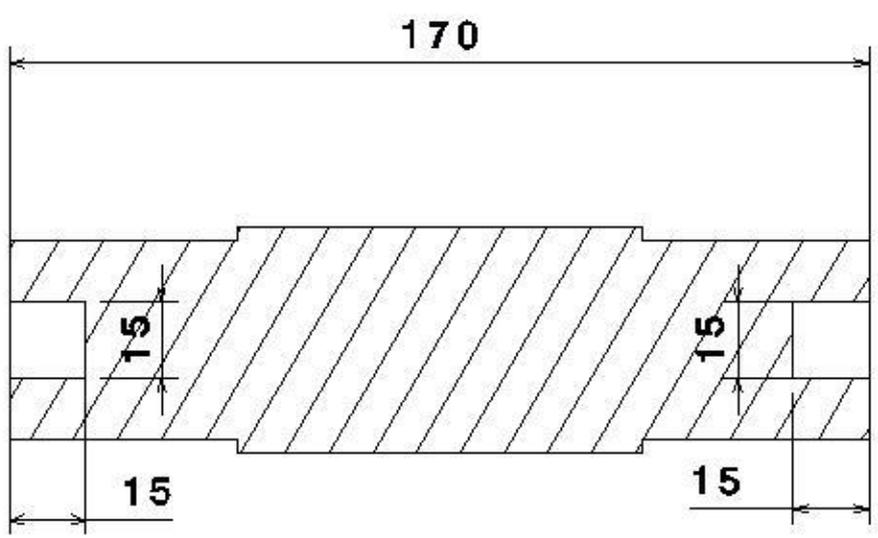
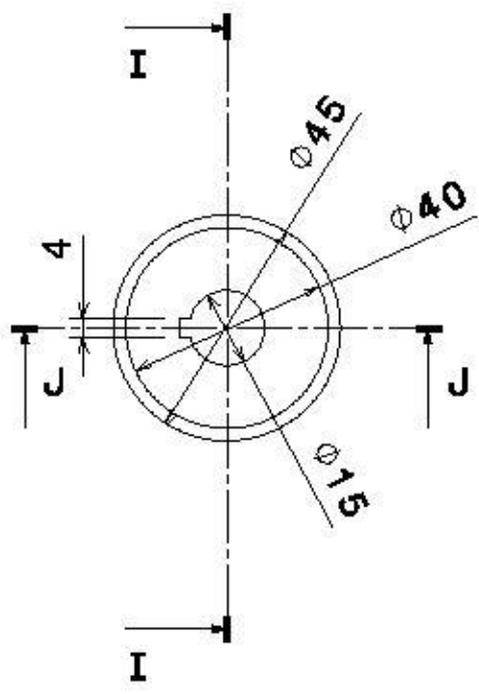
2

