

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería de Tecnologías Industriales

Diseño y fabricación de laminadores manuales para prácticas de Tecnología de Fabricación

Autor: Amalia Salinas Carmona

Tutor: Aida Estévez Urra

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

Sevilla, 2024



Proyecto Fin de Carrera
Grado Ingeniería de Tecnologías Industriales

Diseño y fabricación de laminadores manuales para prácticas de Tecnología de Fabricación

Autora:

Amalia Salinas Carmona

Tutor:

Aida Estévez Urrea

Profesora Permanente Laboral

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Proyecto Fin de Carrera: Diseño y fabricación de laminadores manuales para prácticas de Tecnología de
Fabricación

Autora: Amalia Salinas Carmona

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, 2024

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Me gustaría agradecer, en primer lugar, como no podía ser de otra forma, a mis padres y hermano, quienes me acompañan y apoyan en cada paso que doy. Sin vosotros nada hubiese sido posible. A mis abuelos, por cuidarme y hacerme sentir como en casa. A mi familia y especialmente a mi tío Pedro, que desde su experiencia me ha ayudado a orientar mi camino.

A mis amigos de siempre y a los que me llevo de la carrera. A los segundos, gracias por todo lo vivido dentro y fuera de la ETSI. Con una mención especial a Irene, con quien he compartido días infinitos de estudio, risas, llantos y miles de experiencias. Has sido un apoyo fundamental.

A los que se fueron sin ver lo que he conseguido. Sé que donde estéis, estaréis orgullosos de mi.

Por último, pero no menos importante, agradecer a Aida, mi tutora de este TFG, que ha puesto todo sus conocimientos y dedicación. Y a Manuel, el maestro de taller, que con su esfuerzo ha hecho posible la realización de este proyecto.

Amalia Salinas Carmona

Sevilla, 2024

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado ha consistido en diseñar y fabricar laminadores manuales con un fin educativo, de manera que se puedan utilizar en las prácticas de la asignatura Tecnología de Fabricación.

En primer lugar, se realizó un estudio del proceso para saber qué parámetros se querían estudiar. Una vez establecidos los objetivos a los que se querían llegar, se comenzó a pensar en el diseño de los laminadores. Finalmente, se diseñaron y fabricaron cuatro laminadores, con diferentes características que permitieran evaluar de manera independiente los parámetros que influyen en la laminación, especialmente la influencia del radio de los rodillos y de la reducción de espesor. Uno de los laminadores, es un laminador de forma, con el fin de ver que la laminación, además de reducir de espesor, permite conseguir infinidad de perfiles y formas.

La fabricación se ha llevado a cabo en el taller de Ingeniería de Procesos de la ETSI. Una vez fabricados los cuatro laminadores, se han ensamblado todos sus componentes para asegurar el correcto funcionamiento del montaje.

Tras la fabricación, se han realizado diversos ensayos para comprobar que, efectivamente, se cumple la teoría de la laminación, evaluando los diferentes parámetros que intervienen en el proceso de la laminación. El material de trabajo, debido al fin educativo del proyecto, fue plastilina.

Este trabajo culmina con un guión de prácticas, donde los alumnos mediante los laminadores, estudiarán de una manera más dinámica este proceso de fabricación, aplicando los conceptos teóricos de la laminación. Con esta práctica, los estudiantes tendrán una experiencia enriquecedora que les ayudará a entender el proceso.

Abstract

The following Final Degree Project consists of design and manufacture of manual rollers for educational purposes, so that they can be used in the Manufacturing Technology course practices.

Firstly, a study of the process was carried out to determine which parameters were to be studied. Once the objectives were established, the design of the rolling mills was conceived. Finally, four rolling mills were designed and manufactured, each with different characteristics to independently evaluate the parameters influencing rolling, particularly the influence of the roll radius and thickness reduction. One of the rolling mills is a form rolling mill, intended to demonstrate that rolling not only reduces thickness but also allows for the creation of a multitude of profiles and shapes.

The manufacturing was conducted in the Process Engineering workshop of ETSI. Once the four rolling mills were manufactured, all components were assembled to ensure proper functioning.

After manufacturing, various tests were conducted to verify that the rolling theory was correctly applied, evaluating the different parameters involved in the rolling process. The working material, due to the educational purpose of the project, was plasticine.

This project concludes with a practice guide, where students, using the rolling mills, will dynamically study this manufacturing process, applying the theoretical concepts of rolling. With this practice, students will have an enriching experience that will help them understand the process.

ÍNDICE

Agradecimientos.....	7
Resumen	9
Abstract	11
Índice	13
Índice de figuras.....	14
Índice de tablas.....	16
1 Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Tareas a desarrollar	2
2 Proceso de laminación	3
2.1 Introducción	3
2.2 Parámetros que intervienen en el proceso de laminación.....	4
3 Diseño de los laminadores	9
3.1 Introducción	9
3.2 Descripción de los laminadores y sus componentes	11
3.2.1 Bases.....	12
3.2.2 Rodillos.....	13
3.2.3 Ruedas dentadas	14
3.2.4 Manivela	15
3.3 Ensamblaje	16
3.4 Fabricación de las probetas	18
4 Parte experimental.....	21
4.1 Procedimiento experimental	21
4.2 Análisis de resultados	25
4.3 Futuras mejoras	28
5 Planteamiento de la práctica y experimentación	29
5.1 Introducción	29
5.2 Descripción de la práctica	29
5.3 Preparación de probetas.....	30
5.4 Realización de ensayos.....	30
Conclusiones	35
Bibliografía	37
Anexo.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Boceto de Leonardo da Vinci [4]	1
Figura 2.1 Esquema laminación	3
Figura 2.2 Vista lateral de los parámetros que intervienen en la laminación [2]	4
Figura 2.3 Ensanchamiento del material tras la laminación	6
Figura 3.1 Ejemplo etapas de un tren de laminación [9]	9
Figura 3.2 Diseño de laminador para fabricación mediante impresión 3D [1]	10
Figura 3.3 Elementos del laminador elaborado mediante fabricación aditiva [1]	10
Figura 3.4 Prototipo antiguo laminador	11
Figura 3.5 Configuraciones de los 4 laminadores	12
Figura 3.6 Base del laminador 1	13
Figura 3.7 Base del laminador 2	13
Figura 3.8 Base del laminador 3	13
Figura 3.9 Base del laminador de forma	13
Figura 3.10 Rodillos de los laminadores 1 y 2	14
Figura 3.11 Rodillos y casquillo del laminador 3	14
Figura 3.12 Rodillos y casquillo del laminador de forma	14
Figura 3.13 Tabla con indicación de las ruedas dentadas seleccionadas para los laminadores [13]	15
Figura 3.14 Especificaciones de las ruedas dentadas dadas por el fabricante [13]	15
Figura 3.15 Manivela	16
Figura 3.16 Rueda dentada adaptada a la instalación de la manivela	16
Figura 3.17 Laminador 1	16
Figura 3.18 Laminador 2	17
Figura 3.19 Laminador 3	17
Figura 3.20 Laminador de forma	17
Figura 3.21 Molde para la fabricación de probetas	18
Figura 3.22 Plano del molde inferior para la fabricación de probetas	18
Figura 3.23 Prensa empleada en la fabricación de probetas	19
Figura 3.24 Plastilina en el molde previa al prensado	19
Figura 3.25 Plastilina en el molde tras el prensado	20
Figura 3.26 Probeta	20
Figura 4.1 Representación esquemática de la laminación [2]	21
Figura 4.2 Representación gráfica de la variación de longitud en los laminadores 1 y 2	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Parámetros para la comprobación de la condición de laminación	22
Tabla 4.2 Resultados ensayos laminador 1 ($R = 12 \text{ mm}$, $e = 2 \text{ mm}$)	22
Tabla 4.3 Resultados ensayos laminador 2 ($R = 12 \text{ mm}$, $e = 3 \text{ mm}$)	23
Tabla 4.4 Resultados ensayos en el laminador 3 ($R = 17 \text{ mm}$, $e = 3 \text{ mm}$)	23
Tabla 4.5 Cálculos teóricos de los parámetros de ensayo en el laminador 1	24
Tabla 4.6 Cálculos teóricos de los parámetros de ensayo en el laminador 2	24
Tabla 4.7 Cálculos teóricos de los parámetros de ensayo en el laminador 3	25
Tabla 4.8 Valores comparativos de los ensayos en los laminadores 1 y 2	26
Tabla 4.9 Comparativa entre el ensanchamiento y el alargamiento en los laminadores 1 y 2	26
Tabla 4.10 Valores comparativos de los ensayos en los laminadores 2 y 3	27
Tabla 4.11 Comparativa entre el ensanchamiento y el alargamiento en los laminadores 2 y 3	28

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La laminación es un proceso de conformado plástico por el cual se deforma el material hasta conseguir la geometría y propiedades deseadas. El concepto de la laminación comienza muchos años atrás con un primer boceto de Leonardo Da Vinci que data del siglo XIV en el que mostraba dos rodillos por donde introducía el metal (figura 1.1). Desde entonces este proceso ha ido evolucionando desde esos primeros laminadores manuales hasta sistemas automatizados que permiten grandes reducciones de espesor en varias etapas como los trenes de laminación. Hoy en día, la laminación es uno de los procesos de fabricación más utilizados, teniendo aplicaciones en diferentes sectores como el automovilístico, la edificación, la aviación o en la industria alimentaria.

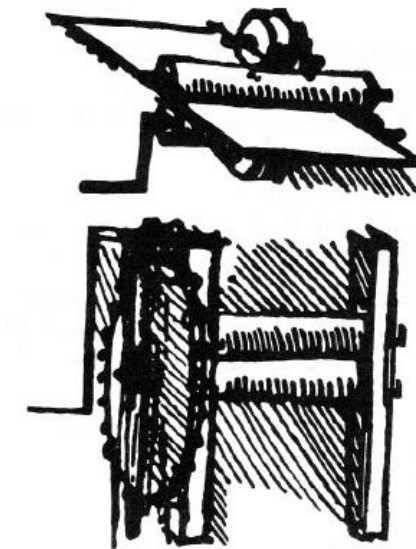


Figura 1.1 Boceto de Leonardo da Vinci [4]

En el proceso de laminación intervienen gran cantidad de parámetros como son la velocidad y el radio de los rodillos, la temperatura del material y la fuerza aplicada entre otros. En muchos estudios se ha comprobado que al variar alguno de estos parámetros se consiguen diferentes resultados.

Es el caso de un estudio realizado para evaluar el efecto de los parámetros de la laminación en caliente en las propiedades mecánicas de un acero. En él se comprobó que al laminar aumentando la velocidad de laminación se consigue una mejora de las propiedades mecánicas como la tenacidad, la resistencia a la tracción o el límite elástico. [6]

Otros estudios aseguran que, a igualdad de temperatura de laminación, para el caso de laminación en caliente, un aumento en la reducción del espesor incrementa el límite elástico y la resistencia a la tracción. [5]

Uno de los parámetros a estudiar en este proyecto es la influencia del radio de los rodillos. Hay un estudio que demuestra que en los rodillos de mayor radio se generan distribuciones de presiones más uniformes que en los rodillos más pequeños. Además, según este estudio, un aumento del radio de rodillo mejora la calidad de la laminación y reducen la posibilidad de obtener defectos. [10]

En cuanto a la reducción de espesor, estudios demuestran que sus propiedades mecánicas disminuyen. Los

laminadores más delgados tienden a absorber menos energía de impacto, y, por tanto, es más probable que sufran daños. [11]

Queda demostrado que en la laminación entran en juego una gran variedad de parámetros. Modificando dichos parámetros se pueden conseguir resultados muy diversos. Esto hace de la laminación un proceso de fabricación muy versátil, que permite ajustar el proceso a las necesidades y especificaciones requeridas.

Estudiar la teoría de la laminación es esencial para que los futuros ingenieros conozcan esta técnica tan ampliamente utilizada en la industria actual. En la asignatura Tecnología de Fabricación se estudian los conceptos relativos a las diferentes técnicas de fabricación. Esta asignatura cuenta con una variedad de prácticas teóricas donde se explican los procesos vistos de manera teórica. En la rama de la ingeniería, son especialmente útiles las prácticas académicas, dado que permiten que el alumno relacione los conceptos teóricos con la práctica provocando una mayor comprensión. Con el diseño y fabricación de estos laminadores manuales se busca aplicar de una forma sencilla el proceso de laminación. [12]

1.2 Objetivos

El presente Trabajo Fin de Grado tiene una componente importante de análisis del proceso de laminación y una parte importante de experimentación, como consecuencia de los objetivos planteados al inicio del mismo y que son los siguientes:

1. Diseñar y fabricar laminadores metálicos manuales para su uso en prácticas de laboratorio de asignaturas de Tecnología de fabricación.
2. Diseño y puesta a punto de una práctica de laboratorio para el estudio de diferentes parámetros que intervienen en el proceso de laminación.

1.3 Tareas a desarrollar

Para alcanzar los objetivos propuestos, se llevarán a cabo distintas tareas que son descritas a continuación:

- Estudio del proceso de la laminación: con el fin de comprender el principio de funcionamiento de los laminadores y, los parámetros que intervienen en el proceso.
- Diseño de los laminadores: teniendo en cuenta su aplicación final en actividades docentes, que estos se tenían que manipular manualmente y que el material a laminar tendría que ser fácilmente deformable a temperatura ambiente.
- Fabricación de los laminadores: en el taller de mecanizado del departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.
- Ensamblaje y verificación: de todos los componentes para comprobar el correcto funcionamiento del conjunto.
- Experimentación en los diferentes laminadores empleando la plastilina como material de ensayo y análisis de resultados comparando las diferentes variables estudiadas y verificando que se cumplen los conceptos básicos de la laminación.
- Proyecto de práctica de laboratorio para los estudiantes, en la que se plantean los ejercicios a realizar por los alumnos en el taller.

2 PROCESO DE LAMINACIÓN

2.1 Introducción

El proceso de laminación utiliza la compresión para conformar el material entre dos rodillos. Estos rodillos, al girar, hacen que el material fluya entre ellos, reduciendo su espesor (figura 2.1 a) y dando forma (figura 2.1 b). Este proceso se repite continuamente hasta llegar al espesor y forma deseados.

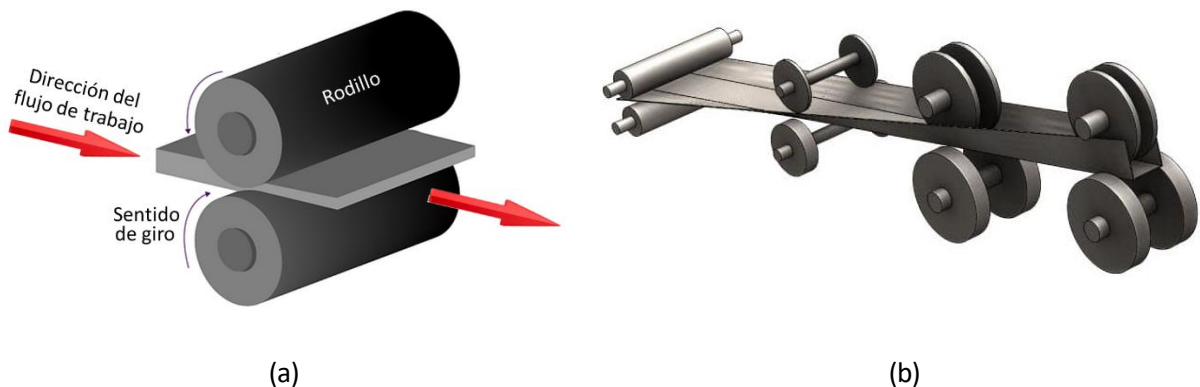


Figura 2.1 Esquema laminación

a) Laminación para reducción de espesor

b) Laminación de forma

La laminación se puede realizar en frío o en caliente. Se considera laminación en caliente cuando se realiza a altas temperaturas, cerca de la temperatura de recristalización del material. Este método es empleado cuando se quieren conseguir grandes reducciones de material o formas complejas, dado que las altas temperaturas, hacen que el material sea más fácil de deformar. Por su parte, la laminación en frío se realiza a temperatura ambiente y es usada para obtener dimensiones precisas y buenos acabados superficiales. En este caso, las fuerzas que se han de realizar durante el laminado son mayores que en la laminación en caliente.

A continuación, se exponen algunas de las ventajas de la laminación en frío frente a la laminación en caliente:

- **Buen acabado superficial:** la laminación en frío ofrece buenos acabados superficiales, mientras que, en la laminación en caliente, debido a las altas temperaturas del material, se crea una capa de óxido. Esto ocurre cuando el material entra en contacto con el oxígeno del ambiente. Esto provoca que el acabado superficial no sea bueno y, que posteriormente haya que retirar esta capa de óxido.
- **Mejor precisión dimensional:** la laminación en frío ofrece una mejor precisión dimensional en comparación con la laminación en caliente. Esto ocurre porque a temperatura ambiente el material es, generalmente, menos maleable, lo que implica que tenga menos capacidad de deformación. Es por esto por lo que se consiguen una mejor precisión en el producto final, lo cual puede ser determinante en muchas aplicaciones.
- **Mejora de las propiedades mecánicas:** la laminación en frío mejora las propiedades mecánicas del material como pueden ser la resistencia, la ductilidad, la tenacidad o la dureza. Esto se debe a varios factores, entre los que se encuentran el fenómeno de endurecimiento por deformación en frío o la

reducción del tamaño de grano.

- Menor consumo de energía: dado que la deformación se realiza a temperatura ambiente, no es necesario calentar el material hasta las temperaturas requeridas por la laminación en caliente, lo cual implica una reducción en el consumo de energía.

En general, la laminación en frío tiene numerosas ventajas que la laminación en caliente. Sin embargo, también cuenta con algunas desventajas dado que se requieren mayores fuerzas para llevar a cabo la deformación del material y no se pueden conseguir grandes reducciones o formas complejas.

Para la realización de este trabajo, se utilizará el método de laminación en frío debido a que el material utilizado será plastilina. Este material es ideal para las prácticas de laboratorio, dado que sus propiedades son adecuadas para esta finalidad, además de ser un material barato y accesible.

2.2 Parámetros que intervienen en el proceso de laminación

Para analizar el proceso de laminación, es necesario comprender los parámetros que intervienen en él, estando representados en la figura 2.2. A continuación, se detallarán cada uno de ellos, así como las ecuaciones necesarias para el análisis del proceso.

