

E.T.S de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Diseño y Verificación de Ensayos para Determinar la Soldadura por Láser en Films Plásticos



Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

**Autor:** Josu Salinas López

**Directores:** Xabier Mendibil Ainzua, Faustino Gimena Ramos

Pamplona, 23 de junio del 2017





## RESUMEN

En este documento se presenta un método experimental para determinar los valores de los parámetros más importantes de un láser para soldar adecuadamente films plásticos. Este método, en el caso concreto que se presenta en este informe, se aplica para films multicapa con distintas estructuras, cuyo componente principal es el polietileno. Para la realización de los ensayos se utiliza un láser de diodo y se varían los parámetros velocidad de desplazamiento, potencia del láser y diámetro del spot.

De los ensayos se concluye que es posible realizar buenas soldaduras con potencias de en torno a los 10 W a velocidades menores de  $100 \text{ mm s}^{-1}$ . También se extrae la importancia de la absorbancia del material para determinar la densidad de energía necesaria para una buena soldadura, así como la posibilidad de aplicar aditivos al material para aumentar su capacidad de absorción.

## PALABRAS CLAVE

Densidad de energía, films termoplásticos, HDPE, láser de  $\text{CO}_2$ , láser de diodo, LDPE, modelo termodinámico.

# Índice

---

1. Introducción .....	5
2. Objetivo .....	6
3. Estado de la técnica .....	6
3.1. Material del film .....	6
3.1.1. Polietileno.....	7
3.1.2. Poliamida .....	8
3.1.3. EVOH .....	9
3.1.4. Estructuras.....	9
3.2. Métodos de soldadura .....	12
3.2.1. Soldadura por ultrasonido .....	12
3.2.2. Soldadura por fricción .....	13
3.2.3. Soldadura por vibración.....	14
3.2.4. Soldadura por placa caliente .....	15
3.2.5. Soldadura por aire caliente .....	15
3.2.6. Soldadura de implantes .....	16
3.2.7. Soldadura por láser .....	16
4. Modelo termodinámico .....	24
5. Proceso experimental .....	29
5.1. Estimaciones.....	29
5.2. Material necesario .....	33
5.2.1. Mesa X-Y .....	33
5.2.2. Programa de soldadura LaserCAD V7.40B .....	35
5.2.3. Dinamómetro .....	37
5.2.4. Sistema mecánico de ensayo de tracción .....	38
5.2.5. Láser diodo .....	40
5.3. Procedimiento .....	41
6. Resultados experimentales .....	53
7. Conclusiones.....	56
8. Referencias .....	57
9. Anexo.....	57

## Índice de figuras

---

<b>Figura 1</b>	Proyecto de embalaje de voluminosos de APS .....	5
<b>Figura 2</b>	Absorbancia frente a longitud de onda para los materiales.....	12
<b>Figura 3</b>	Esquema de soldadura por ultrasonido.....	13
<b>Figura 4</b>	Esquema de soldadura por fricción .....	13
<b>Figura 5</b>	Esquema de soldadura por vibración.....	14
<b>Figura 6</b>	Esquema de soldadura por placa caliente .....	15
<b>Figura 7</b>	Esquema de soldadura por aire caliente .....	16
<b>Figura 8</b>	Esquema del montaje de un láser de diodo [3] .....	17
<b>Figura 9</b>	Láser de diodo de fibra acoplada con potencias de hasta 500 W [3] .....	18
<b>Figura 10</b>	Configuración principal de un láser de Nd:YAG.....	19
<b>Figura 11</b>	Configuración principal de un láser de disco de Nd:YAG [3] .....	20
<b>Figura 12</b>	Configuración principal de un láser de fibra bombeado por diodo [3] ..	21
<b>Figura 13</b>	Configuración principal de un láser de CO2 de flujo lento [3] .....	22
<b>Figura 14</b>	Configuración principal de un láser de CO2 de guía de ondas [3].....	23
<b>Figura 15</b>	Gráfica de la capacidad calorífica frente a la temperatura para macromoléculas lineales [8] .....	32
<b>Figura 16</b>	Sistema de mesa x-y para soldadura por láser.....	34
<b>Figura 17</b>	Controlador DSP AWC680.....	34
<b>Figura 18</b>	Controlador Power Step PSD5042-2P .....	35
<b>Figura 19</b>	Espacio de trabajo del LaserCAD .....	36
<b>Figura 20</b>	Panel de control del LaserCAD.....	36
<b>Figura 21</b>	Dinamómetro PCE-FM50 .....	37
<b>Figura 22</b>	Esquema del sistema mecánico para en ensayo de tracción.....	38
<b>Figura 23</b>	Carril con dos carros HIWIN .....	38
<b>Figura 24</b>	Mordaza de sujeción PCE-SJJ05 .....	39
<b>Figura 25</b>	Sistema de tracción para medir la resistencia del plástico soldado.....	39
<b>Figura 26</b>	Láser de 650 - 1050 nm de Laser Components .....	40
<b>Figura 27</b>	Espesor del material frente a densidad de energía .....	55