1

1



Section view J-J

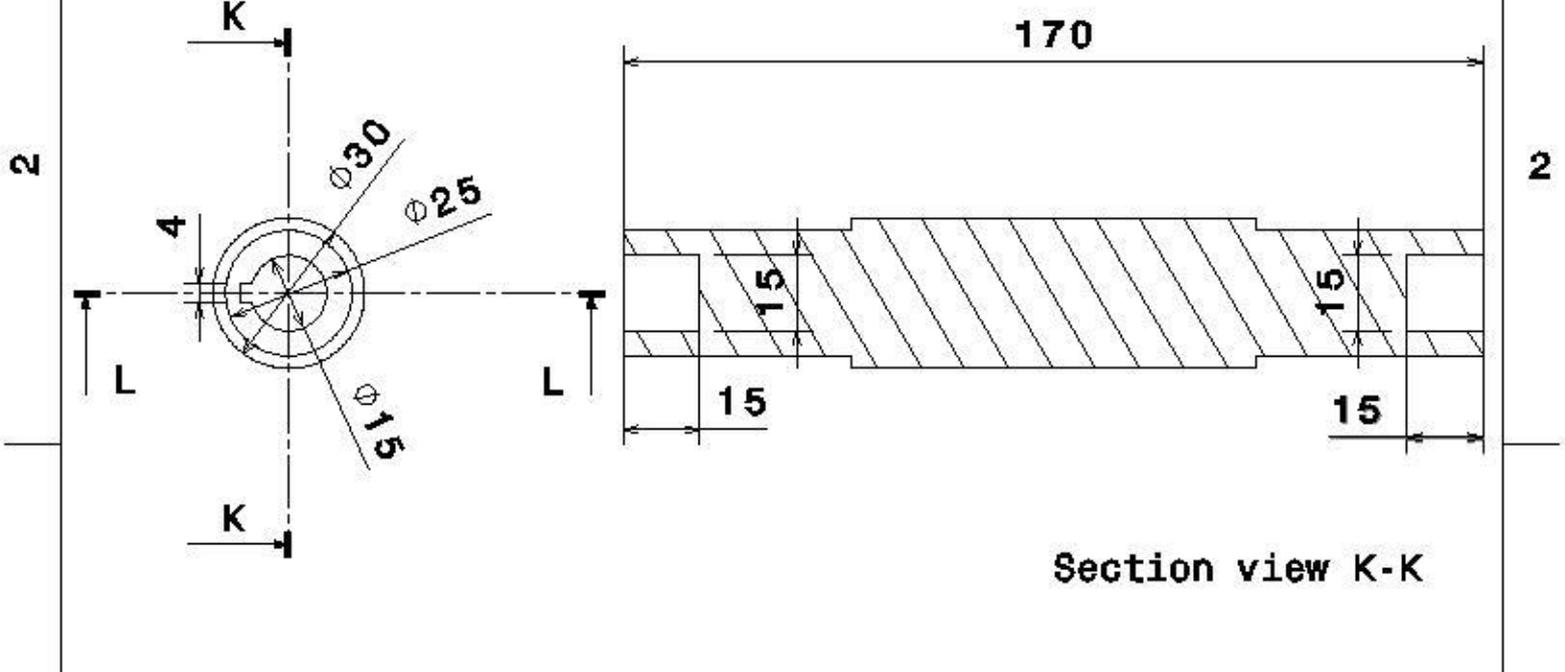
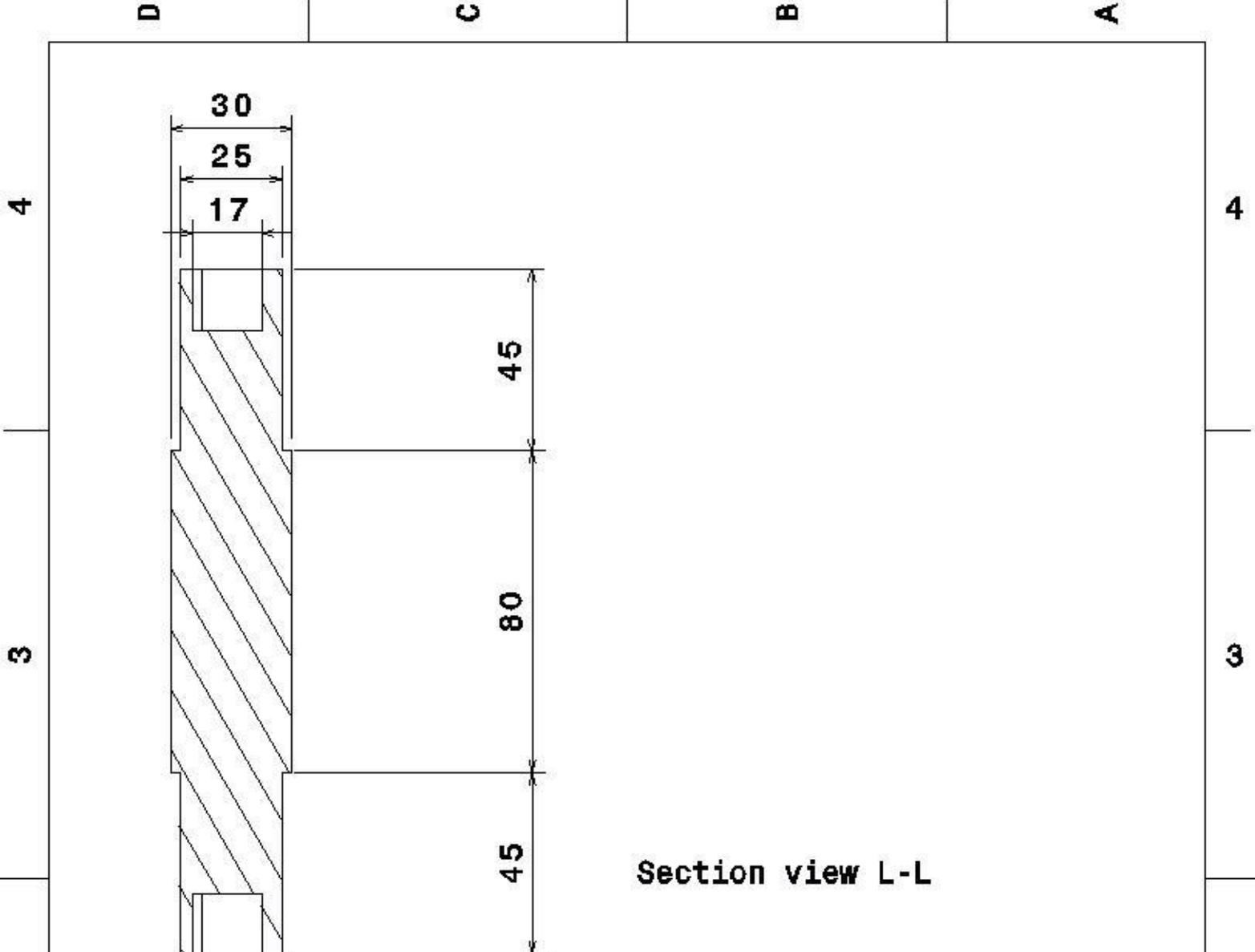