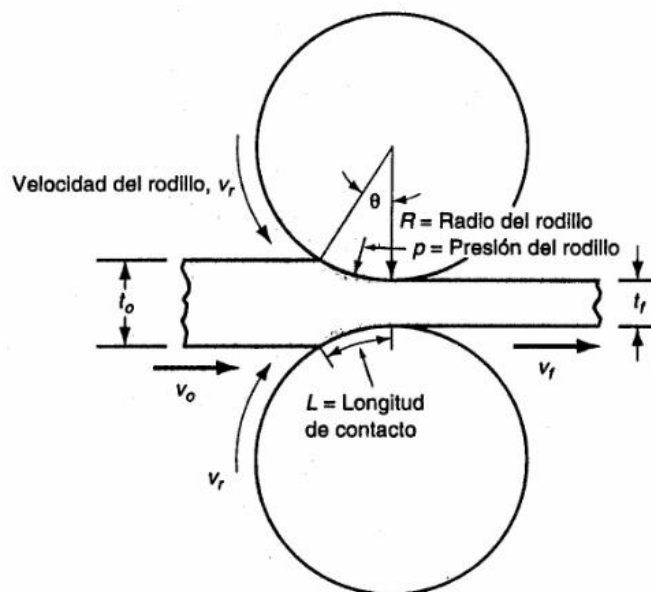


Figura 2.2 Vista lateral de los parámetros que intervienen en la laminación [2]

Como se ha dicho anteriormente, el laminado consiste en reducir el espesor de la geometría inicial. Es por eso por lo que su principal parámetro es el llamado *draft*, que no es más que reducción del espesor debido a la laminación, se ve reflejado en la ecuación 2.1.

$$\Delta h = t_0 - t_f \quad (2.1)$$

Siendo:

Δh = draft (mm)

t_0 = espesor inicial (mm)

t_f = espesor final (mm)

Por otro lado, la reducción del espesor se expresa como un porcentaje en el cual se evalúa la disminución del material en relación con el espesor inicial, según se indica en la ecuación 2.2.

$$r = \frac{(t_0 - t_f)}{t_0} = \frac{\Delta h}{t_0} \quad (2.2)$$

Siendo:

r = reducción (%)

Una de las aplicaciones típicas de la laminación son los trenes de laminación. En este caso, la reducción se calcularía sumando todas las reducciones realizadas en los diferentes pasos.

Por otra parte, en el proceso de laminación se cumple el principio de conservación de volumen, esto es que el material que entra por los rodillos es igual al que sale, lo cual se ve reflejado en la ecuación 2.3.

$$t_0 w_0 L_0 = t_f w_f L_f \quad (2.3)$$

Siendo:

w_0 = ancho inicial (mm)

w_f = ancho final (mm)

L_0 = longitud inicial (mm)

L_f = longitud final (mm)

Además, también se da conservación del gasto volumétrico, lo que significa que la velocidad volumétrica del material antes y después es la misma, por lo que la ecuación 2.4 resultaría:

$$t_0 w_0 v_0 = t_f w_f v_f \quad (2.4)$$

Siendo:

v_0 = velocidad a la entrada (m/s)

v_f = velocidad a la salida (m/s)

El material cuando va fluyendo entre los rodillos, entra en contacto con ellos en una zona llamada *arco de contacto*, definida por un ángulo θ . Los rodillos, definidos por su radio R , tienen una velocidad v_r . Esta velocidad se iguala a la velocidad de trabajo en punto llamado *punto de no deslizamiento*. Cabe destacar que en los alrededores de dicho punto se produce fricción y deslizamiento del material con los rodillos. El deslizamiento se puede evaluar mediante la ecuación 2.5.

$$s = \frac{v_f - v_r}{v_r} \quad (2.5)$$

Siendo:

s = deslizamiento

v_r = velocidad del rodillo (m/s)

En el arco de contacto hay una línea donde la velocidad de deslizamiento del rodillo con el material es cero. Esta línea recibe el nombre de *línea neutra*. La posición de esta línea depende de factores como la fricción y la geometría. Entre la entrada y la línea neutra, la fricción ayuda al material a entrar entre los rodillos, mientras que entre dicha línea y la salida, se opone.

La longitud de contacto entre el rodillo y el material se puede calcular a partir del radio de los rodillos y del *draft* de la siguiente manera en la ecuación 2.6:

$$L = \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (2.6)$$

Siendo:

L = longitud de contacto entre el rodillo y el material

R = radio de los rodillos

El material al pasar por los rodillos, al disminuir el espesor, además de aumentar la longitud, aumenta el ancho. Este parámetro se conoce como ensanchamiento. En general, el ensanchamiento es pequeño en comparación con el aumento de la longitud. Este valor se puede hallar según la ecuación 2.7:

$$\%w = \frac{w_f - w_o}{w_o} \cdot 100 \quad (2.7)$$

En la figura 2.3 se puede apreciar el ensanchamiento que sufre el material al atravesar los rodillos:



Figura 2.3 Ensanchamiento del material tras la laminación

Ahora, se procede a detallar los parámetros del proceso. A partir del espesor inicial y final del material se puede hallar el esfuerzo real que sufre este al laminarse, lo cual se ve en la ecuación 2.8:

$$\epsilon = \ln \frac{t_o}{t_f} \quad (2.8)$$

Mediante este valor, es posible hallar el esfuerzo de fluencia promedio, $\bar{Y}_f$, que define el valor de la tensión a partir del cual el material sufrirá deformaciones plásticas. Se determina mediante la ecuación 2.9.

$$\bar{Y}_f = \frac{K \epsilon^n}{1 + n} \quad (2.9)$$

Siendo:

$\bar{Y}_f$ = esfuerzo promedio de fluencia (MPa)

n = exponente de endurecimiento por deformación

K = coeficiente de resistencia (MPa)

Cabe destacar que la ecuación 2.9 es exclusiva de la laminación en frío, teniendo el esfuerzo promedio de fluencia una expresión distinta cuando se trata de laminación en caliente.

Para que el material fluya entre los rodillos es necesario que haya fricción. La fricción se define mediante el coeficiente de fricción, por el cual se puede calcular el máximo *draft* que es posible alcanzar con un determinado coeficiente de fricción. Este coeficiente depende de factores como la lubricación, el material y la temperatura de trabajo. En la ecuación 2.10 se puede comprobar la relación entre el draft y el coeficiente de fricción:

$$\Delta h_{m\acute{a}x} = \mu^2 R \quad (2.10)$$

Siendo:

$\Delta h_{m\acute{a}x}$ = *draft* máximo (mm)

μ = coeficiente de fricción

Según Groover [2] los coeficientes típicos en la laminación son: $\mu = 0.1$ para laminación en frío, $\mu = 0.2$ para laminación en tibio y $\mu = 0.4$ para la laminación en caliente. Este valor depende de factores como la temperatura de trabajo, el material y la lubricación.

De la ecuación 2.10 se puede concluir que, si no hay fricción, es decir, el coeficiente de fricción es cero, la laminación sería imposible, dado que el *draft* sería cero. Además, si este coeficiente fuese muy bajo el material podría deslizarse.

Se puede calcular la fuerza necesaria para mantener los rodillos separados. Para ello son necesarios dos puntos, uno a cada lado del punto de no deslizamiento. En este punto la presión es máxima, mientras que, a un lado y a otro la presión va disminuyendo. Para hallar la fuerza se integra la presión sobre el área de contacto entre el rodillo y el material, como se refleja en la ecuación 2.11.

$$F = w \int_0^L p \, dL \quad (2.11)$$

Siendo:

F = fuerza de laminado

w = ancho del material

p = presión de laminado

La ecuación 2.11 se puede aproximar mediante el esfuerzo de fluencia que sufre el material, definido anteriormente. Para ello se utiliza la ecuación 2.12.

$$F = \bar{Y}_f w L \quad (2.12)$$

En el laminado el momento de torsión se puede aproximar según la ecuación 2.13:

$$T = 0.5 FL \quad (2.13)$$

Siendo

T = momento de torsión (N·m)

Por último, la potencia necesaria para mover los rodillos se puede calcular mediante el momento de torsión y la velocidad angular de los rodillos, quedando la ecuación 2.14:

$$P = 2\pi NFL \quad (2.14)$$

Siendo:

P = potencia (J/s)

N = velocidad de rotación (rev/min)

3 DISEÑO DE LOS LAMINADORES

3.1 Introducción

En trabajos realizados con anterioridad como parte de un proyecto de innovación docente desarrollado por el departamento de Ingeniería mecánica y fabricación [1], se realizó una propuesta de fabricar un laminador con fines docentes. La idea inicial consistía en el diseño y fabricación de un laminador que contara de varias etapas que permitieran evaluar la influencia de diferentes parámetros del proceso de laminado. La distancia entre rodillos es la que determina el espesor final del material, distancia que va disminuyendo a medida que el material va avanzando por las diferentes estaciones hasta llegar al espesor deseado. En la figura 3.1 se muestra esquema de un tren de laminación con 5 etapas.

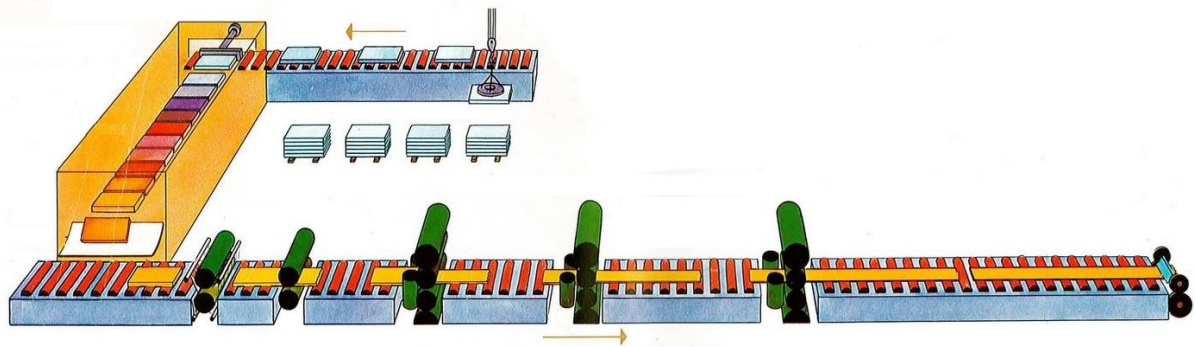


Figura 3.1 Ejemplo etapas de un tren de laminación [9]

Esta propuesta implicaba que las reducciones de espesor se realizaran de manera continua, por lo que se optó por diseñar diferentes laminadores con diferentes características. De esta manera, se podía estudiar independientemente cada paso del tren de laminación. Además, sin perder de vista la finalidad educativa de este equipo, resultaba más cómodo que las estaciones fueran independientes de cara a la realización de las prácticas por parte de los alumnos.

El diseño realizado entonces [1] se realizó para que el laminador fuera elaborado mediante fabricación aditiva, lo que condicionó el dimensionado de algunos elementos. Aunque el diseño se hizo en su totalidad, como se aprecia en la figura 3.2, solo se llegaron a fabricar algunas piezas, como las mostradas en la figura 3.3.

Finalmente, pensando en la durabilidad de los elementos, ya que iba a tener gran manipulación por parte de los estudiantes, se desistió fabricar el laminador por este método. Y, con un prototipo antiguo que había en el taller (figura 3.4) se comenzó a trabajar en los laminadores que se presentan en este proyecto.

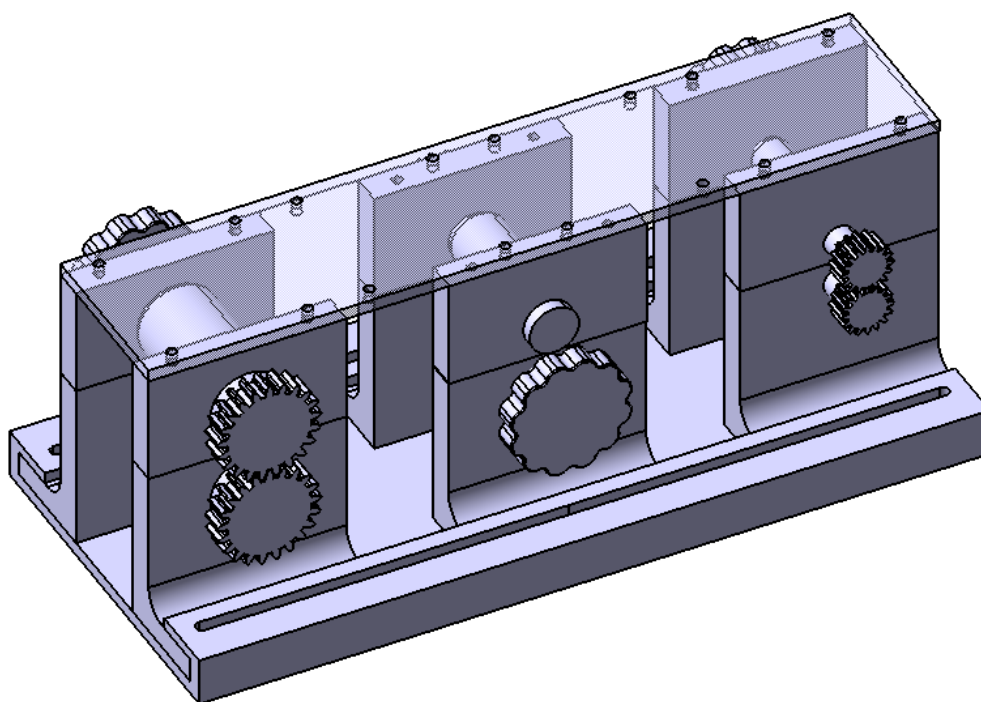


Figura 3.2 Diseño de laminador para fabricación mediante impresión 3D [1]



Soporte lateral superior



Accionador



Ruedas dentadas

Figura 3.3 Elementos del laminador elaborado mediante fabricación aditiva [1]



Figura 3.4 Prototipo antiguo laminador

La idea es desarrollar un prototipo que cumpla con diferentes requisitos:

- Diseño funcional: se buscó que los laminadores fueran fáciles de usar y que permitiera el uso de un material asequible, como en este caso, la plastilina. Además, se ha intentado garantizar la durabilidad del equipo diseñado.
- Prototipo desmontable: de esta manera se puede estudiar cada uno de los elementos que forman parte de los laminadores. Esto, además, implica una ventaja de cara a futuras mejoras o cambios en el diseño de dichos laminadores.
- Diseño en diferentes etapas: diseñar varios laminadores con diferentes características para poder analizar de manera independiente los parámetros del proceso de laminación.

3.2 Descripción de los laminadores y sus componentes

Se decidió diseñar y fabricar cuatro laminadores, con el fin de implementar en cada uno las características que permitieran estudiar los diferentes parámetros de la laminación. Cada laminador consiste en una base con dos rodillos. Dos de los laminadores tendrán rodillos de igual radio R , pero diferente separación entre ellos. Esto permite estudiar cómo afecta la reducción de espesor en el proceso. Por otro lado, otros dos rodillos tendrían diferente radio R , pero mismo espesor. En este caso, se estudiaría cómo afecta el radio del rodillo R en la laminación. Por último, el cuarto laminador consistiría en un laminador de forma con el fin de comprobar que la laminación no solo permite reducciones de espesor, sino que también permite la fabricación de diferentes perfiles. En la figura 3.5 se muestran gráficamente las configuraciones planteadas antes, haciendo referencia a la numeración que se le dará a cada laminador, lo cual es necesario para alusiones posteriores a los mismos.

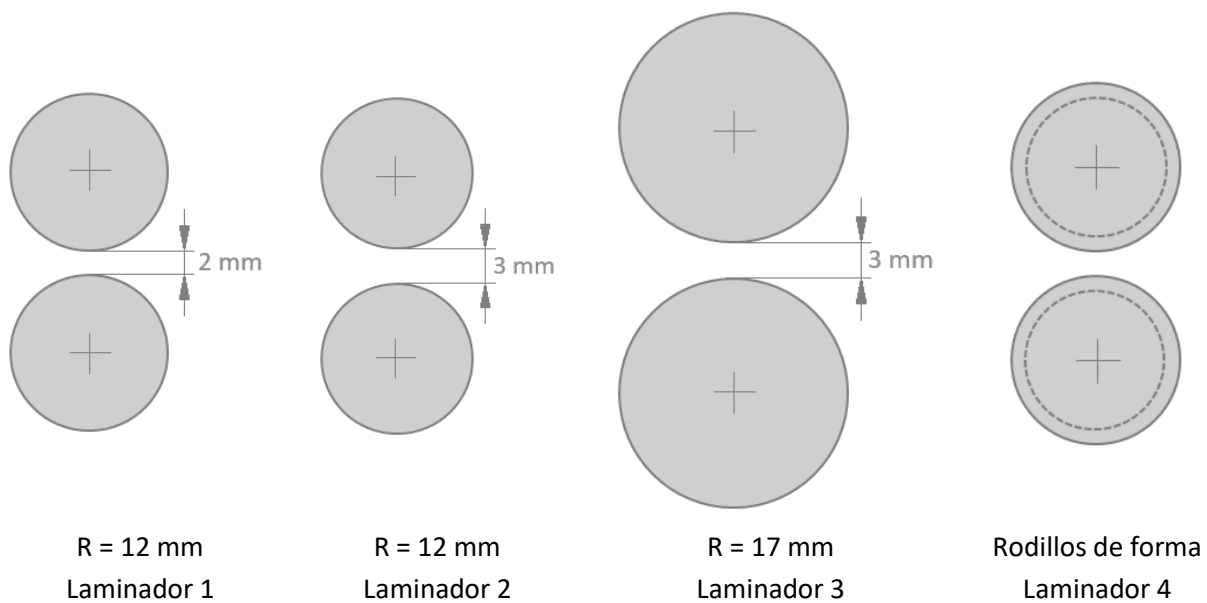


Figura 3.5 Configuraciones de los 4 laminadores

Para permitir el movimiento entre ambos rodillos, es necesario colocar ruedas dentadas. Estas ruedas son las que permitirán conseguir los diferentes espesores en cada laminador. Por otra parte, dado que los laminadores serán manuales, se añadirá una manivela, que permita ayudar a la introducción del material entre los rodillos.

Cabe destacar que, para el diseño de todos los componentes que forman parte de los laminadores se ha usado Solid Edge, un software de diseño asistido por computadora (CAD) desarrollado por Siemens PLM Software. Este cuenta con varios módulos, de los cuales tres han sido especialmente útiles:

- ISO métrico pieza: permite modelar piezas tridimensionales de manera precisa y detallada. Este módulo ha sido utilizado para crear todos los elementos de los laminadores como las bases, rodillos, manivela, etc.
- ISO métrico conjunto: permite ensamblar piezas diseñadas, garantizando que las piezas son compatibles y se ajustan correctamente unas a otras. Este apartado ha sido utilizado para comprobar que todas las piezas funcionaban adecuadamente al unirlos.
- ISO métrico planos: permite obtener los planos de las piezas diseñadas, así como los conjuntos. Ha sido de gran utilidad para obtener los planos de los laminadores en su conjunto, como de cada uno de los elementos por separado.

A continuación, se detallarán todos los componentes que forman parte de los diferentes laminadores. Las dimensiones de cada uno de los elementos diseñados y fabricados se muestran en los planos del Anexo A.

3.2.1 Bases

Para las bases de los laminadores se utilizaron unos perfiles de acero que había disponibles en el taller de mecanizado del departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación de la ETSI, los que se cortaron para conseguir las dimensiones deseadas y se le realizaron diferentes agujeros para colocar los rodillos. Además, se realizó un taladro adicional, que quedase entre ambos rodillos, con el fin de que al laminar se pudiese ver como la plastilina entra entre los rodillos y va disminuyendo su espesor. Todas las bases de los cuatro laminadores tienen las mismas dimensiones, a excepción de los taladros, dado que hay rodillos

de diferentes radios. En la Figura 3.6 se muestra la base del laminador 1 y en la figura 3.7 la del laminador 2. Los agujeros realizados en ambas bases son idénticos dado que lo que marca el diámetro de los agujeros es el diámetro de los rodillos, y en este caso, ambos rodillos tienen el mismo radio. Sin embargo, la distancia entre los taladros no es la misma puesto que la distancia entre los rodillos es diferente.