Section view I-I

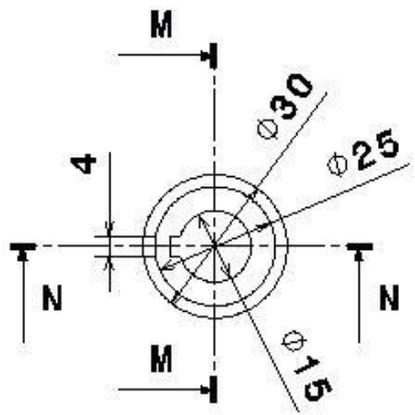
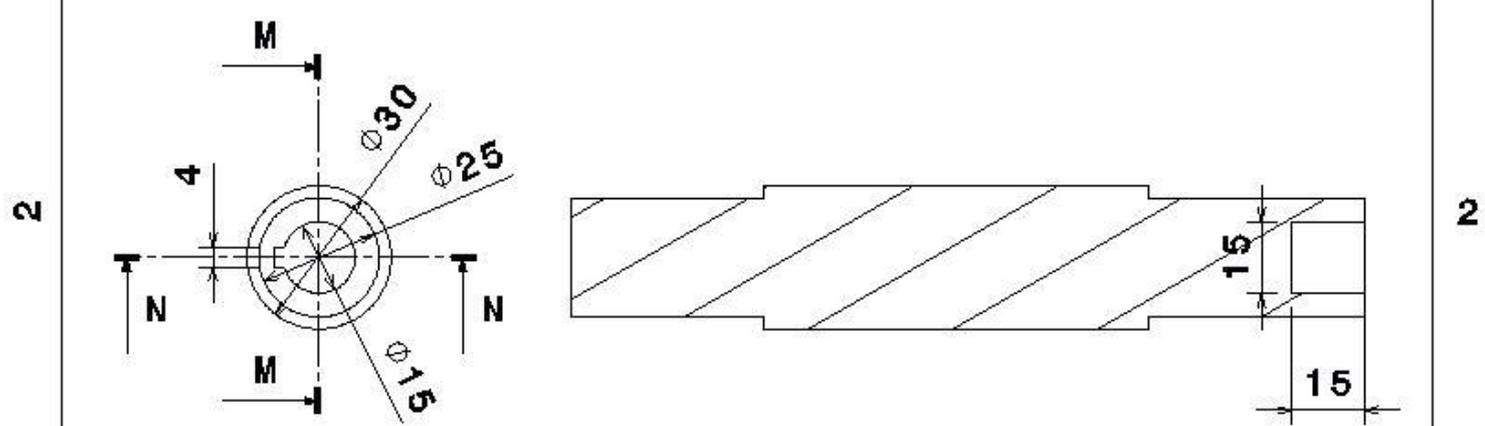
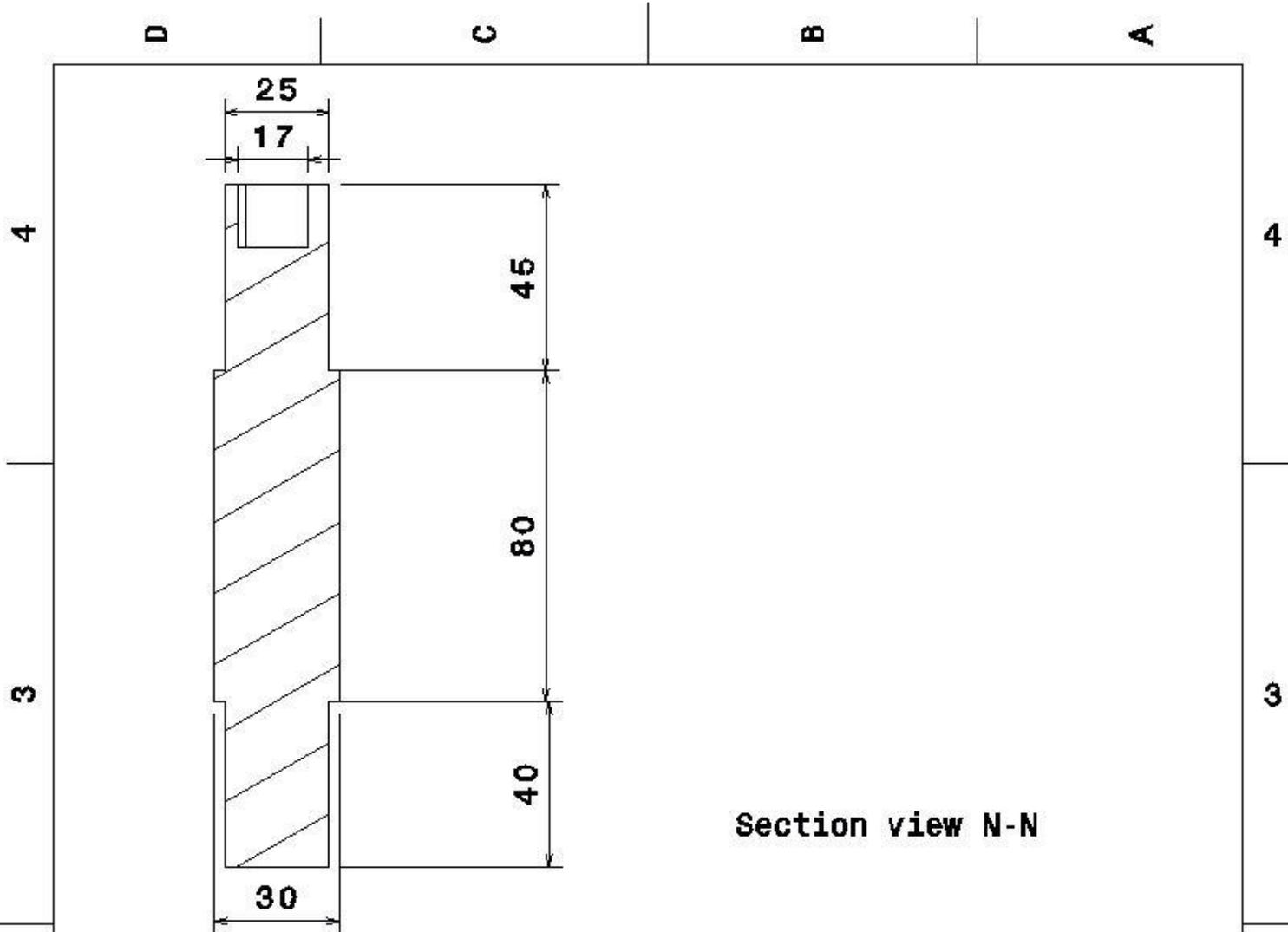
Size	Scale	Pieza: <b>RODILLO INFERIOR ETAPA 2</b>
<b>A4</b>	<b>2:3</b>	

D

A



Size	Scale	Pieza:
A4	2:3	



Size	Scale	Pieza: <b>RODILLO INFERIOR ETAPA 3</b>
A4	2:3	

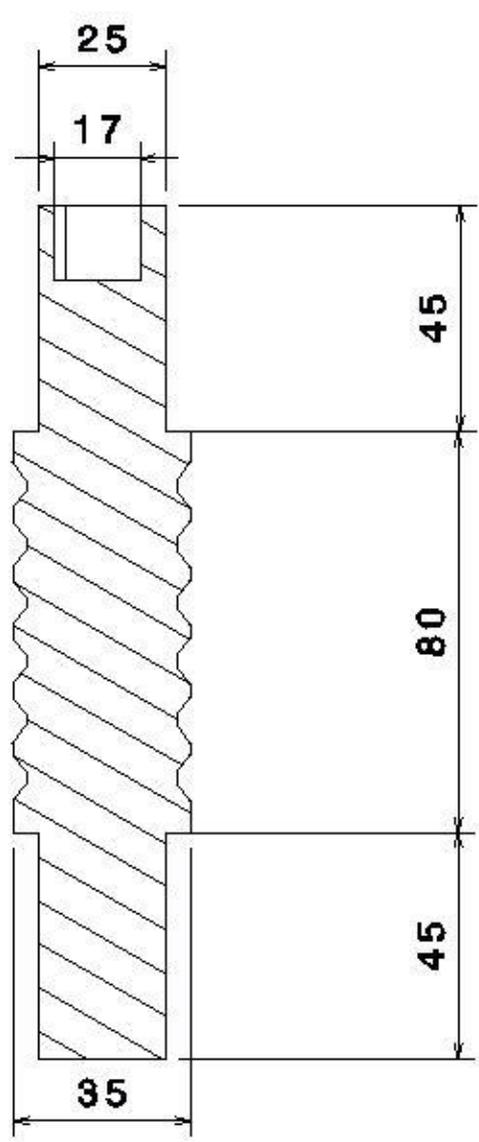
D C B A

4

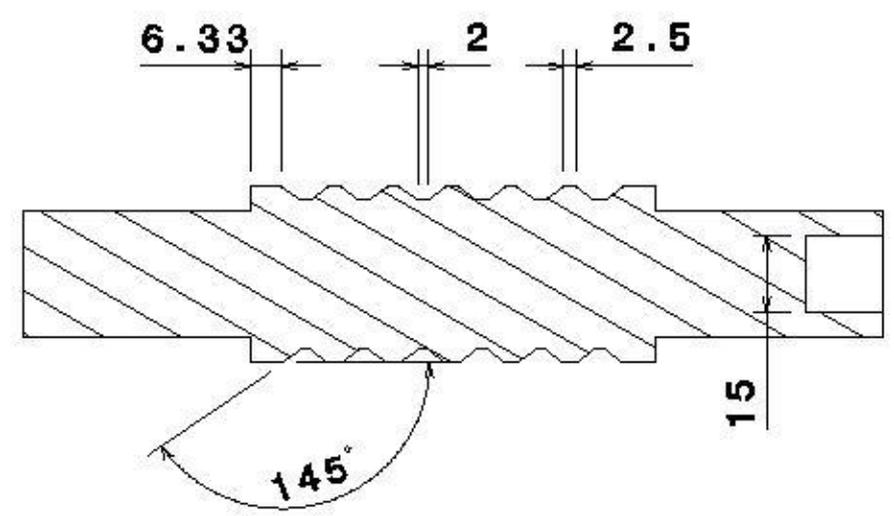
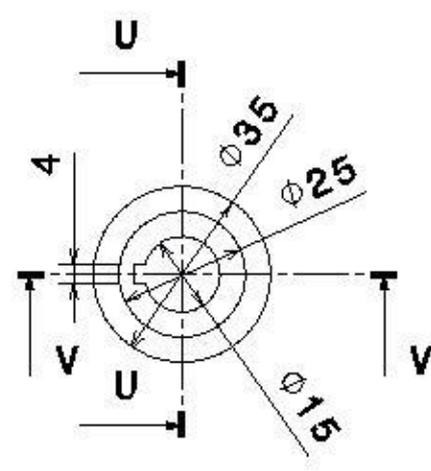
3