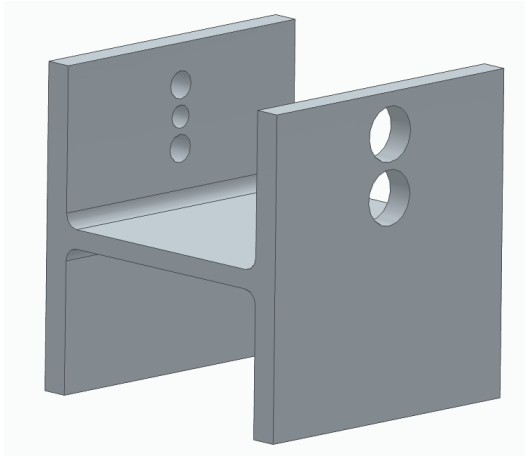


Figura 3.6 Base del laminador 1

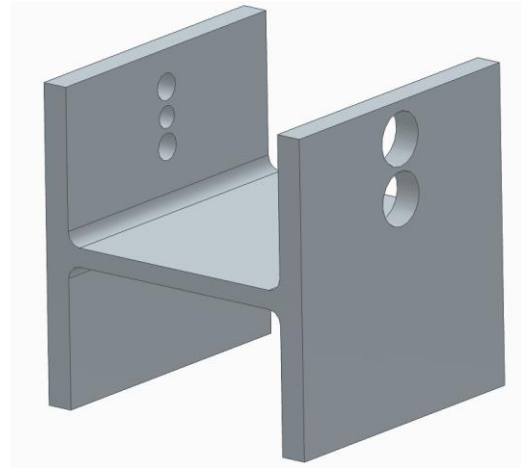


Figura 3.7 Base del laminador 2

En la figura 3.8 se puede observar la base del laminador 3. Lo que cambia con respecto a las anteriores son los taladros del lado izquierdo y la distancia entre ambos taladros. La base del laminador, mostrada en la figura 3.9, es del laminador de forma, es similar a la del laminador 3, lo único que varía son los diámetros de los agujeros y la distancia entre ambos.

Cabe añadir que las bases se pintaron, además de fines estéticos, por la conservación de estas, evitando así que el material se dañará con fenómenos como la corrosión y el desgaste con el paso del tiempo.

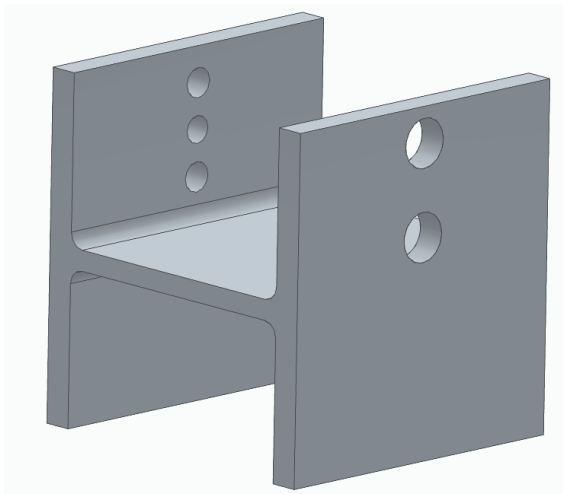


Figura 3.8 Base del laminador 3

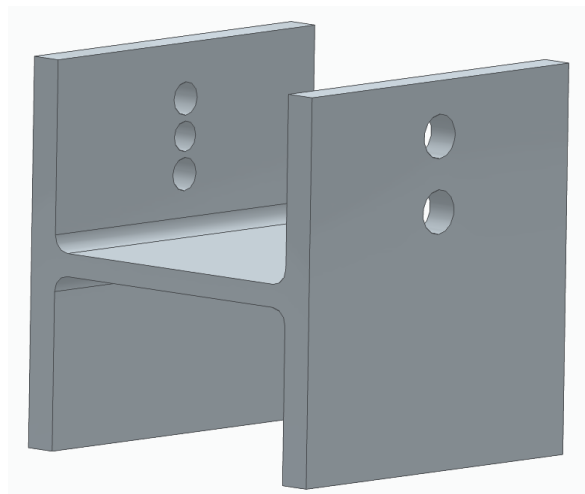


Figura 3.9 Base del laminador de forma

3.2.2 Rodillos

Se decidió que los rodillos tanto del primer laminador como del segundo tendrían $R = 12 \text{ mm}$ y se mecanizaron a esa dimensión (figura 3.10). Por su parte, el laminador 3, consigue el radio final de 17 mm

con un casquillo que se coloca sobre un cilindro mecanizado inicialmente a 10 mm como se muestra en la figura 3.11. La idea del casquillo surge debido a que en la base no se podían realizar dos taladros de 34 mm por cuestiones de espacio. En el caso del laminador de forma (figura 3.12), el uso del casquillo viene porque de esta manera, en un futuro, sería posible desmontar e implementar diferentes casquillos que permitan laminar diferentes perfiles. Esto hace al laminador mucho más flexible y permite una gran variedad de opciones de cara a probar nuevas formas.

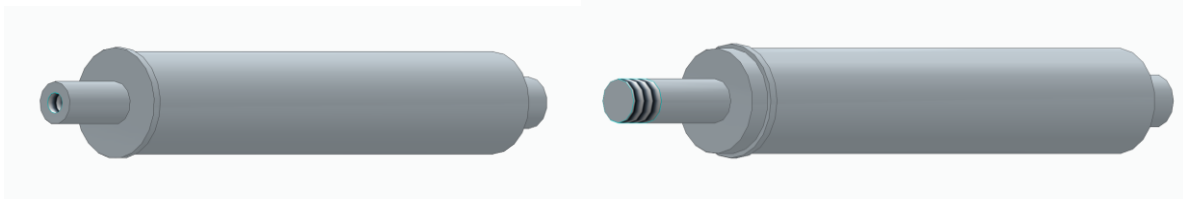
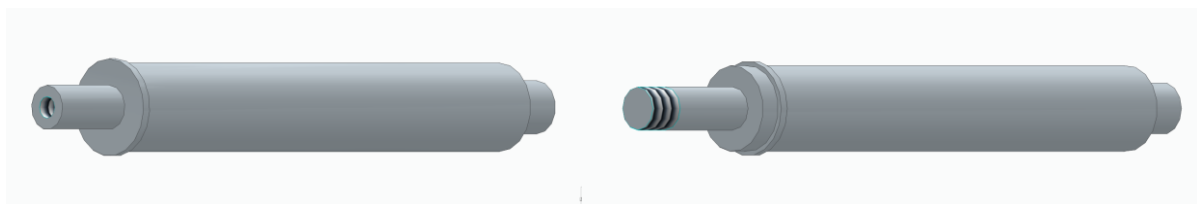
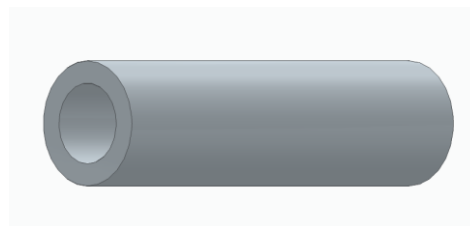


Figura 3.10 Rodillos de los laminadores 1 y 2

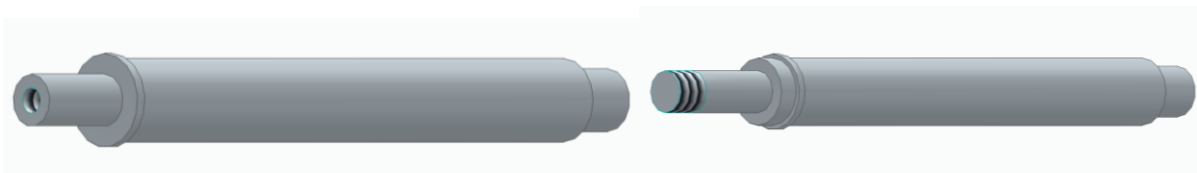


$R = 10 \text{ mm}$



$R = 17 \text{ mm}$

Figura 3.11 Rodillos y casquillo del laminador 3



$R = 8 \text{ mm}$

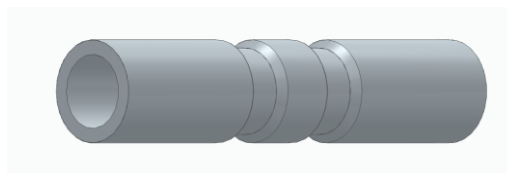


Figura 3.12 Rodillos y casquillo del laminador de forma

3.2.3 Ruedas dentadas

Las ruedas dentadas son esenciales para transmitir el movimiento entre ambos rodillos. Tomando como referencia las dimensiones ya consideradas de las bases, los rodillos y las reducciones de espesor que se

quieren conseguir, se busca en catálogos comerciales, ruedas que cumplan con las necesidades de los laminadores. En este caso, se opta por trabajar con ruedas de módulo 1, con 26, 27 y 37 dientes, según se indica en la figura 3.13:

Z	Mod. 1				
	cod.	De	Dp	d	D
12	PM 26012	14	12	9	5
13	PM 26013	15	13	10	5
14	PM 26014	16	14	10	5
15	PM 26015	17	15	12	6
16	PM 26016	18	16	13	6
17	PM 26017	19	17	14	8
18	PM 26018	20	18	15	8
19	PM 26019	21	19	15	8
20	PM 26020	22	20	16	8
21	PM 26021	23	21	16	8
22	PM 26022	24	22	18	8
23	PM 26023	25	23	18	8
24	PM 26024	26	24	20	8
25	PM 26025	27	25	20	8
26	PM 26026	28	26	20	8
27	PM 26027	29	27	20	8
28	PM 26028	30	28	20	8
29	PM 26029	31	29	20	8
30	PM 26030	32	30	20	8
31	PM 26031	33	31	25	10
32	PM 26032	34	32	25	10
33	PM 26033	35	33	25	10
34	PM 26034	36	34	25	10
35	PM 26035	37	35	25	10
36	PM 26036	38	36	25	10
37	PM 26037	39	37	25	10
38	PM 26038	40	38	25	10

Figura 3.13 Tabla con indicación de las ruedas dentadas seleccionadas para los laminadores [13]

Además, en la figura 3.14 se incluye un plano de las ruedas dentadas junto con algunas especificaciones:

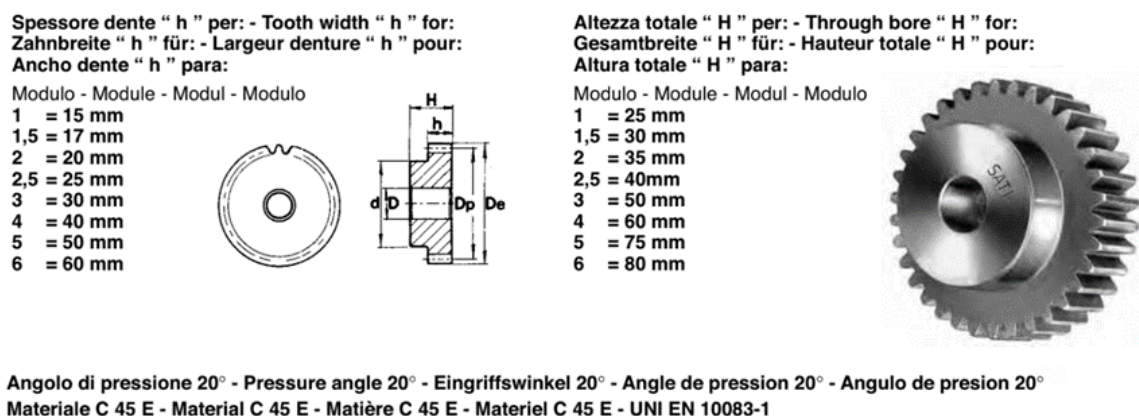


Figura 3.14 Especificaciones de las ruedas dentadas dadas por el fabricante [13]

3.2.4 Manivela

Para el accionamiento, se han diseñado manivelas para cada laminador. Las ruedas dentadas del eje motriz se adaptaron para la instalación de la manivela y se emplearon elementos de fijación para que la manivela gire solidaria con las ruedas dentadas y estas, transmitan el movimiento a los rodillos. En la

figura 3.15 se puede ver el diseño de la manivela y en la figura 3.16 se muestra la adaptación que se hizo a las ruedas dentadas motrices.

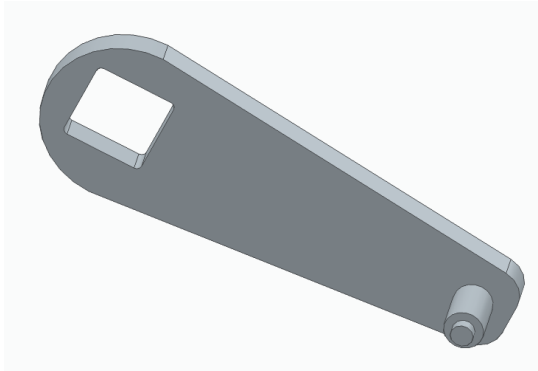


Figura 3.15 Manivela

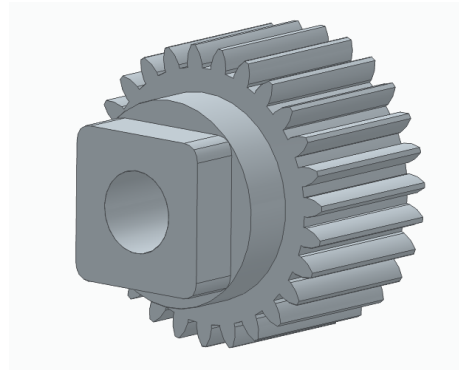


Figura 3.16 Rueda dentada adaptada a la instalación de la manivela

3.3 Ensamblaje

Tras el diseño y la fabricación de todos los elementos que forman parte de los laminadores se procedió al montaje. En primer lugar, se colocan ambos rodillos en la base. Tras esto, se fijan los rodillos por un lateral, para ello se coloca una arandela y un tornillo. Posteriormente, se colocan en el otro lateral las ruedas dentadas. En el eje superior, además, se incluye la manivela. En el eje inferior se fija con arandela y tornillo, y en el superior con una tuerca.

En la figura 3.17 se puede observar el primer laminador ensamblado, en la figura 3.18 el segundo, en la Figura 3.19 figura 3.19 el tercero, y, por último, en la figura 3.20 el laminador de forma.