2

1



Section view V-V



Section view U-U

Size	Scale	Pieza: RODILLO DE FORMA SUPERIOR ETAPA 4
A4	2:3	

D A

D

C

B

A

4

4

3

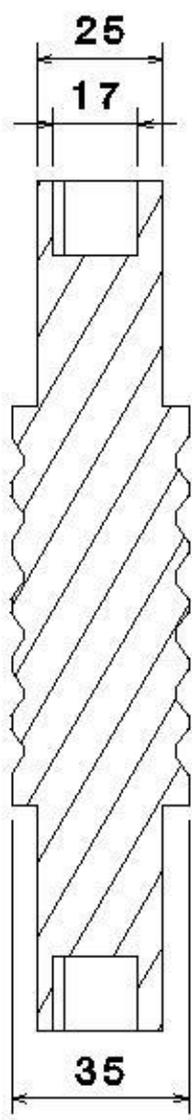
3

2

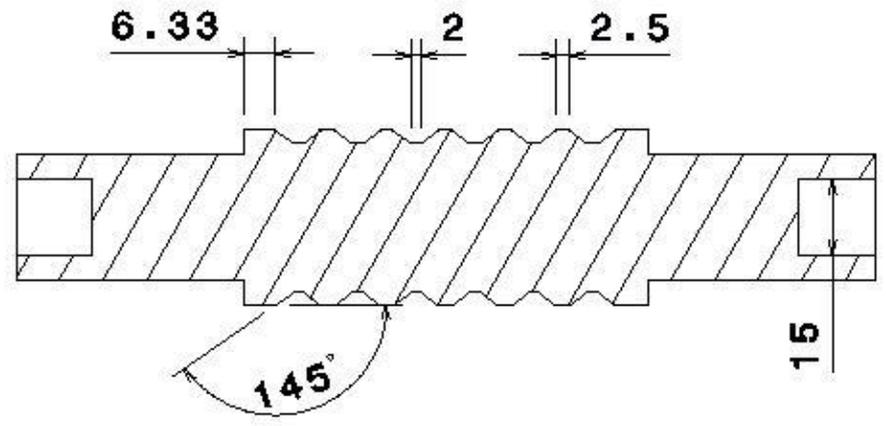
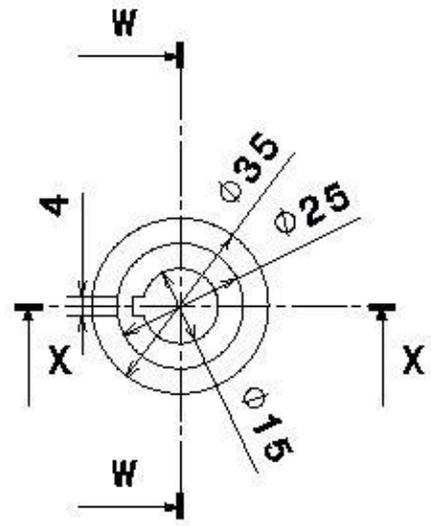
2

1

1



Section view X-X



Section view W-W

Size	Scale	Pieza:
A4	2:3	RODILLO DE FORMA INFERIOR ETAPA 4

D

A

D

C

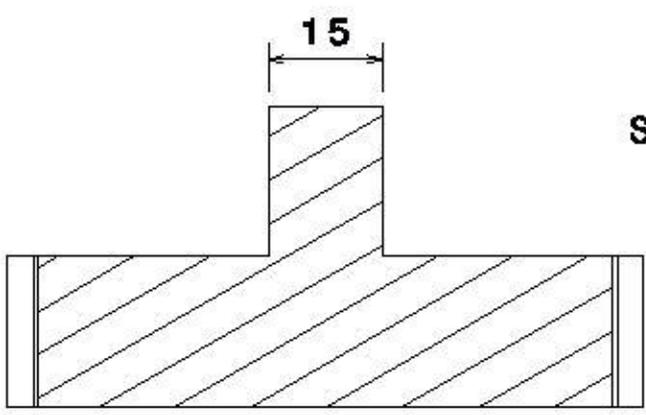
B

A

4

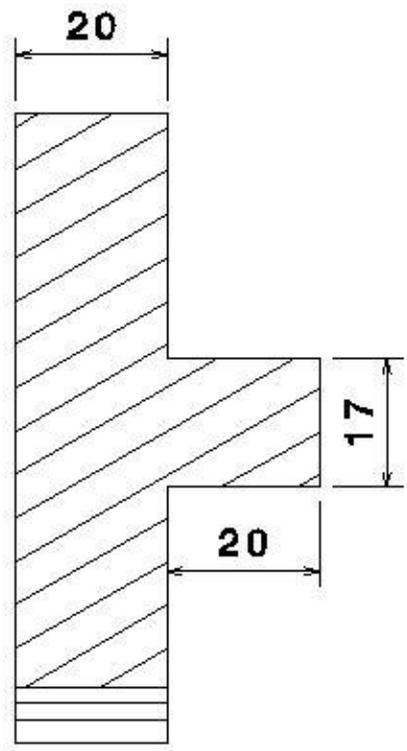
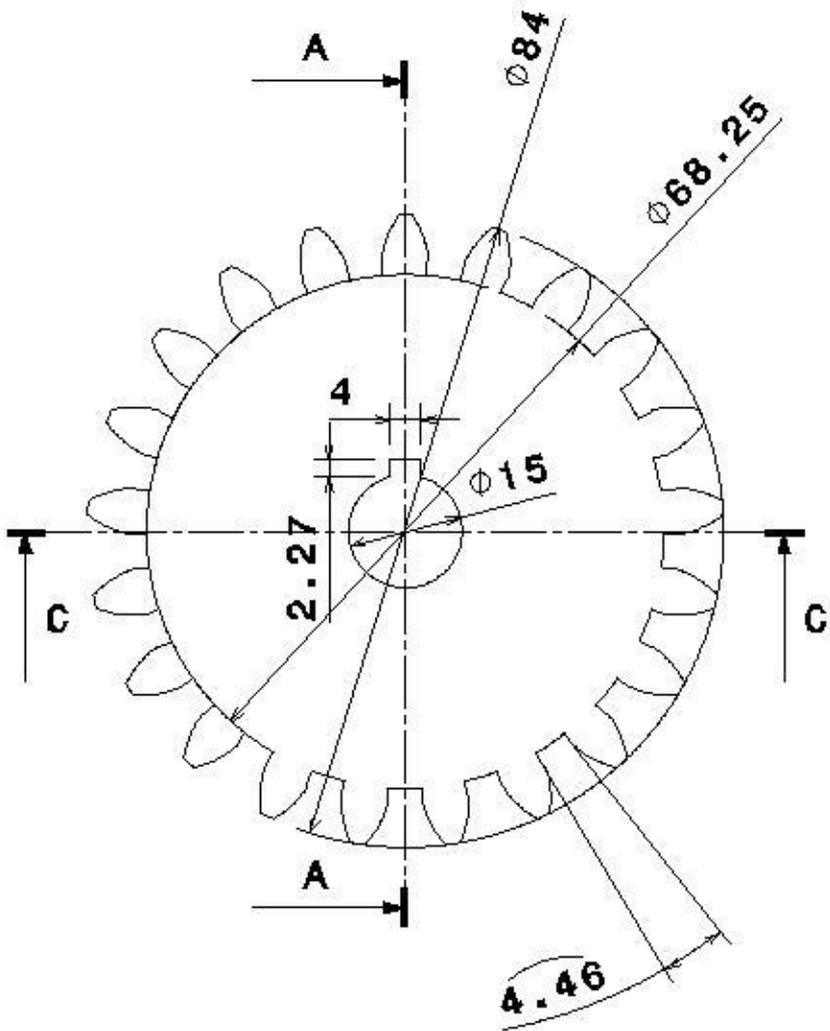
4

Section view C-C



3

3



Section view A-A

2

2

1

1

Size	Scale	Pieza: ENGRANAJE ETAPA 1
A4	1:1	

D

A

D

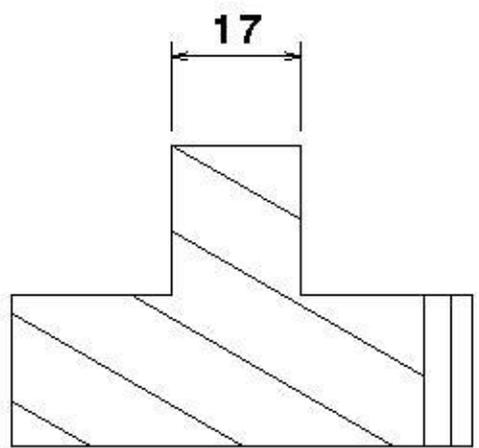
C

B

A

4

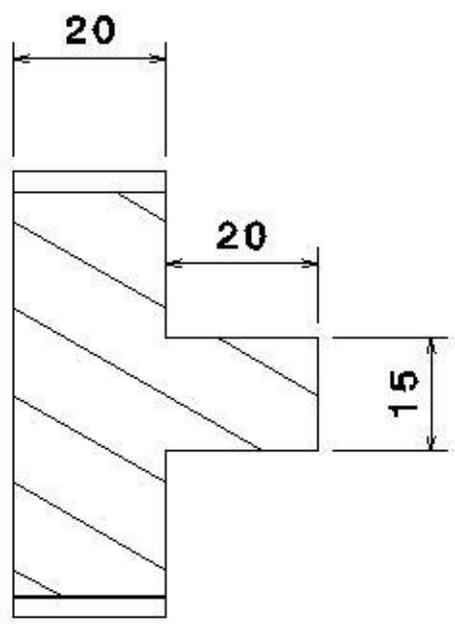
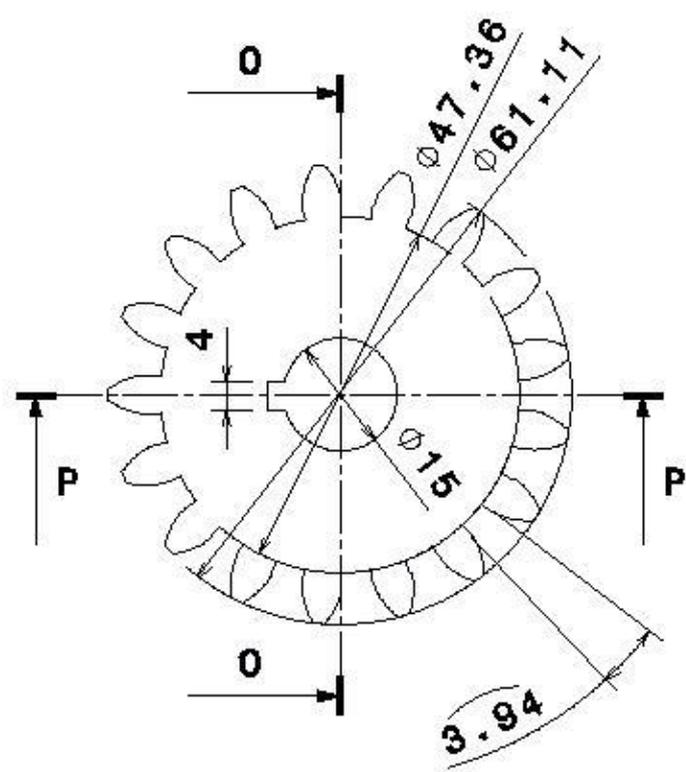
4