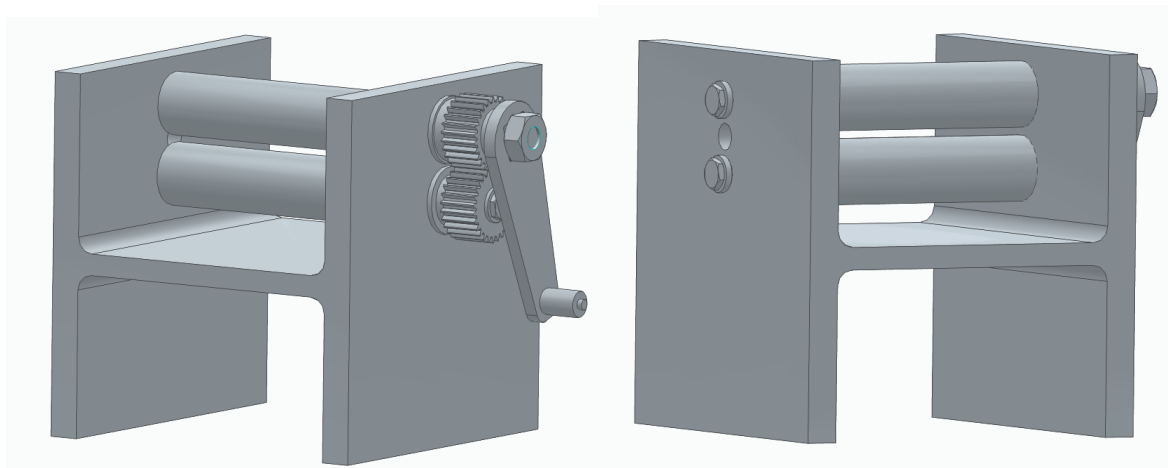


Figura 3.17 Laminador 1

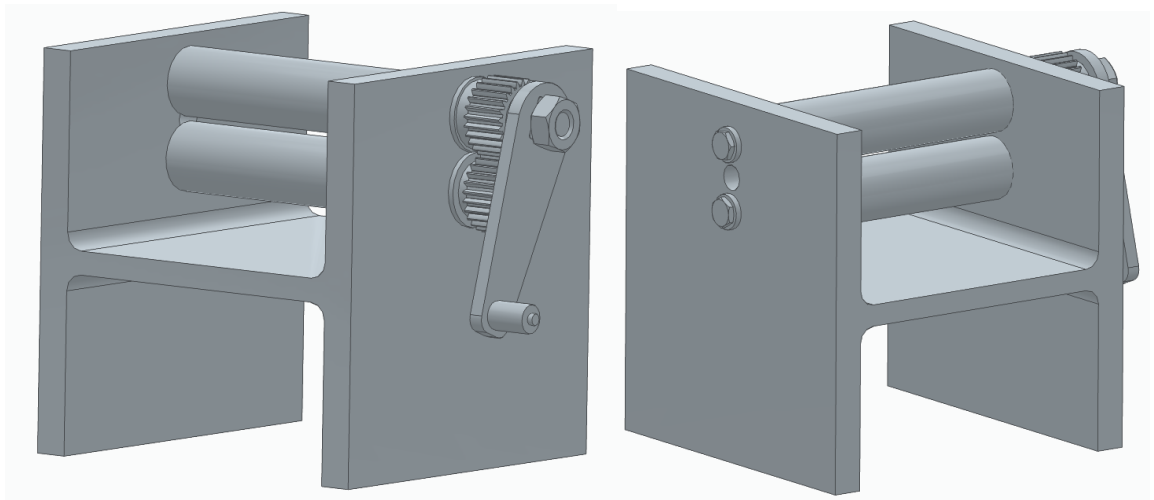


Figura 3.18 Laminador 2

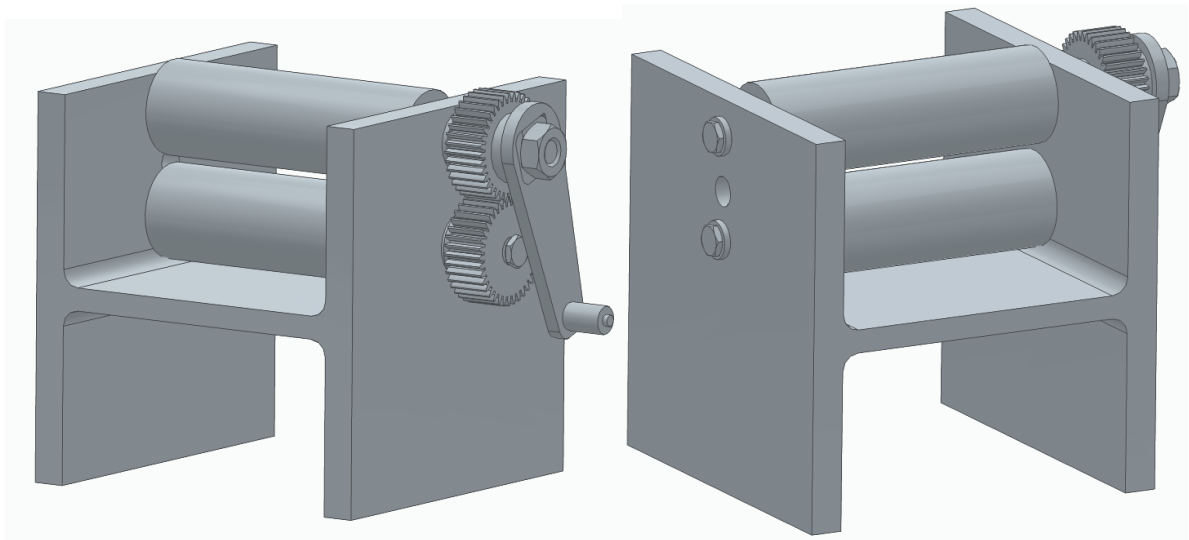


Figura 3.19 Laminador 3

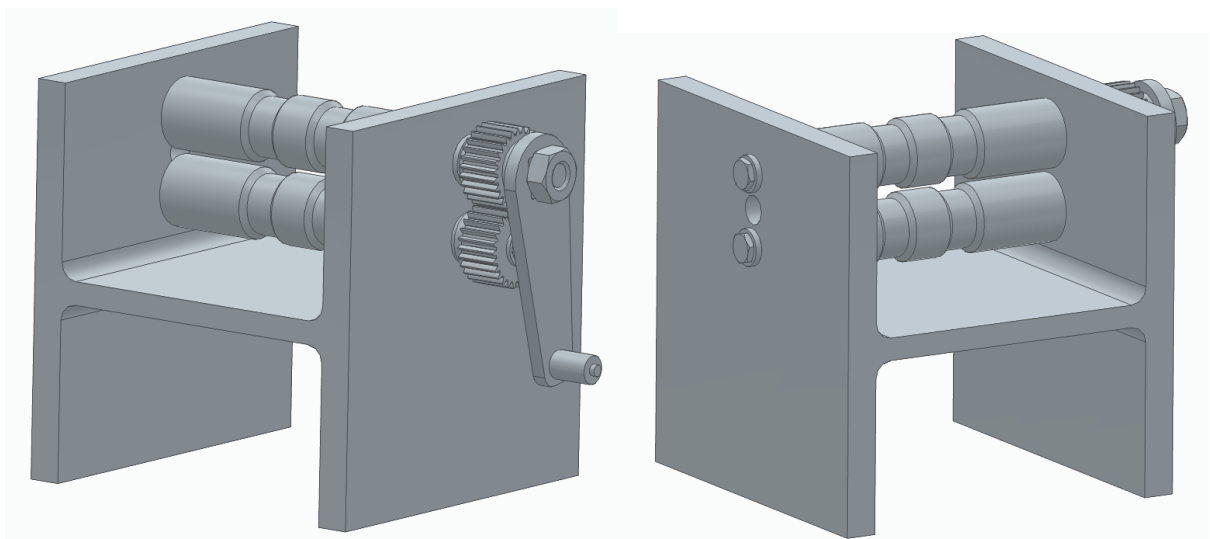


Figura 3.20 Laminador de forma

3.4 Fabricación de las probetas

Dado que los laminadores son manuales y han sido diseñados con fin educativo, se utilizará la plastilina como material a laminar. La fabricación de las probetas se realiza en un molde, como el mostrado en la figura 3.21. Con el fin de evitar que la plastilina se quede pegada al molde se utiliza unas láminas de teflón (figura 3.23) y con la ayuda de una prensa (figura 3.24), se aplica una fuerza, con el fin de que la plastilina rellene todo el interior del molde (figura 3.25).

Una vez extraída la plastilina del molde (figura 3.26), se recortará de manera que quede una probeta rectangular con las dimensiones necesarias para la realización de los diferentes ensayos. El ancho y el espesor de la probeta serán siempre iguales dado que son las dimensiones que proporciona el molde y la longitud, que puede ser variable, se considerará la misma para poder comparar parámetros de ensayos.

En la figura 3.21, se observa a la derecha la parte inferior del molde y a la izquierda la superior.



Figura 3.21 Molde para la fabricación de probetas

En la figura 3.22 se detalla el plano del molde inferior.

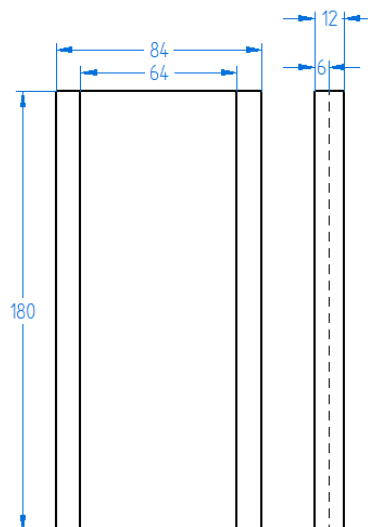


Figura 3.22 Plano del molde inferior para la fabricación de probetas

En la figura 3.23 se muestra la prensa utilizada para la fabricación de las probetas.



Figura 3.23 Prensa empleada en la fabricación de probetas

En la figura 3.24 se muestra la plastilina colocada en la cavidad del molde, junto con el papel de teflón mencionado anteriormente.



Figura 3.24 Plastilina en el molde previa al prensado

Por último, en la figura 3.25 se observa el molde tras el prensado.



Figura 3.25 Plastilina en el molde tras el prensado

Tras realizar eso, se retira la plastilina del molde y se recorta para dejar las dimensiones deseadas, quedando una probeta como la siguiente, mostrada en la figura 3.26.



Figura 3.26 Probeta

4 PARTE EXPERIMENTAL

En este capítulo se describirán los ensayos realizados, así como un análisis de los resultados obtenidos, con vistas al planteamiento de la práctica de laboratorio para los alumnos.

4.1 Procedimiento experimental

Tras el diseño y fabricación de los laminadores, se han llevado a cabo diferentes ensayos para estudiar los parámetros que influyen en la laminación con vistas al diseño y planificación de las prácticas de laboratorio de los estudiantes. Se han laminado varias probetas de plastilina en cada uno de los laminadores, teniendo en cuenta el lubricar los rodillos con aceite de parafina para evitar que la plastilina se adhiera a los rodillos. Antes y después de laminar las probetas se miden con papel milimetrado

Antes de comenzar los ensayos se realiza una comprobación para determinar qué condición para el comienzo de la laminación está presente en el ensayo, de acuerdo con la geometría de los rodillos y de las probetas, como se representa en la figura 4.1, donde están indicadas las fuerzas actuantes, el ángulo θ que abarca la longitud de contacto L , así como el espesor inicial h_0 y final h_f del producto a laminar. Para el caso estudiado, que es una laminación en frío, se toma como referencia $\mu = 0,1$ [2]

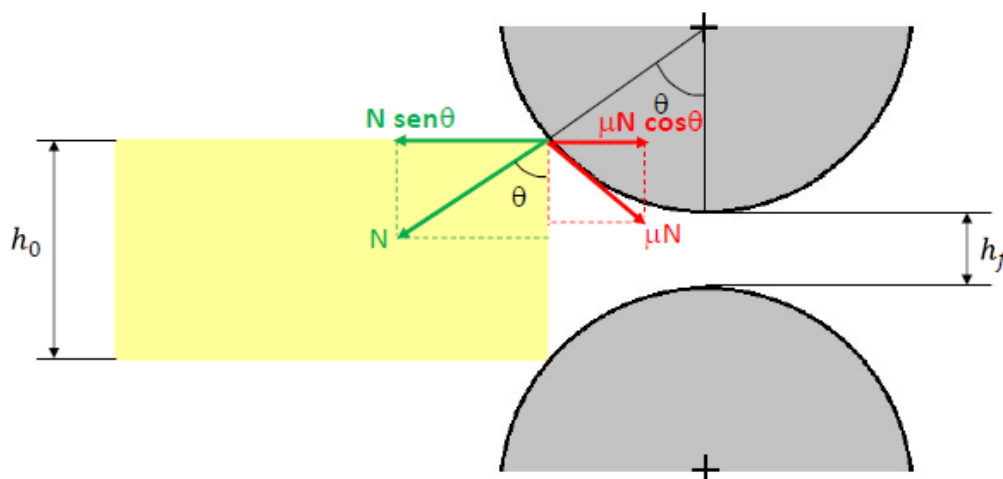


Figura 4.1 Representación esquemática de la laminación [2]

Según Goover [2] estas condiciones son:

$$\text{Arrastre natural} \quad \mu > \tan \theta \rightarrow \mu > \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (4.1)$$

$$\text{Arrastre forzado} \quad \tan \frac{\theta}{2} \leq \mu \leq \tan \theta \quad (4.2)$$

$$\text{Deslizamiento global } \mu < \tan \frac{\theta}{2} \quad (4.3)$$

En la tabla 4.1 se resumen los parámetros de partida y los calculados. A partir de la ecuación 4.1, se calcula el coeficiente de fricción y se determina el valor de θ .

Tabla 4.1 Parámetros para la comprobación de la condición de laminación

Laminador	R [mm]	ho [mm]	hf [mm]	Δh [mm]	$\mu > \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$	θ	$\tan \frac{\theta}{2}$
1	12	6	2	4	0.50	26.56	0,24
2	12	6	3	3	0.58	30.11	0,27
3	17	6	3	3	0.42	22.78	0,20

Tras estos resultados, se da la condición de deslizamiento global, lo que implicaría que no se puede laminar. Sin embargo, en este caso, como se trata de un material como la plastilina, se comprobó experimentalmente, que hay que forzar la entrada de la probeta entre los cilindros y a partir de ahí, el proceso se realiza adecuadamente, no existiendo en ningún momento el deslizamiento de la probeta.

En la tabla 4.2 se observan los resultados de la laminación de las probetas en el laminador 1, con radio de rodillos de 12 mm y espesor de salida de 2 mm.

Tabla 4.2 Resultados ensayos laminador 1 (R = 12 mm, e = 2 mm)

	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Prueba 5	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Ancho [mm]	64	65	64	65	64	65	64	66	64	66
Largo [mm]	75	180	87	215	81	192	88	210	76	180
Espesor [mm]	6	2	6	2	6	2	6	2	6	2

En la tabla 4.3 se observan los resultados de la laminación de las probetas en el laminador 2, con rodillos de radio de 12 mm y espesor de salida de 3 mm.

Tabla 4.3 Resultados ensayos laminador 2 (R = 12 mm, e = 3 mm)

	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Prueba 5		Prueba 6	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Ancho [mm]	64	66	64	65	64	66	64	65	64	65	64	65
Largo [mm]	100	170	82	145	86	142	94	160	69	105	72	120
Espesor [mm]	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3

En la tabla 4.4 se observan los resultados de la laminación de las probetas en el laminador 3, con rodillos de radio de 17 mm y espesor de salida de 3 mm.

Tabla 4.4 Resultados ensayos en el laminador 3 (R = 17 mm, e = 3 mm)

	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Prueba 5		Prueba 6	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Ancho [mm]	64	66	64	65	64	66	64	65	64	65	64	65
Largo [mm]	100	170	82	145	86	142	94	160	69	105	72	120
Espesor [mm]	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3

Una vez realizados los ensayos, se calculan los parámetros de manera teórica para proceder a su comparación. El primero de estos parámetros calculados teóricamente es el ensanchamiento, con el objetivo de verificar que es menor que el 10% y que, por tanto, se puede considerar deformación plana.

Considerando que en el proceso hay conservación de volumen, se ha calculado la longitud final teórica para compararla con la longitud medida al finalizar la laminación. Esta longitud final teórica se calculó de dos maneras diferentes: la primera, suponiendo que no hay ensanchamiento y la segunda, teniendo en cuenta el ensanchamiento calculado anteriormente. En las tablas de 4.5 a la 4.7, se muestran los resultados obtenidos para los laminadores 1, 2 y 3 respectivamente.

Tabla 4.5 Cálculos teóricos de los parámetros de ensayo en el laminador 1

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Ensanchamiento [%]	2	2	2	3	3
Longitud final teórica con el ensanchamiento medido [mm]	222	257	239	256	221
Longitud final teórica sin ensanchamiento [mm]	225	261	243	264	228
Incremento de longitud con ensanchamiento [%]	140	147	137	139	137
Incremento de longitud sin ensanchamiento [%]	200	200	200	200	200

Tabla 4.6 Cálculos teóricos de los parámetros de ensayo en el laminador 2

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
Ensanchamiento [%]	3	2	3	2	2	2
Longitud final teórica con el ensanchamiento medido [mm]	194	161	167	185	136	142
Longitud final teórica sin ensanchamiento [mm]	200	164	172	188	138	144
Incremento de longitud con ensanchamiento [%]	70	77	65	70	52	67
Incremento de longitud sin ensanchamiento [%]	100	100	100	100	100	100

Tabla 4.7 Cálculos teóricos de los parámetros de ensayo en el laminador 3

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
Ensanchamiento [%]	3	3	3	2	3	3
Longitud final teórica con el ensanchamiento medido [mm]	157	184	176	152	145	175
Longitud final teórica sin ensanchamiento [mm]	162	190	182	154	150	180
Incremento de longitud con ensanchamiento [%]	99	92	102	95	97	94
Incremento de longitud sin ensanchamiento [%]	100	100	100	100	100	100

4.2 Análisis de resultados

Tras el análisis de estos resultados experimentales y los resultados calculados, se puede plantear que, en todos los casos, el ensanchamiento se encuentra entre el 2 y el 3%, por lo que el proceso se puede decir que ocurre en condiciones de laminación plana, ya que es inferior al 10%.

Además, como se parte de una condición de conservación de volumen, donde se considera que no hay ensanchamiento, la longitud teórica calculada suponiendo que no hay ensanchamiento es superior a la longitud calculada con el ensanchamiento medido. Esto mismo se aplica a la longitud, ya que el alargamiento alcanzado al laminar en el laminador de $R = 12 \text{ mm}$ y $e = 2 \text{ mm}$ es muy superior a los alargamientos alcanzados con los otros dos laminadores. Esto es debido a que en el primero la reducción del espesor, el *draft*, es superior.

Para ver el efecto de la reducción de espesor, considerando rodillos de igual radio, se presenta en la tabla 4.8 una comparativa entre los valores obtenidos en los ensayos presentados antes, los cuales se representan en la figura 4.2.

Tabla 4.8 Valores comparativos de los ensayos en los laminadores 1 y 2

		Ancho [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]
Ensayo 1	Inicial	64	72	6
	Laminador 1 ($e_{salida} = 2 \text{ mm}$)	65	175	2
	Laminador 2 ($e_{salida} = 3 \text{ mm}$)	65	120	3
Ensayo 2	Inicial	64	75	6
	Laminador 1 ($e_{salida} = 2 \text{ mm}$)	65	180	2
	Laminador 2 ($e_{salida} = 3 \text{ mm}$)	65	122	3
Ensayo 3	Inicial	64	77	6
	Laminador 1 ($e_{salida} = 2 \text{ mm}$)	65	185	2
	Laminador 2 ($e_{salida} = 3 \text{ mm}$)	66	132	3

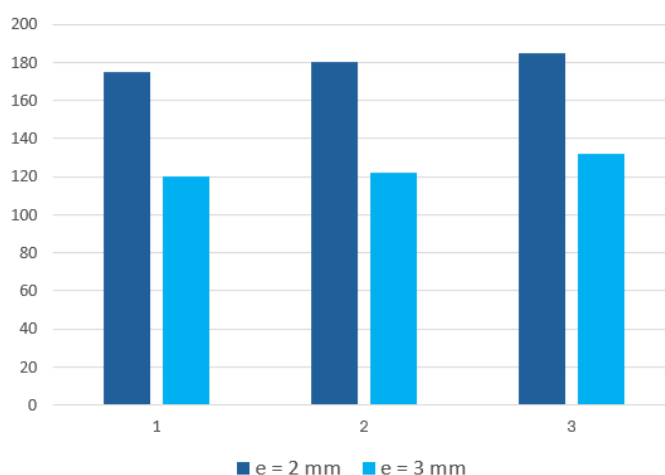


Figura 4.2 Representación gráfica de la variación de longitud en los laminadores 1 y 2

Con los valores de la tabla 4.8 se ha procedido al cálculo del alargamiento y el ensanchamiento producido en estas probetas, los cuales se indican en la tabla 4.9

Tabla 4.9 Comparativa entre el ensanchamiento y el alargamiento en los laminadores 1 y 2

		Ensanchamiento [%]	Alargamiento [%]
Ensayo 1	Laminador 1 ($e_{salida} = 2 \text{ mm}$)	2	143
	Laminador 2 ($e_{salida} = 3 \text{ mm}$)	2	67
Ensayo 2	Laminador 1 ($e_{salida} = 2 \text{ mm}$)	2	140
	Laminador 2 ($e_{salida} = 3 \text{ mm}$)	2	63
Ensayo 3	Laminador 1 ($e_{salida} = 2 \text{ mm}$)	3	140
	Laminador 2 ($e_{salida} = 3 \text{ mm}$)	3	71

Tras el análisis de los resultados de la tabla 4.9, se aprecia que, como era de esperar, las longitudes finales obtenidas son mucho mayores en el laminador 1, donde la reducción de espesor es mayor. Además, el ensanchamiento se mantiene prácticamente constante y con valores pequeños, como ya se mencionó con anterioridad.

En la tabla 4.10 se muestran valores comparativos de los ensayos, en este caso, considerando igual reducción de espesor y diferentes radios de rodillos, por lo que se comparan los resultados de los laminadores 2 ($R = 12 \text{ mm}$) y 3 ($R = 17 \text{ mm}$) y se representan en la figura 4.3.

Tabla 4.10 Valores comparativos de los ensayos en los laminadores 2 y 3

		Ancho [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]
Ensayo 1	Inicial	64	80	6
	Laminador 2 ($R = 12 \text{ mm}$)	65	135	3
	Laminador 3 ($R = 17 \text{ mm}$)	65	155	3
Ensayo 2	Inicial	64	68	6
	Laminador 2 ($R = 12 \text{ mm}$)	65	110	3
	Laminador 3 ($R = 17 \text{ mm}$)	65	132	3
Ensayo 3	Inicial	64	75	6
	Laminador 2 ($R = 12 \text{ mm}$)	65	128	3
	Laminador 3 ($R = 17 \text{ mm}$)	66	150	3

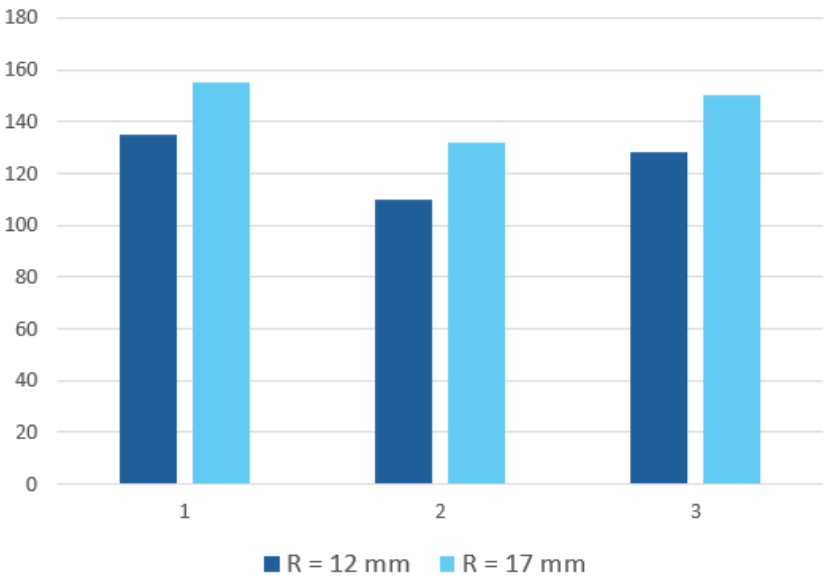


Figura 4.3 Representación gráfica de la variación de longitud en los laminadores 2 y 3

Como en el caso anterior, se ha calculado el ensanchamiento y el alargamiento con los valores de la tabla 4.10, los cuales se recogen en la tabla 4.11.