Section view P-P

3

3



Section view O-O

2

2

1

1

Size	Scale	Pieza: ENGRANAJE ETAPA 2
A4	1:1	

D

A

D

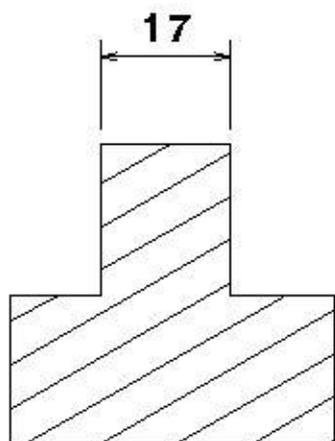
C

B

A

4

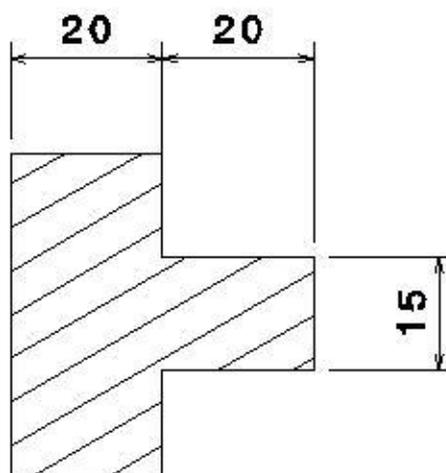
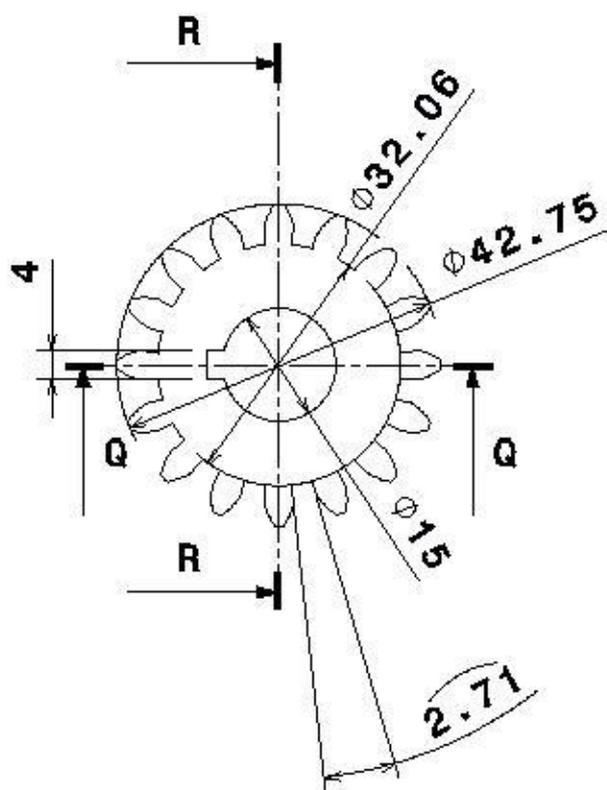
4