Tabla 4.11 Comparativa entre el ensanchamiento y el alargamiento en los laminadores 2 y 3

		Ensanchamiento [%]	Alargamiento [%]
Ensayo 1	Laminador 2 ($R = 12 \text{ mm}$)	2	69
	Laminador 3 ($R = 17 \text{ mm}$)	2	94
Ensayo 2	Laminador 2 ($R = 12 \text{ mm}$)	2	62
	Laminador 3 ($R = 17 \text{ mm}$)	2	94
Ensayo 3	Laminador 2 ($R = 12 \text{ mm}$)	2	71
	Laminador 3 ($R = 17 \text{ mm}$)	3	100

Evaluando los resultados de la tabla 4.11, se observa que el alargamiento es superior en el laminador 3 debido a que el radio del rodillo es mayor. Esto deja constancia de que, al aumentar el radio del rodillo, la longitud alcanzada es mayor. De nuevo, el ensanchamiento alcanzado es constante con valores pequeños.

4.3 Futuras mejoras

Al culminar con la fabricación del laminador de forma y ensamblar todos los componentes, se procedió a laminar con el mismo. Fue entonces cuando se vio que el diseño no era válido.

La plastilina salía del laminador con la forma diseñada, pero, en los extremos, la superficie no era uniforme ni plana. La plastilina tiende a adoptar formas irregulares debido a la falta de unos límites laterales.

De cara a futuras mejoras para el uso de este laminador, sería necesario incorporar algún elemento entre los rodillos de manera que obligue a la plastilina a seguir una determinada forma constante y uniforme a lo largo de toda la laminación. De esta manera, el diseño del laminador sería válido.

5 PLANTEAMIENTO DE LA PRÁCTICA Y EXPERIMENTACIÓN

En este apartado se detallará la propuesta de ejercicios a ejecutar por los alumnos en las prácticas de laboratorio de Tecnología de Fabricación usando los laminadores diseñados, de manera que los estudiantes puedan evaluar los parámetros que influyen en el proceso de laminación.

5.1 Introducción

La laminación es un proceso por el cual se reduce el espesor de un material al introducirlo entre dos rodillos. En este proceso intervienen una variedad de parámetros que han sido estudiados en las clases teóricas de Tecnología de Fabricación. En estas prácticas, el objetivo es comprender cómo funcionan algunos de estos parámetros, dándole mayor importancia al radio de los rodillos y a la reducción del espesor.

Además, con la laminación se consiguen infinidad de perfiles mediante rodillos de forma. Es por esto, que en estas prácticas se utilizará un laminador de forma para comprender su funcionamiento.

5.2 Descripción de la práctica

El objetivo de esta práctica es comprobar de manera visual en qué consiste el proceso de laminación y entender los parámetros que intervienen en él. Para ello, se contará con 4 laminadores, cada uno de ellos con diferentes características, las cuales se enumeran a continuación:

- Laminador 1: $R = 12 \text{ mm}$, $e = 2 \text{ mm}$
- Laminador 2: $R = 12 \text{ mm}$, $e = 3 \text{ mm}$
- Laminador 3: $R = 17 \text{ mm}$, $e = 3 \text{ mm}$
- Laminador 4: laminador de forma

siendo R el radio de los rodillos y e la separación entre los rodillos.

Los parámetros que se evaluarán en los ejercicios serán el ensanchamiento y el alargamiento que tienen lugar en la probeta después de la laminación, así como, la influencia del radio de los rodillos y la reducción del espesor. Por último, se laminará una probeta en el laminador de forma. Se realizarán 5 ejercicios, centrando cada ejercicio en el estudio de un parámetro.

El material a laminar será la plastilina. Se fabricarán probetas en moldes preparados con tal fin. Antes de cada laminación, habrá que aplicar aceite de parafina, con el fin de lubricar los rodillos y que la plastilina no se quede adherida. En todos los ejercicios, para realizar las medidas de la probeta, tanto antes de la laminación como después, se utilizará papel milimetrado.

5.3 Preparación de probetas

Para la fabricación de las probetas se utilizará un molde, en el que en primer lugar, se colocarán unas láminas de teflón en cada parte, con el fin de que la extracción de la probeta resulte más sencilla. Una vez colocado esto, se pone la plastilina en la parte inferior y se coloca la parte superior del molde. Con ayuda de una prensa, se aplica una fuerza para que la plastilina rellene la cavidad completa del molde. Para finalizar, se retira la probeta del molde y se recorta a las dimensiones establecidas.

Se fabricarán 4 probetas, una para cada laminador. Es importante que todas las probetas tengan las mismas dimensiones, para poder comparar los resultados partiendo de las mismas dimensiones iniciales. El ancho y el espesor son los que proporciona el molde, la longitud la determina el alumno al fabricar la probeta.

Cabe añadir, que, si por cuestiones de tiempo el alumno no pudiese fabricar las probetas, si participaría en la medición inicial de las mismas, ya que conocer las dimensiones de las probetas antes del laminado es un aspecto clave.

5.4 Realización de ensayos

En primer lugar, laminará cada una de las tres probetas en cada laminador, completando las siguientes dimensiones:

Probeta 1:

Laminador 1 R = 12 mm e = 2 mm

Dimensiones iniciales

Ancho: _____ mm

Largo: _____ mm

Espesor: _____ mm

Dimensiones finales

Ancho: _____ mm

Largo: _____ mm

Espesor: _____ mm

Probeta 2:

Laminador 2 R = 12 mm e = 3 mm

Dimensiones iniciales

Ancho: _____ mm

Largo: _____ mm

Espesor: _____ mm

Dimensiones finales

Ancho: _____ mm

Largo: _____ mm

Espesor: _____ mm

Probeta 3:Laminador 3 $R = 17 \text{ mm}$ $e = 3 \text{ mm}$

Dimensiones iniciales

Ancho: _____ mm

Largo: _____ mm

Espesor: _____ mm

Dimensiones finales

Ancho: _____ mm

Largo: _____ mm

Espesor: _____ mm

Probeta 4:

Laminador de forma

Dimensiones iniciales

Ancho: _____ mm

Largo: _____ mm

Espesor: _____ mm

A continuación, se detalla la geometría del laminador de forma en la figura 1.

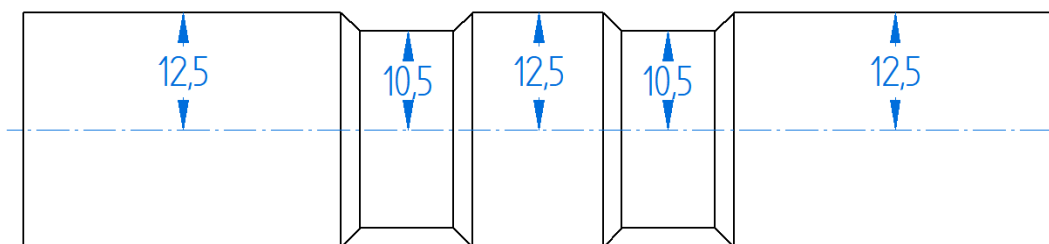


Figura 1 Perfil del laminador de forma

Ejercicio 1: cálculo del ensanchamiento

Una vez realizadas las mediciones finales en las probetas laminadas, calcule el ensanchamiento según la ecuación 1 y escriba los resultados en la tabla 1.

$$\%w = \frac{W_f - w_o}{w_o} \quad (1)$$

Siendo

 w_f el ancho final de la probeta w_o el ancho inicial de la misma.

Tabla 1: Ensanchamiento calculado:

			Ensanchamiento [%]
Laminador 1	R = 12 mm	e = 2 mm	
Laminador 2	R = 12 mm	e = 3 mm	
Laminador 3	R = 17 mm	e = 3 mm	

Comente los resultados obtenidos y exprese sus conclusiones:

[illegible]

Ejercicio 2: cálculo del alargamiento

Los valores de alargamiento se calculan mediante la ecuación 2 y los resultados se indican en la tabla 2.

$$\%L = \frac{L_f - L_o}{L_o} \quad (2)$$

Comente los resultados obtenidos y exprese sus conclusiones:

Ejercicio 3: análisis de la influencia del radio de los rodillos

Compare los resultados obtenidos en los laminadores 2 y 3, intentando evaluar de forma cualitativa la fuerza empleada en la laminación y el estado superficial de las probetas laminadas.

- Laminador 2: $R = 12 \text{ mm}$, $e = 3 \text{ mm}$
- Laminador 3: $R = 17 \text{ mm}$, $e = 3 \text{ mm}$

Análisis comparativo entre los laminadores 2 y 3:

Ejercicio 4: influencia de la reducción de espesor

Compare los resultados obtenidos entre los laminadores 1 y 2, intentando evaluar de forma cualitativa la fuerza empleada en la laminación y el estado superficial de las probetas laminadas, y valorar el porcentaje de alargamiento en uno u otro caso.

- Laminador 1: $R = 12 \text{ mm}$, $e = 2 \text{ mm}$
- Laminador 2: $R = 12 \text{ mm}$, $e = 3 \text{ mm}$

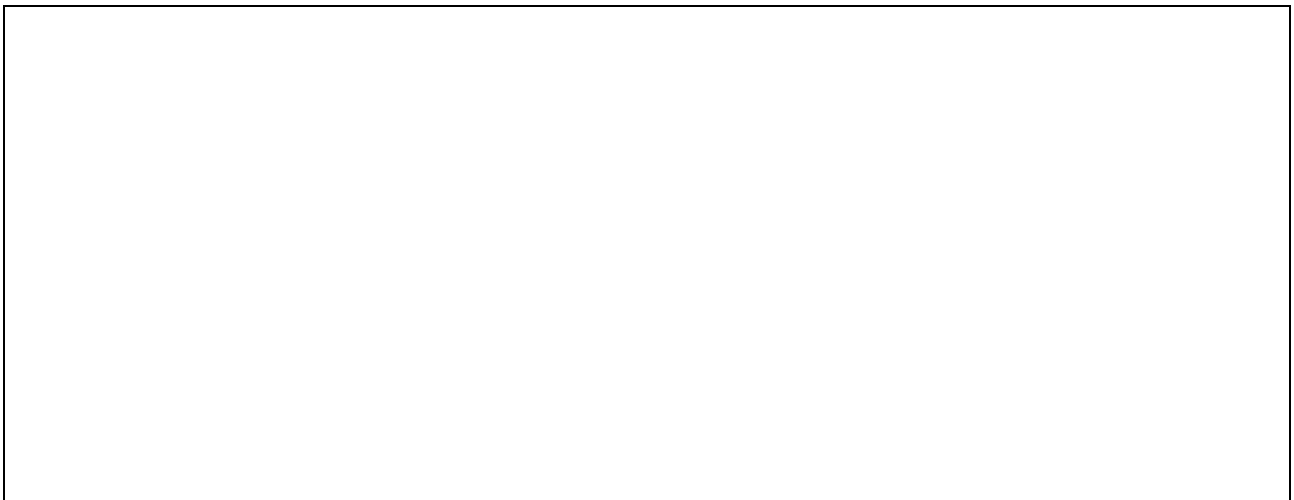
Análisis comparativo entre laminadores 1 y 2:



Ejercicio 5: laminado de forma

En este último apartado se procederá a laminar una probeta en el laminador de forma. El objetivo de este ejercicio es comprobar que, con la laminación, además de reducir el espesor, se consiguen infinidad de formas y perfiles.

Expresa las conclusiones obtenidas tras el laminado de forma.



CONCLUSIONES

El diseño, fabricación y experimentación de los laminadores manuales se ha completado de manera satisfactoria. Al final del proyecto, se logró completar la fabricación de los cuatro laminadores y se llevaron a cabo diferentes ensayos con el fin de comprobar su funcionamiento y plantear el guión de ejercicios de cara a las prácticas de asignaturas de Tecnología de Fabricación.

Los laminadores permitirán a los estudiantes visualizar y comprender los parámetros que influyen en la laminación, por lo que contribuirán al aprendizaje de los alumnos de manera positiva.

El diseño de los laminadores es muy versátil. Permite realizar diferentes ensayos para evaluar de manera independiente los parámetros del proceso de laminación. Además, los casquillos implementados en dos de los laminadores hacen que, de cara al futuro, estos puedan acoger cambios, permitiendo el estudio del proceso con nuevos parámetros.

Otro punto positivo es el hecho de que los laminadores sean desmontables. Esto permite a los alumnos ver la utilidad de cada uno de sus componentes.

Como mejoras a realizar, queda pendiente el laminador de forma, al cual habría que implementarle unas guías laterales de manera que se controle la expansión lateral de la plastilina.

En resumen, es una manera muy dinámica y efectiva de que los alumnos entiendan los conceptos teóricos relativos a este proceso de fabricación.

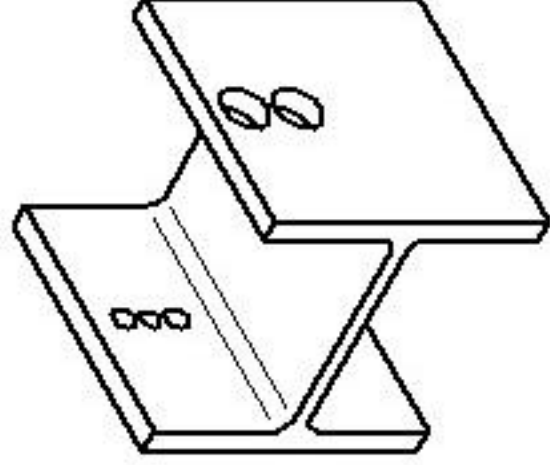
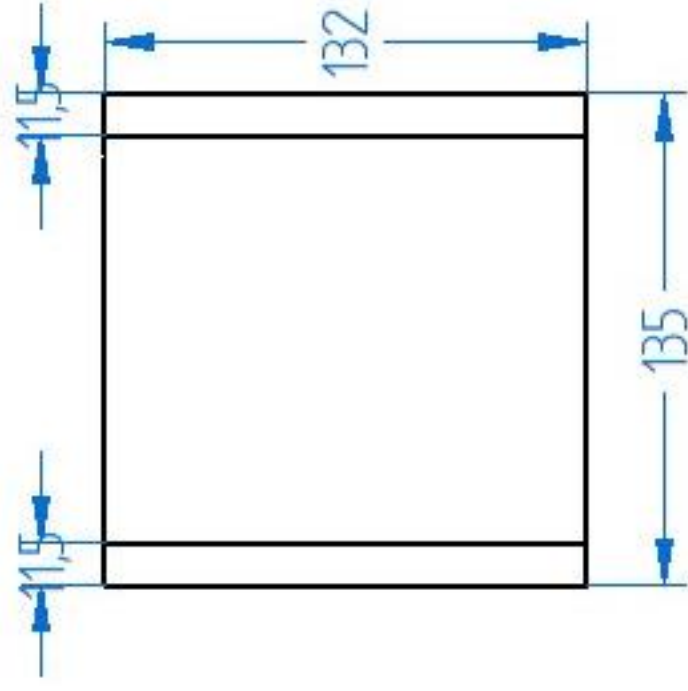
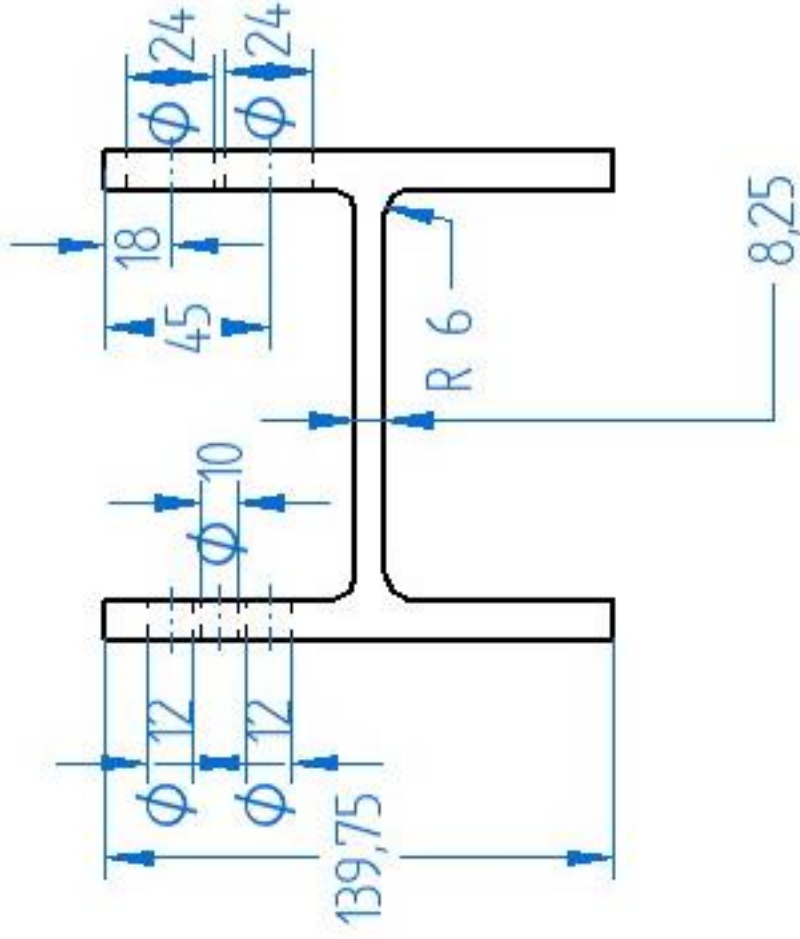
BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pérez Moncayo, Amanda. Diseño e impresión 3D de un tren de laminación para prácticas de laboratorio de Tecnología de fabricación. Año 2023. [Diseño e impresión 3D de un tren de laminación para prácticas de laboratorio de Tecnología de fabricación \(us.es\)](#)
- [2] Groover, M. P. Fundamentos de manufactura moderna. Año 1997. Editorial: Pearson Educación
- [3] Z. Pater*, A. Gontarz, W. Weroński. New method of thread rolling. Año 2004. [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013604005205](#)
- [4] García Somolinos, Carles. Historia y vanguardia de la chapa metálica. Año 2018. Boceto de Leonardo da Vinci (Figura 1.1) [https://riunet.upv.es/handle/10251/116553](#)
- [5] H. Niakana*, A. Najafizadehb. Effect of niobium and rolling parameters on the rolling parameters on the mechanical properties and microstructure of dual phase steels. Año 2010. [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509310006040](#)
- [6] Peter U. Nwachukwu*, Oluleke O. Oluwole. Effects of rolling process parameters on the mechanical properties of hot rolled St60Mn steel. Año 2017. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509516300560](#)
- [7] Esquema laminación; laminación para reducción de espesor (figura 2.1 a) [https://www.blog.imajin.id](#)
- [8] Esquema laminación; laminación de forma (figura 2.1 b) [https://www.iqsdirectory.com](#)
- [9] WordPress, metales ferrosos Año 2024 Ejemplo etapas de un tren de laminación (Figura 3.1) [https://metalesferrosos.wordpress.com/2017/06/07/fases-del-proceso-de-laminacion/](#)
- [10] William Harris, Constantinos Soutis, Christopher Atkin. Impact Response of Curved Composite Laminates: Effect of Radius and Thickness [https://link.springer.com/article/10.1007/s10443-020-09826-2](#)
- [11] Guan Lu, Yuchen Zhou, Yiming Xu. Low Velocity Impact Localization of Variable Thickness Composite Laminates [https://www.mdpi.com/1424-8220/21/18/6103](#)
- [12] Óscar Márquez Albardías. Fabricación de piezas mediante FDM para prácticas de Metrología dimensional e-REdING. Biblioteca de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. (us.es)
- [13] Catálogo ruedas dentadas de Rodasuin

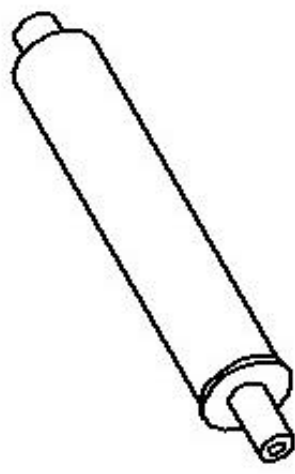
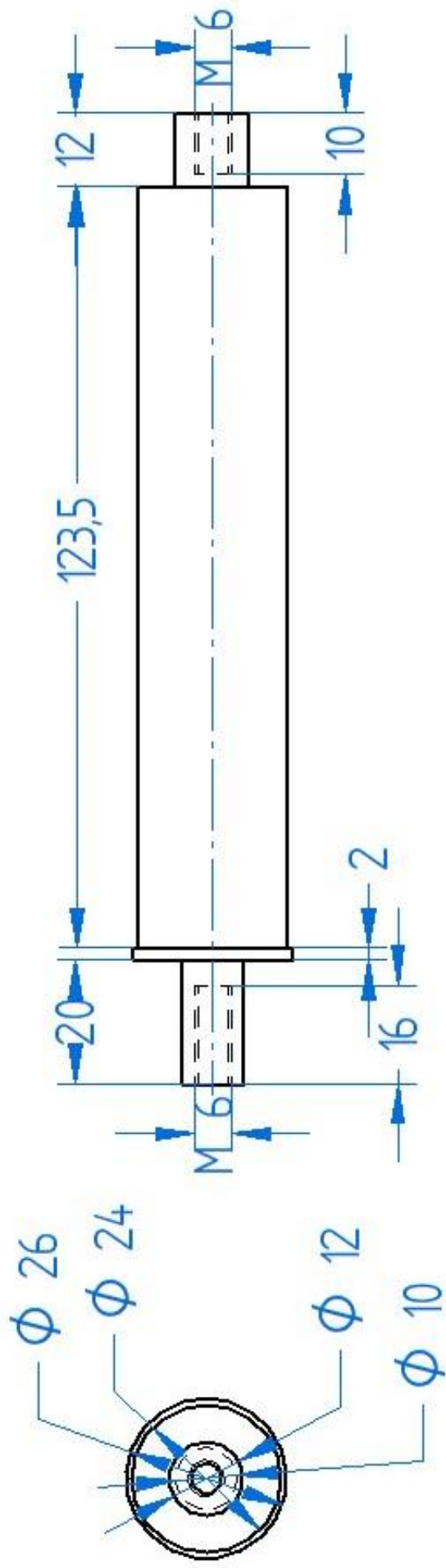
En esta sección se adjuntan los planos correspondientes a todos los componentes que forman parte de los laminadores, que se han obtenido utilizando el software Solid Edge. Estos planos tienen un papel fundamental para comprender el diseño y las especificaciones técnicas de cada elemento.

A continuación, se detalla el listado de los planos adjuntos:

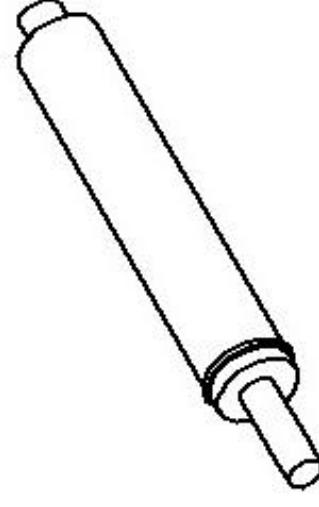
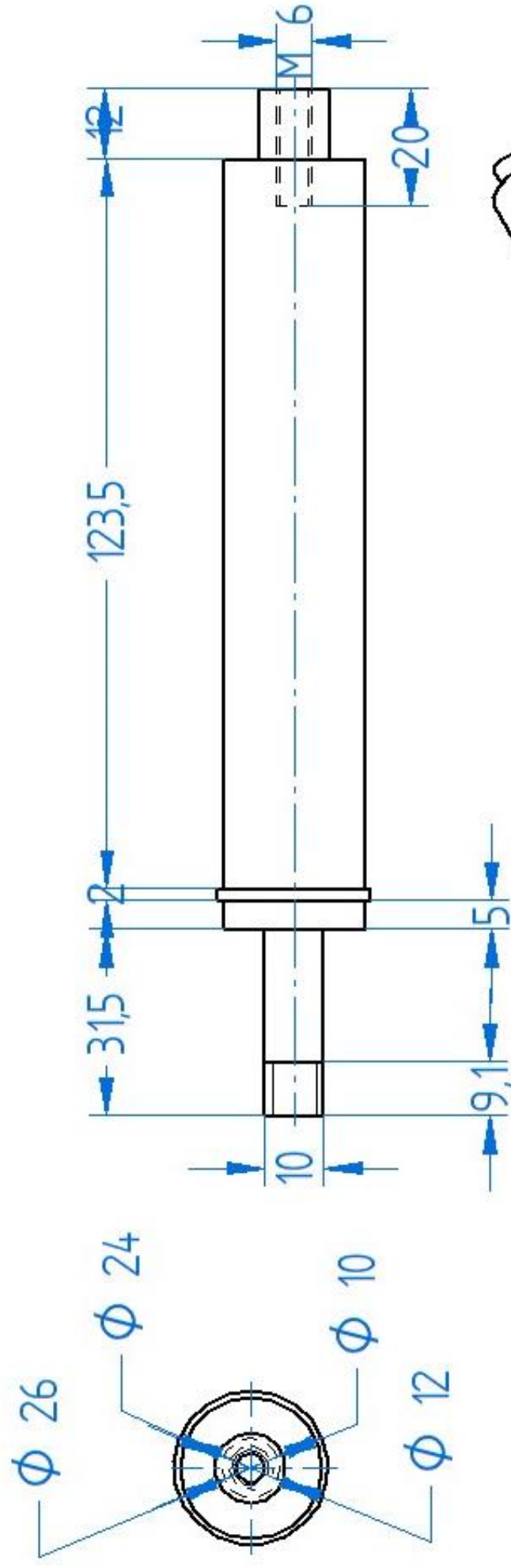
- Plano 1: base laminador 1
- Plano 2: eje inferior laminador 1
- Plano 3: eje superior laminador 1
- Plano 4: base laminador 2
- Plano 5: eje inferior laminador 2
- Plano 6: eje superior laminador 2
- Plano 7: base laminador 3
- Plano 8: eje inferior laminador 3
- Plano 9: eje superior laminador 3
- Plano 10: casquillo del laminador 3
- Plano 11: base laminador de forma
- Plano 12: eje inferior laminador de forma
- Plano 13: eje superior laminador de forma
- Plano 14: casquillo del laminador de forma
- Plano 15: arandela
- Plano 16: modificación rueda dentada Z27 M1
- Plano 17: modificación rueda dentada Z26 M1
- Plano 18: modificación rueda dentada Z37 M1
- Plano 19: manivela



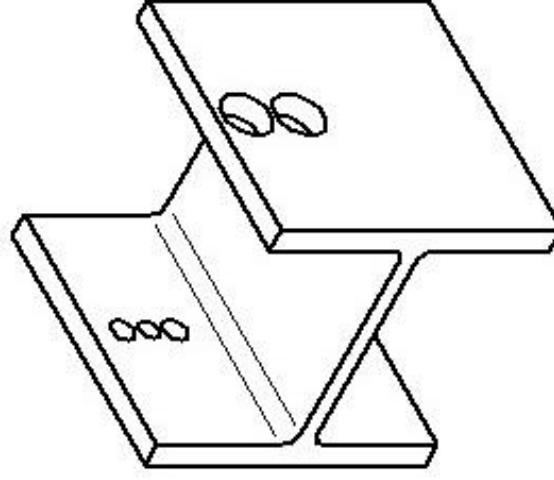
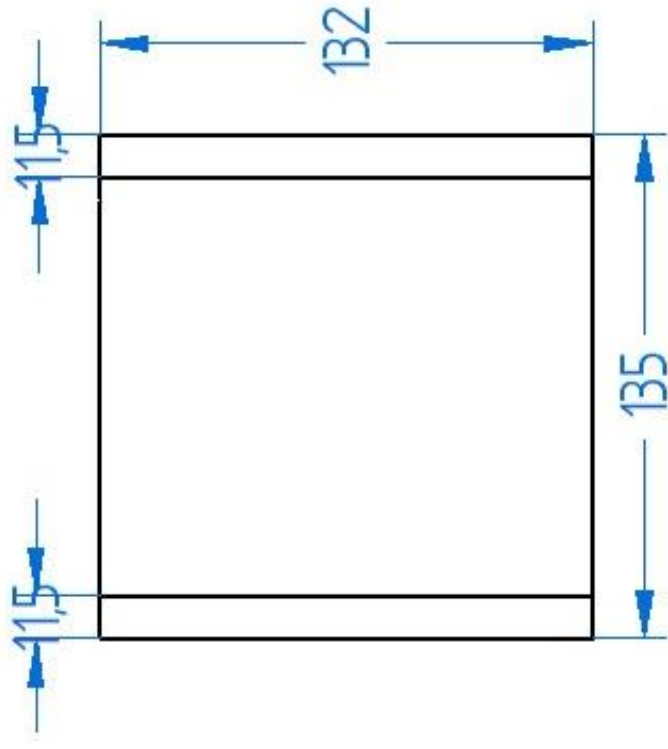
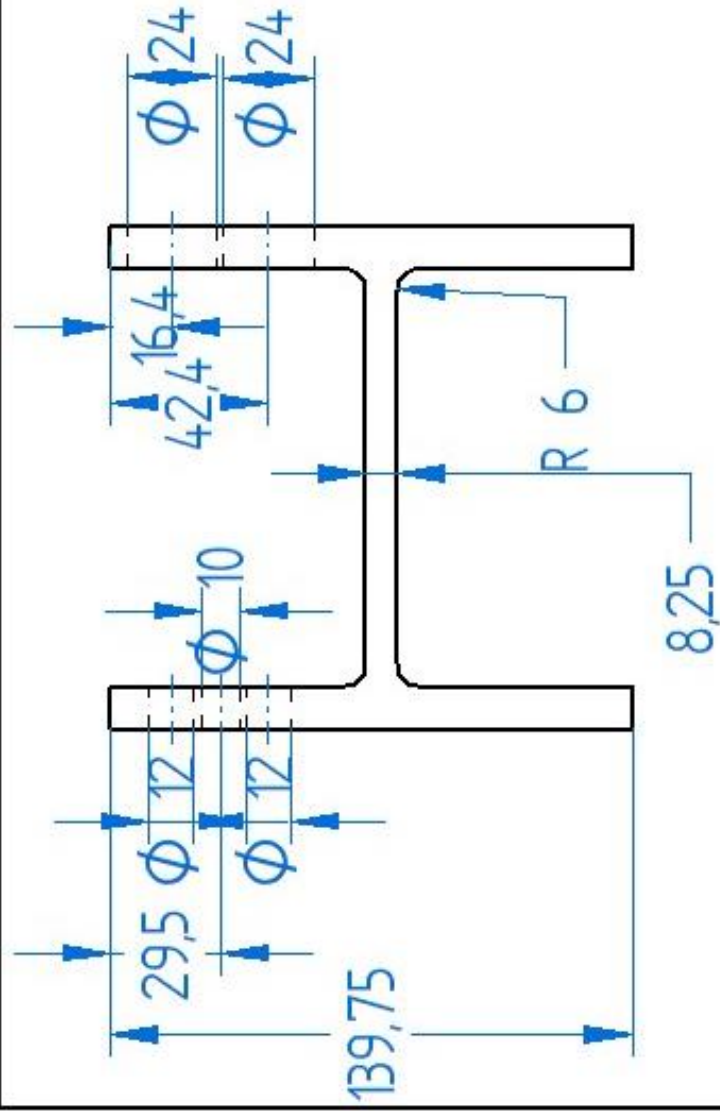
Nombre	Base laminador I
Tamaño	A4
Escala	1:2



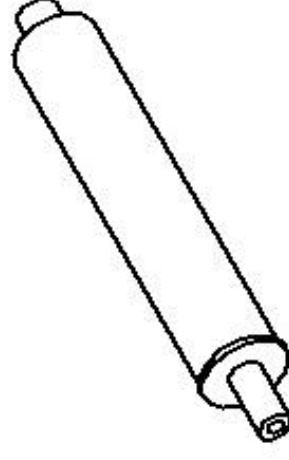
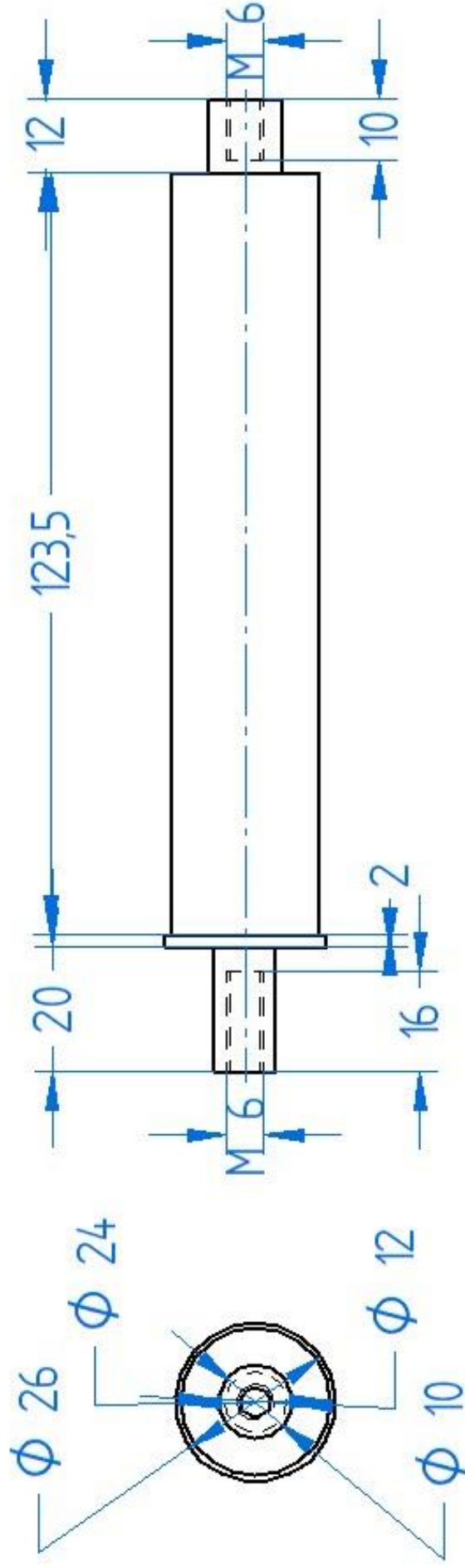
Pieza	Eje inferior laminador I
Tamaño	A4
Escala	1:1



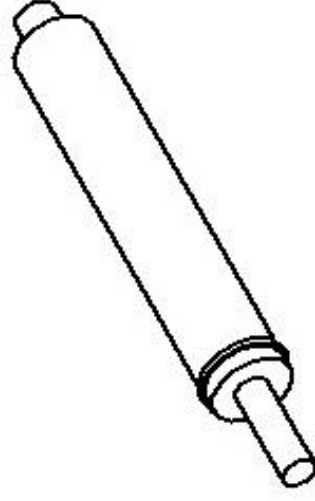
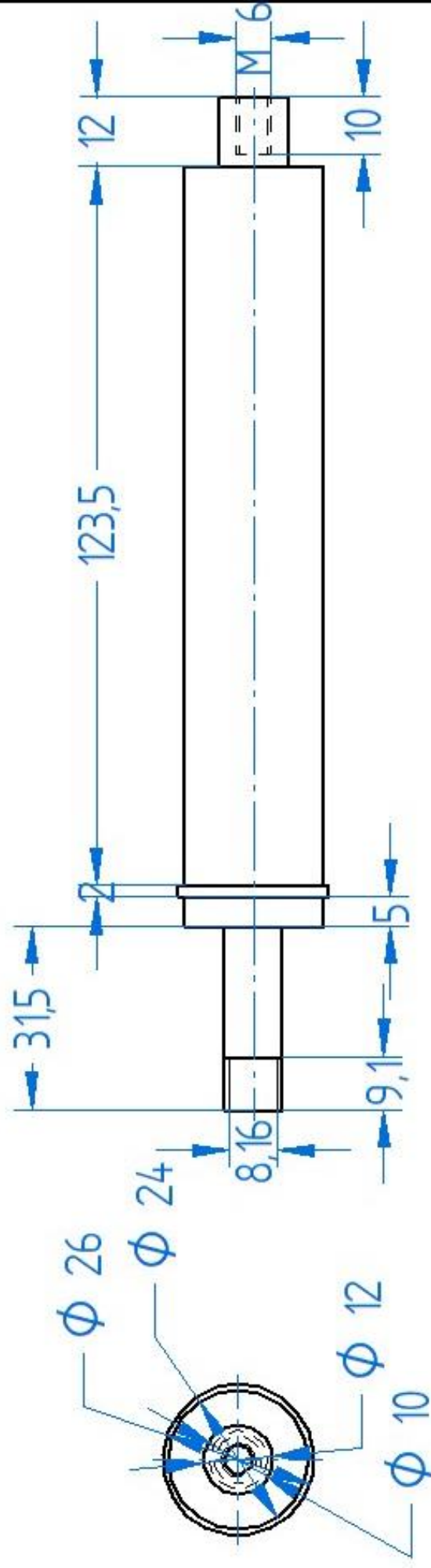
Pieza	Eje superior laminador I
Tamaño	A4
Escala	1:1