Section view Q-Q

3

3



Section view R-R

2

2

1

1

Size	Scale	Pieza: <b>ENGRANAJE ETAPA 3</b>
A4	1:1	

D

A

D

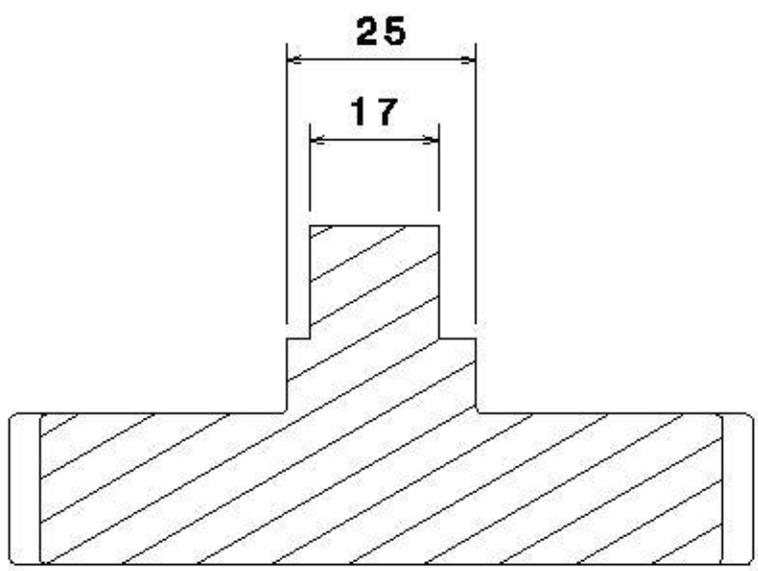
C

B

A

4

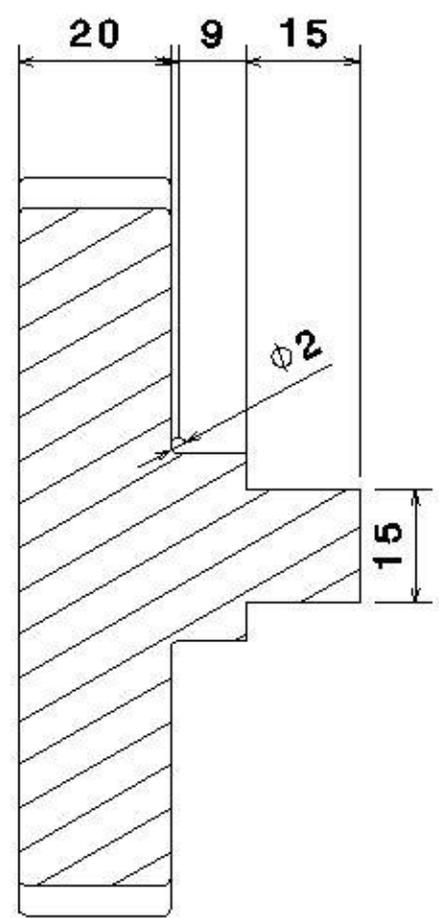
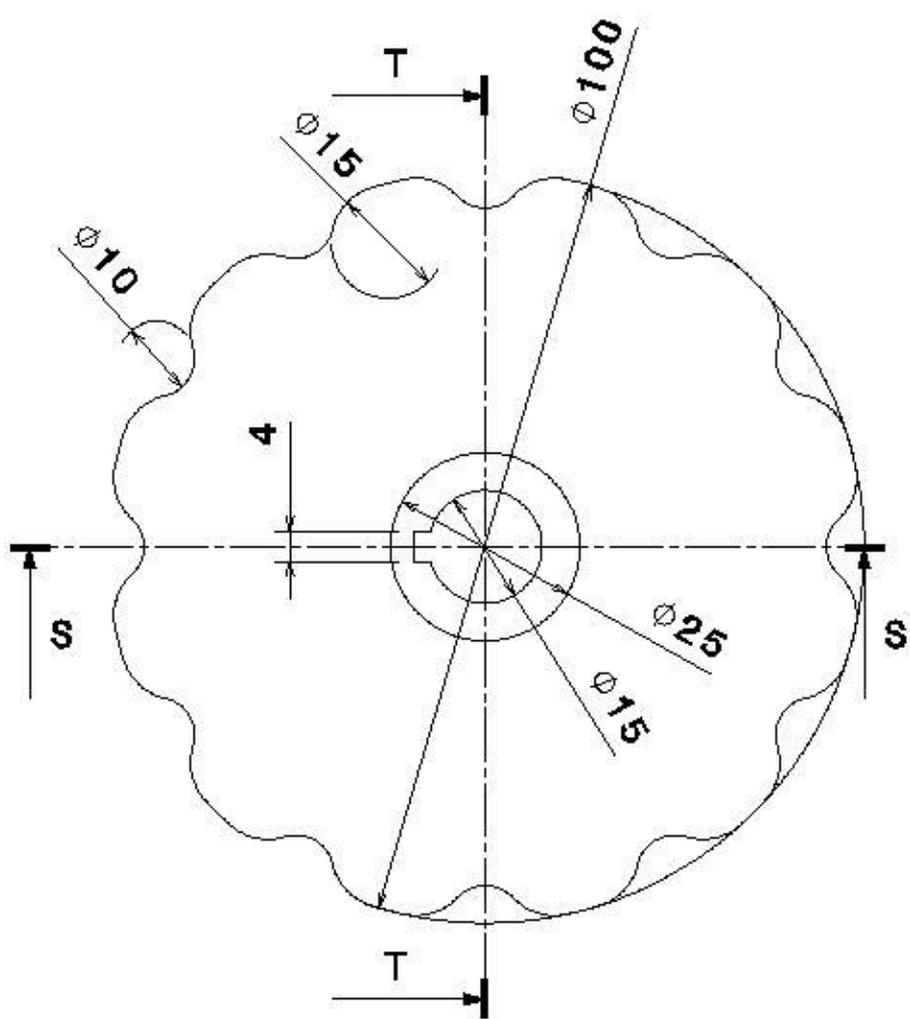
4



Section view S-S

3

3



Section view T-T

2

2

1

1

Size	Scale	Pieza: <b>MANIVELA</b>
A4	1:1	

D

A