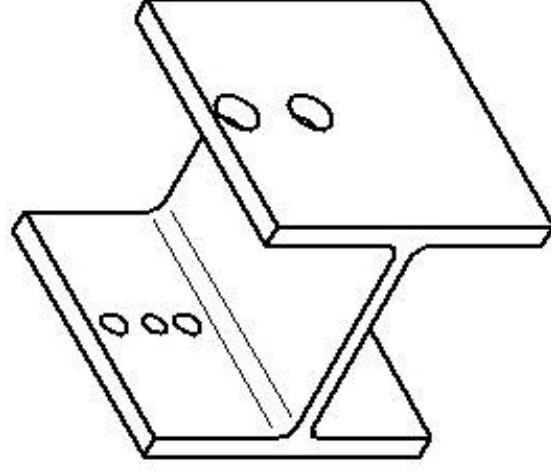
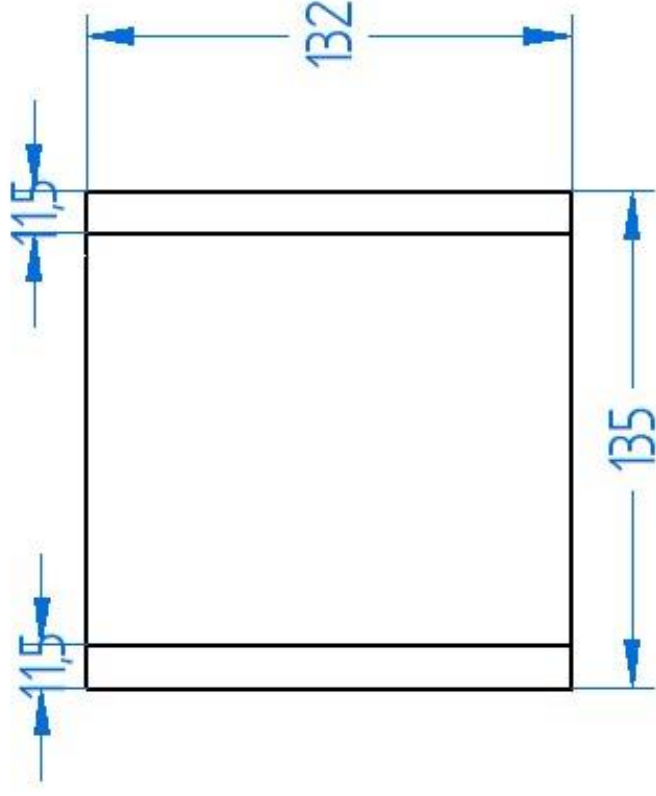
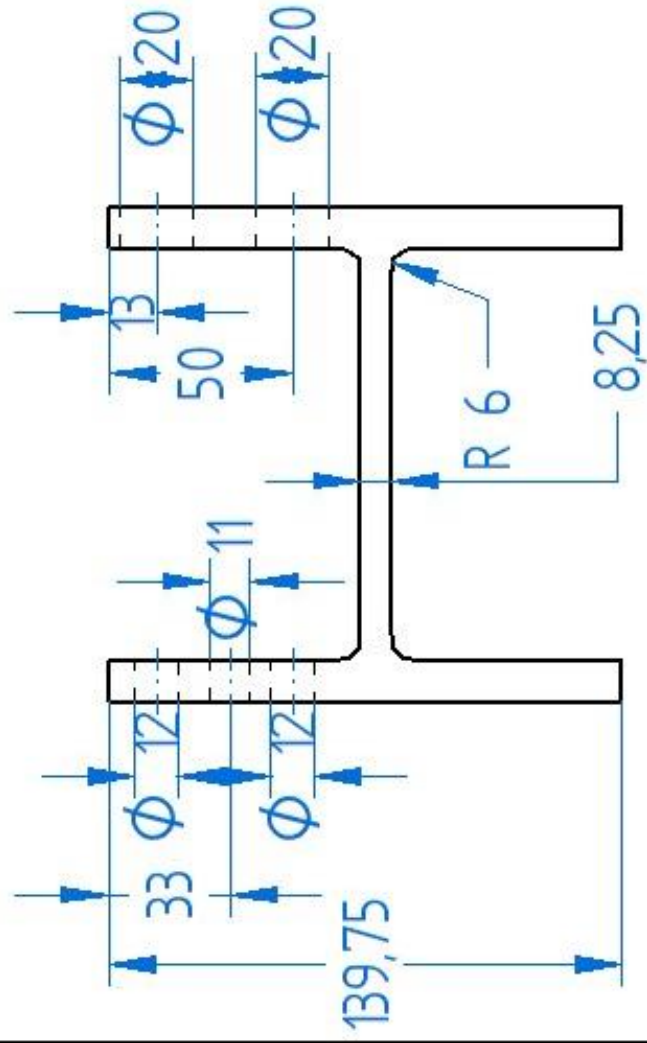
Nombre	Base laminador 2
Tamaño	A4
Escala	1:2



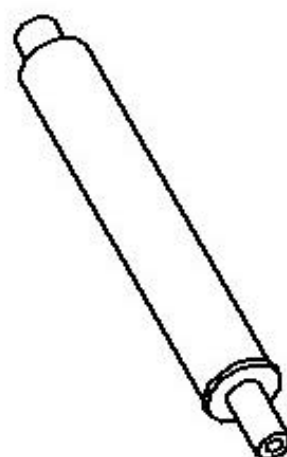
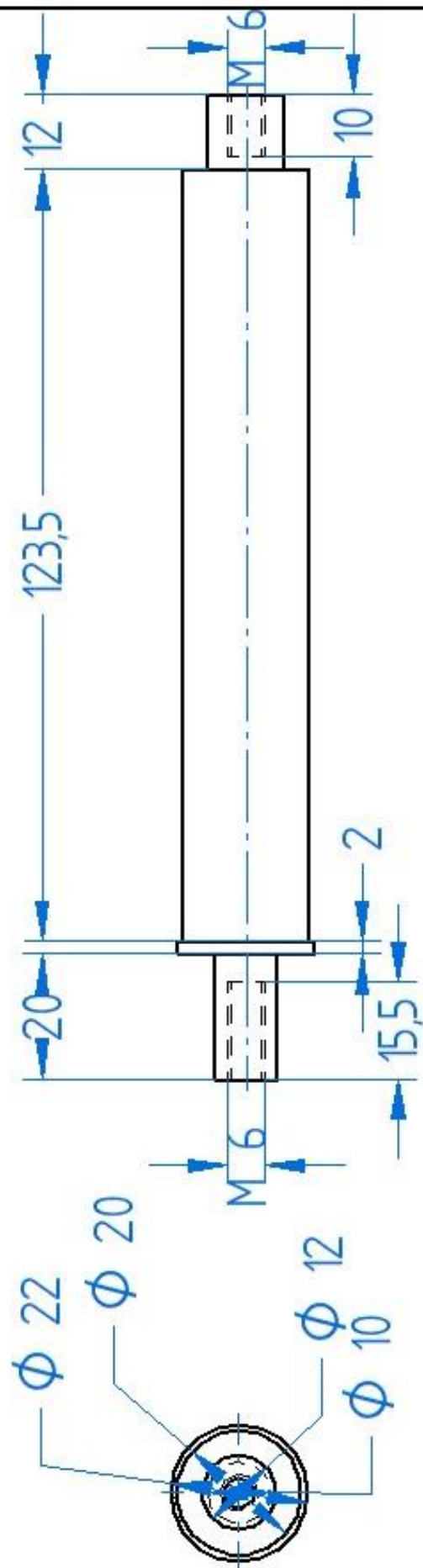
Pieza	Eje inferior laminador 2
Tamaño	A4
Escala	1:1



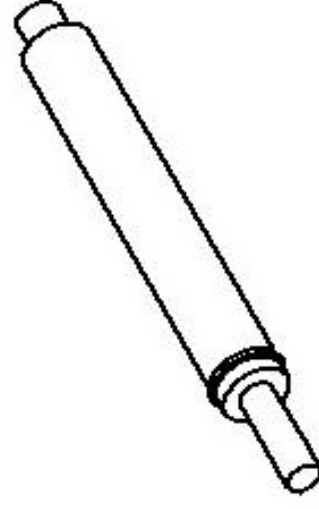
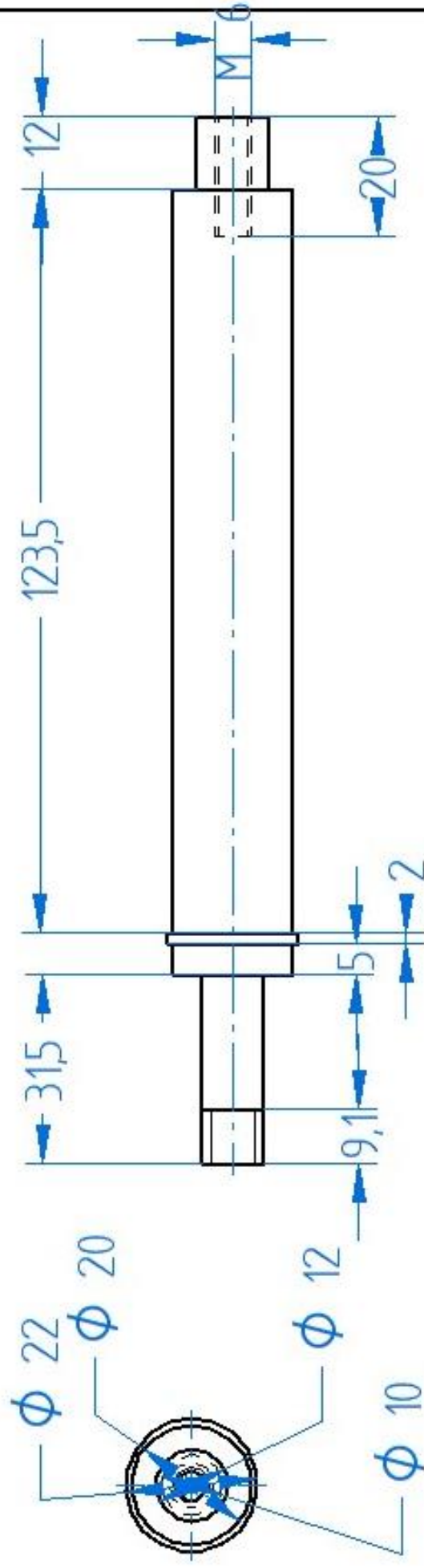
Pieza	Eje superior laminador 2
Tamaño	A4
Escala	1:1



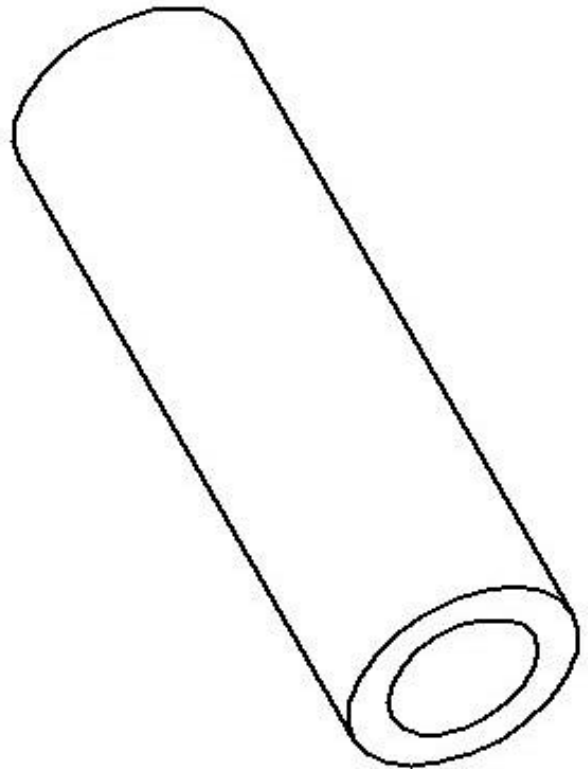
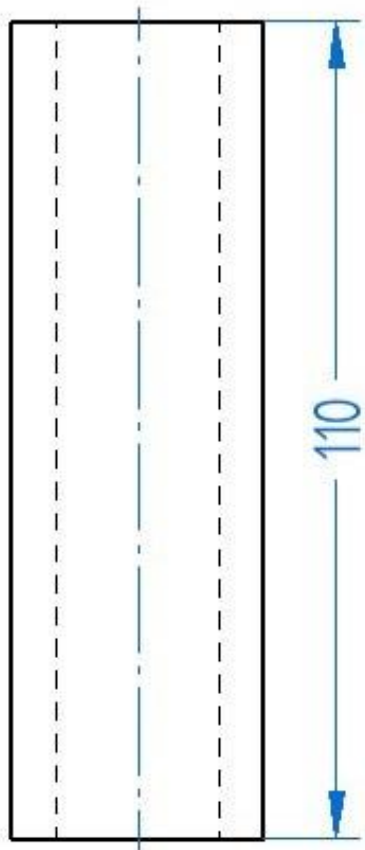
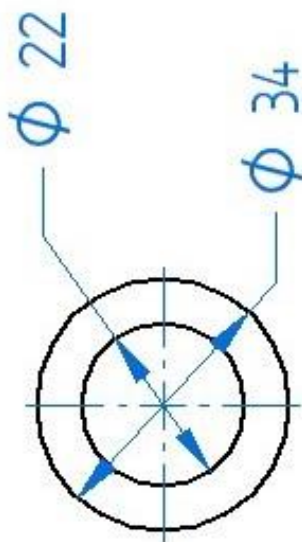
Nombre	Base laminador 3
Tamaño	A4
Escala	1:2



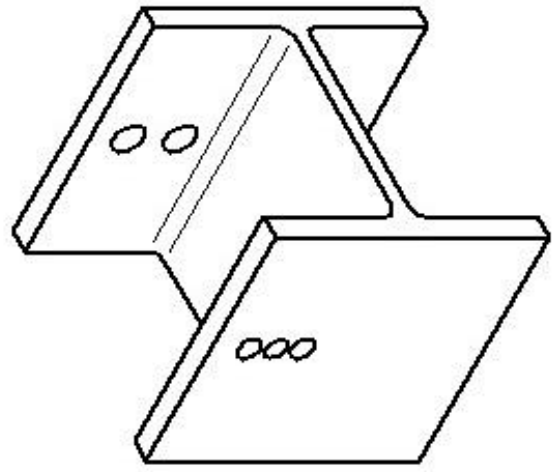
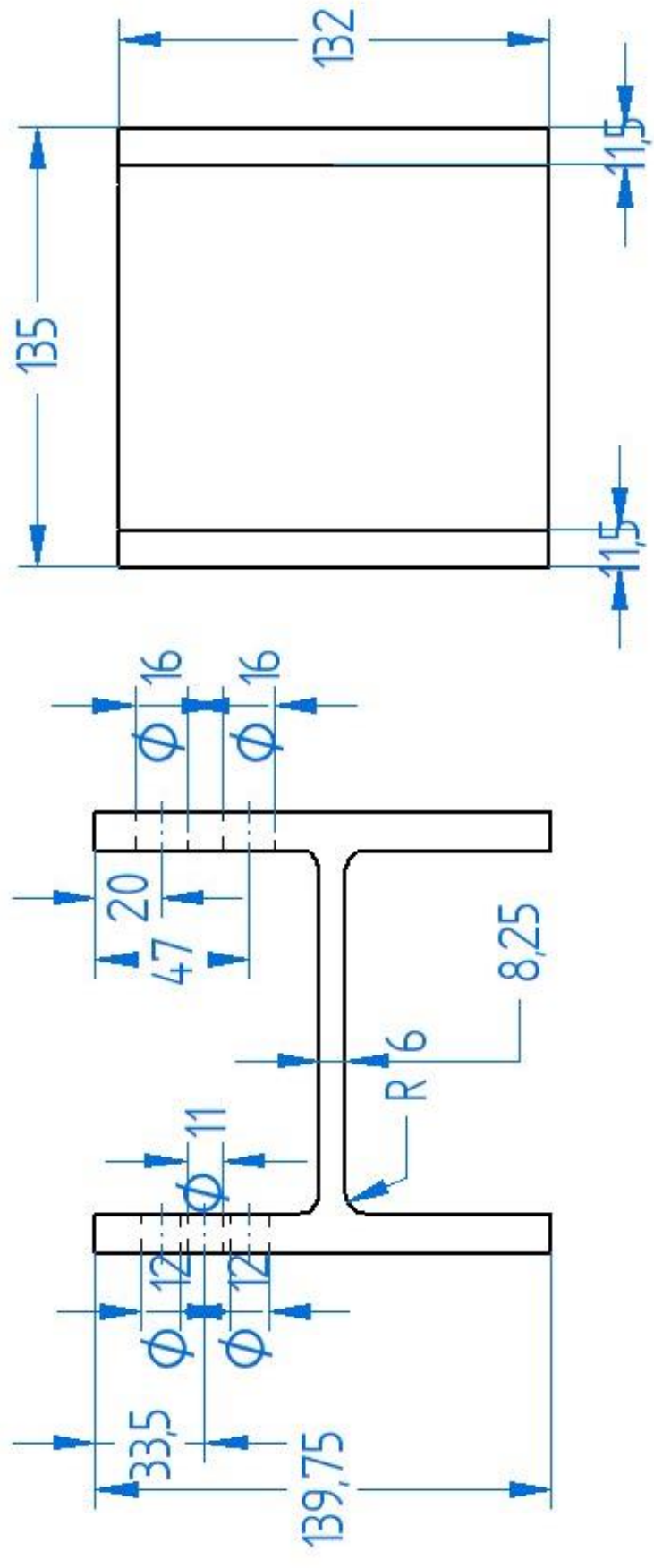
Pieza	Eje inferior laminador 3
Tamaño	A4
Escala	1:1



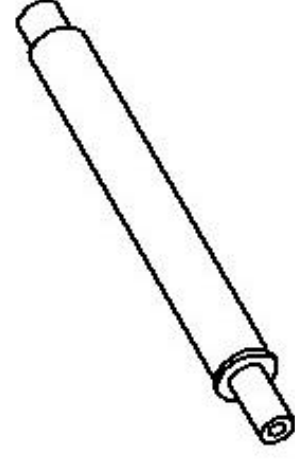
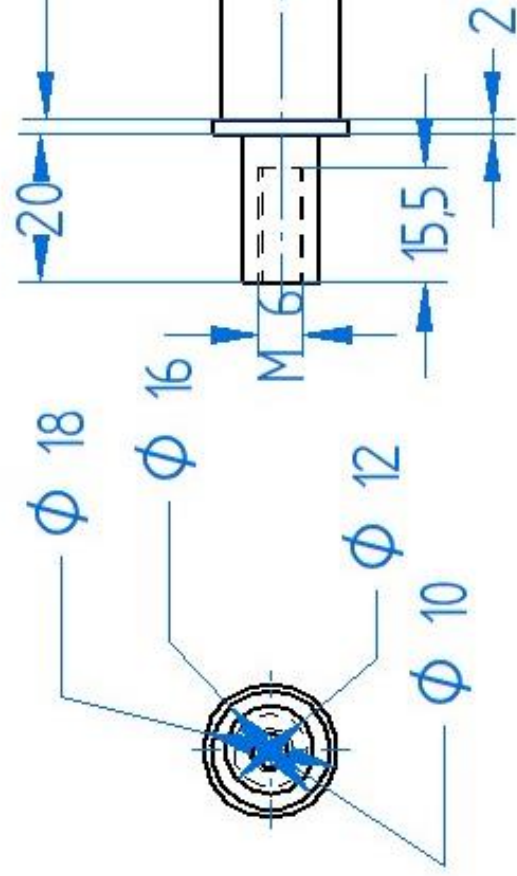
Pieza	Eje superior laminador 3
Tamaño	A4
Escala	1:1



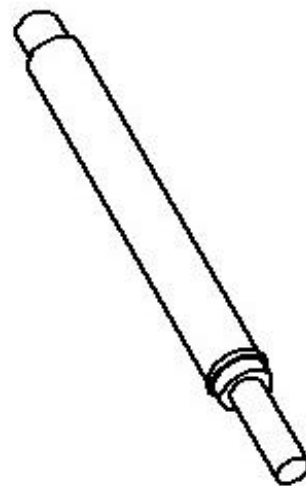
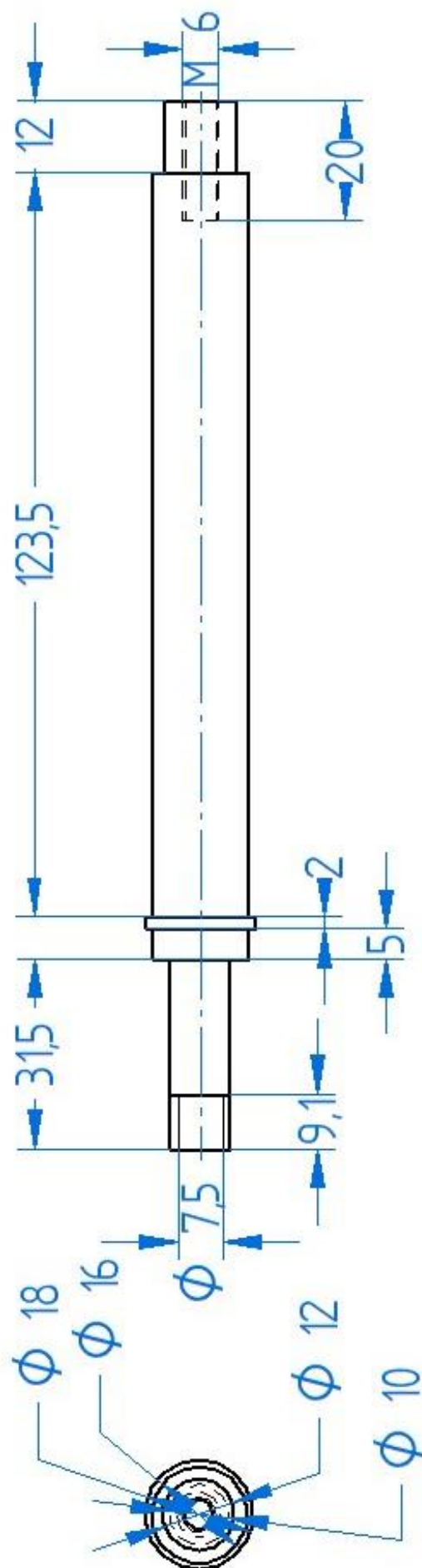
Nombre	Casquillo del laminador 3
Tamaño	A4
Escala	1:1



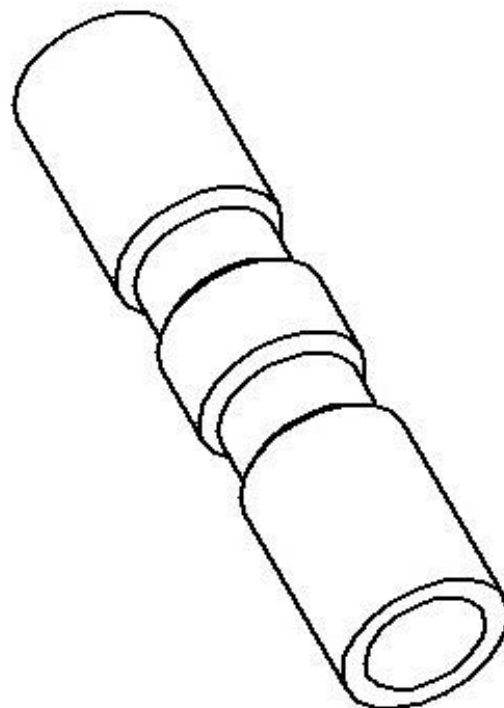
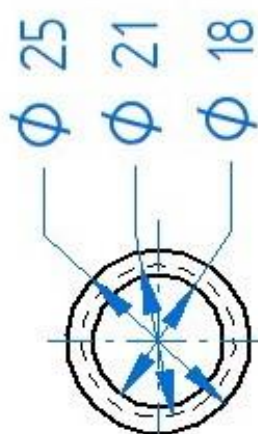
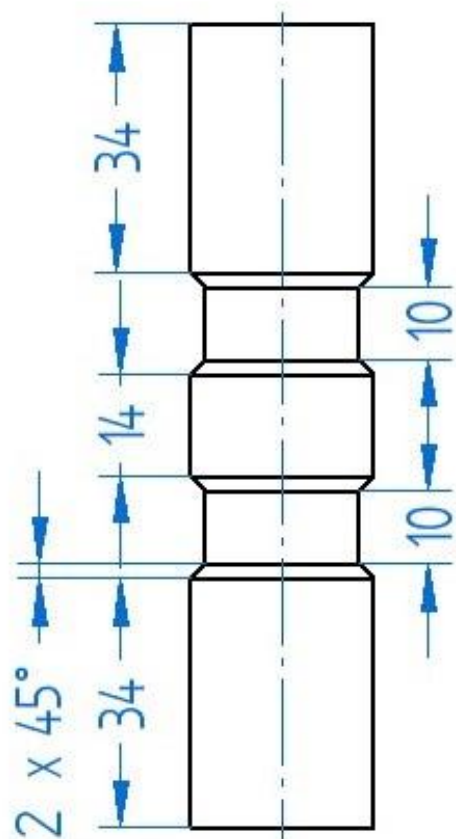
Nombre	Base laminador 4
Tamaño	A4
Escala	1:2



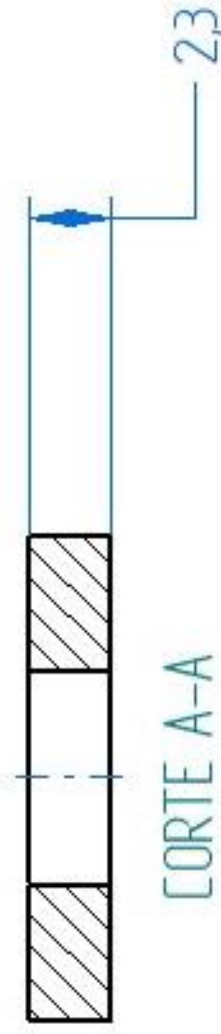
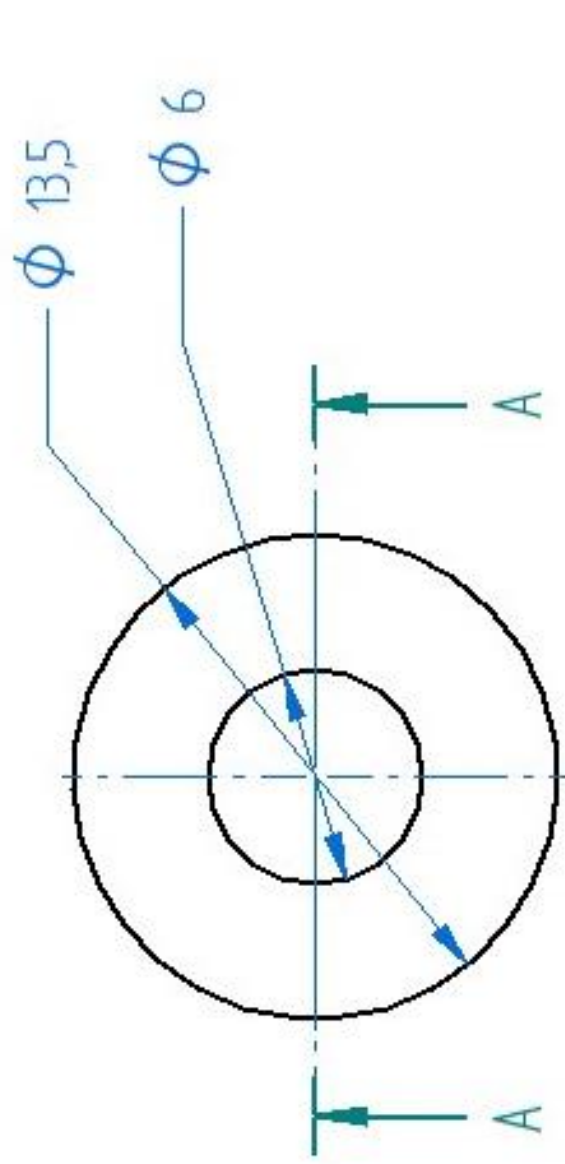
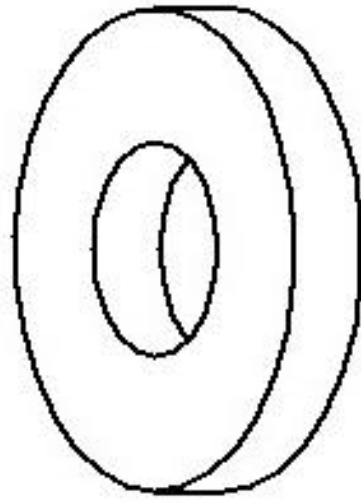
Pieza	Eje inferior laminador 4
Tamaño	A4
Escala	1:1



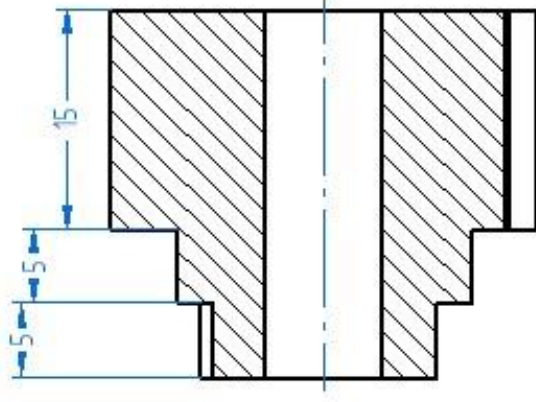
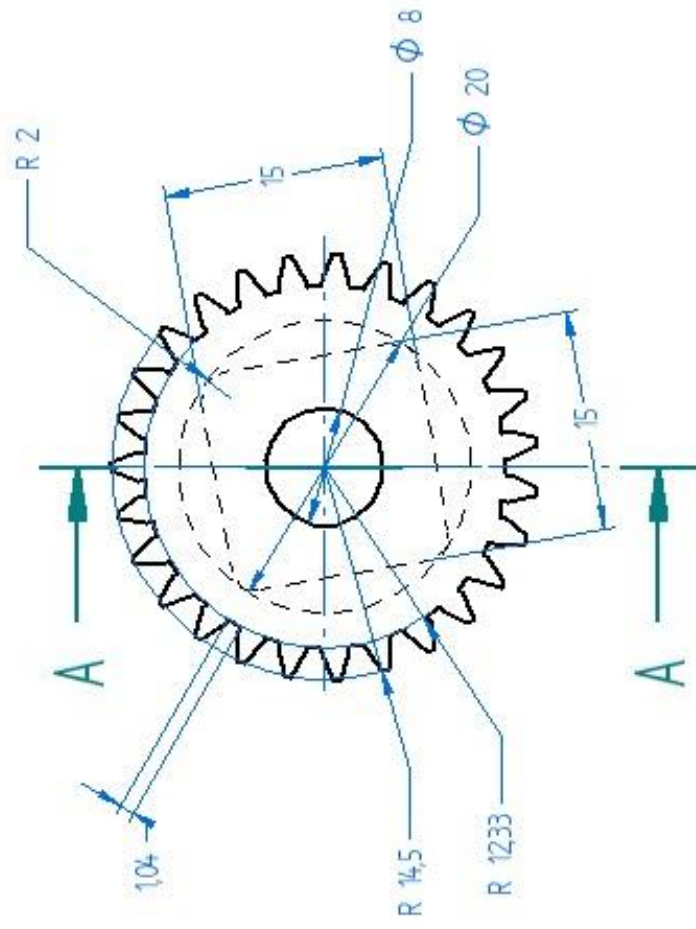
Pieza	Eje superior laminador 4
Tamaño	A4
Escala	1:1



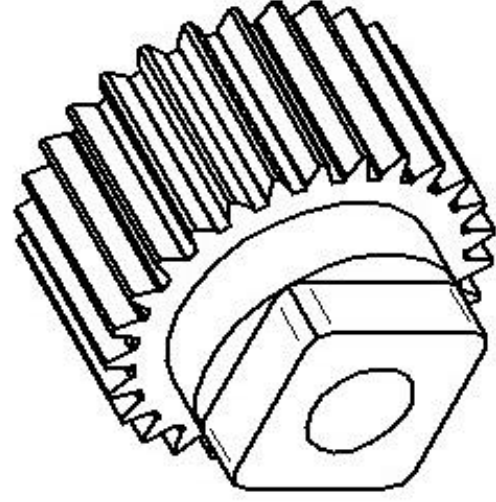
Nombre	Casquillo laminador de forma
Tamaño	A4
Escala	1:1



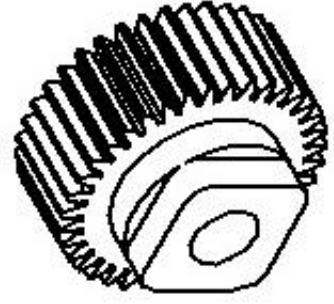
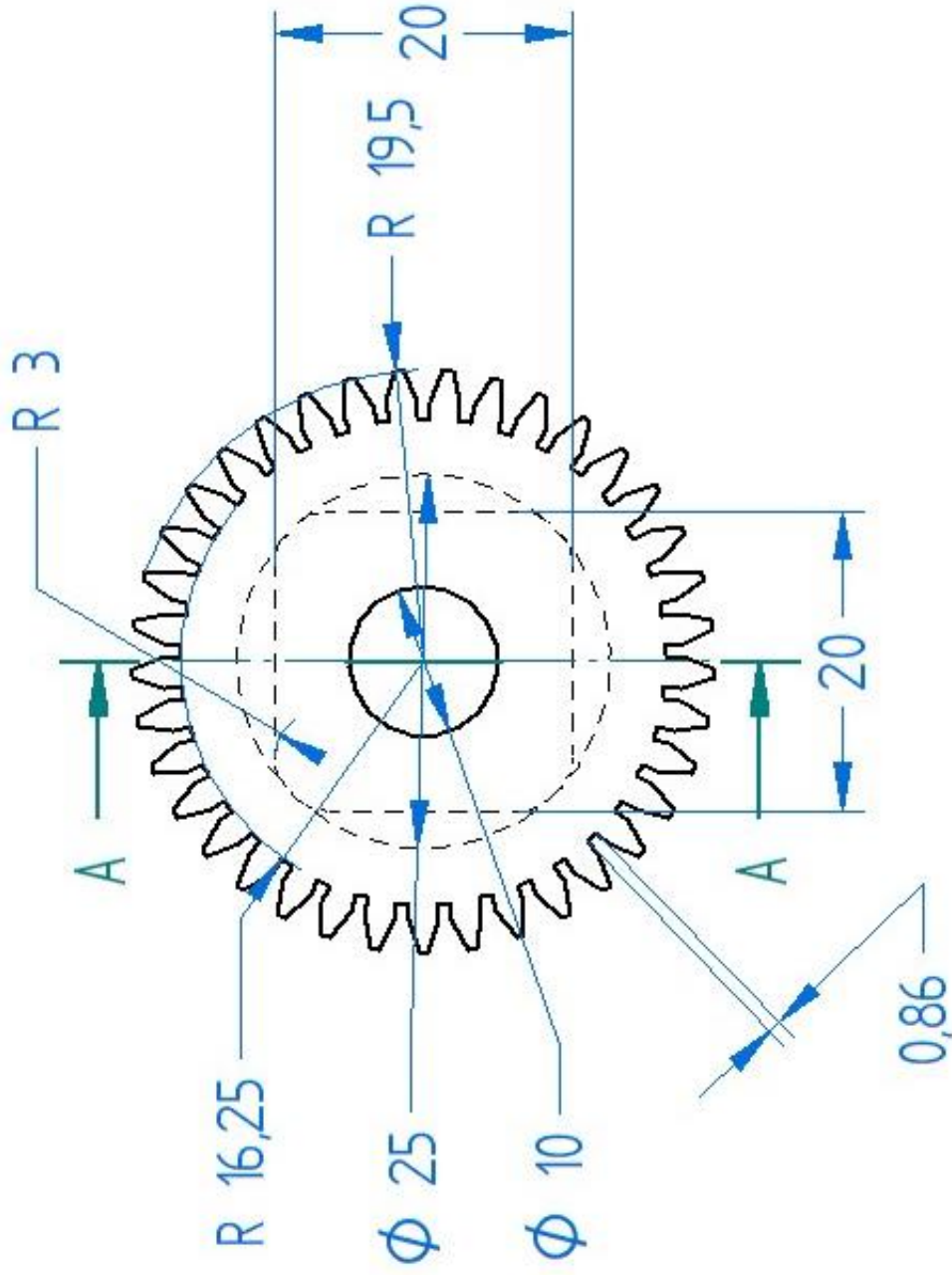
Pieza	Arandela
Tamaño	A4
Escala	5:1



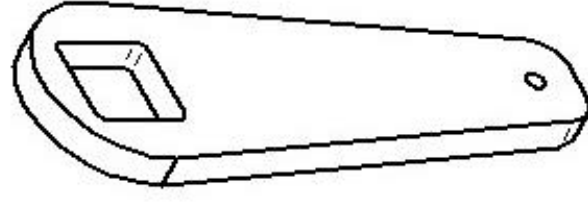
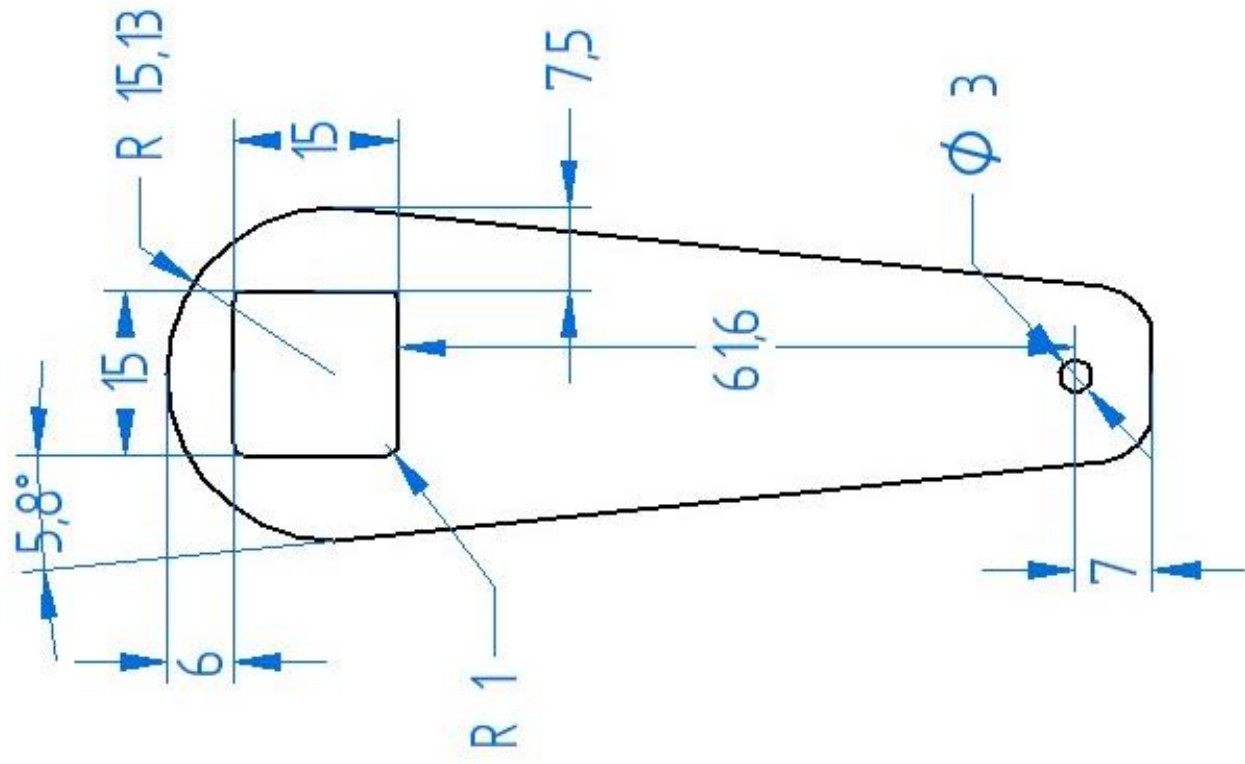
CORTE A-A



Pieza	Rueda dentada Z27 M1
Tamaño	A4
Escala	2:1



Nombre	Rueda dentada Z37 MI	
Tamaño	A4	
Escala	2:1	



Pieza	Manivela
Tamaño	A4
Escala	1:1