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Fuentes láser típicas para la soldadura de plásticos [3] .....	24
<b>Tabla 2</b> Parámetros termoplásticos para $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ [4] .....	30
<b>Tabla 3</b> Especificaciones técnicas dinamómetro PCE-FM50 .....	37
<b>Tabla 4</b> Resistencia a la tensión R, y densidad de energía E/A, para el material A1 y las velocidades (a) $50 \text{ mm s}^{-1}$ , (b) $100 \text{ mm s}^{-1}$ , (c) $200 \text{ mm s}^{-1}$ , (d) $300 \text{ mm s}^{-1}$ , (e) $400 \text{ mm s}^{-1}$ .....	41
<b>Tabla 5</b> Resistencia a la tensión R, y densidad de energía E/A, para el material B1 y las velocidades (a) $50 \text{ mm s}^{-1}$ , (b) $100 \text{ mm s}^{-1}$ , (c) $200 \text{ mm s}^{-1}$ , (d) $300 \text{ mm s}^{-1}$ , (e) $400 \text{ mm s}^{-1}$ .....	43
<b>Tabla 6</b> Resistencia a la tensión R, y densidad de energía E/A, para el material B2 y las velocidades (a) $50 \text{ mm s}^{-1}$ , (b) $100 \text{ mm s}^{-1}$ , (c) $200 \text{ mm s}^{-1}$ , (d) $300 \text{ mm s}^{-1}$ , (e) $400 \text{ mm s}^{-1}$ .....	45
<b>Tabla 7</b> Resistencia a la tensión R, y densidad de energía E/A, para el material B3 y las velocidades (a) $50 \text{ mm s}^{-1}$ , (b) $100 \text{ mm s}^{-1}$ , (c) $200 \text{ mm s}^{-1}$ , (d) $300 \text{ mm s}^{-1}$ , (e) $400 \text{ mm s}^{-1}$ .....	47
<b>Tabla 8</b> Resistencia a la tensión R, y densidad de energía E/A, para el material B4 y las velocidades (a) $50 \text{ mm s}^{-1}$ , (b) $100 \text{ mm s}^{-1}$ , (c) $200 \text{ mm s}^{-1}$ , (d) $300 \text{ mm s}^{-1}$ , (e) $400 \text{ mm s}^{-1}$ .....	49
<b>Tabla 9</b> Resistencia a la tensión R, y densidad de energía E/A, para una velocidad de $100 \text{ mm s}^{-1}$ y un diámetro de spot de (a) $1.5 \text{ mm}$ , (b) $2 \text{ mm}$ , (c) $2.3 \text{ mm}$ , (d) $2.5 \text{ mm}$ , (e) $2.7 \text{ mm}$ . .....	51
<b>Tabla 10</b> Valores de densidad de energía necesaria para una buena soldadura en los distintos materiales .....	54
<b>Tabla 11</b> Valores de densidad de energía para distintos espesores .....	55

# 1. Introducción

---

Hoy en día, toda empresa cuya actividad sea la fabricación de productos voluminosos, como frigoríficos, ha de tener una etapa de embalaje dentro del proceso de fabricación. Esa etapa no es opcional, ya que, sin un buen embalaje, los productos no se pueden mover de manera segura. Es un proceso necesario que implica unos costes de infraestructura, ya que requiere tiempo, personal y mantenimiento.

Actualmente, solo existe una solución, utilizada por todas las empresas que fabrican electrodomésticos de línea blanca, para realizar este proceso de empaquetado. La solución consiste en colocar unas piezas de poliestireno expandido en los cantos del producto a empaquetar y, acto seguido, cubrir todo el conjunto con un film plástico para después introducirlo en una caja. Las piezas de poliestireno expandido son transportadas en carros, para que los operarios puedan colocarlas en el producto. Estos carros tienen que reponerse cada vez que se acaban las piezas, lo que supone un movimiento continuo de carros de gran tamaño.

El proyecto empresarial Agil Packaging System (APS) trata de crear tanto un embalaje nuevo como un equipo que permita su fabricación. Este embalaje (figura 1) provocará un ahorro significativo en los costes del empaquetado, y eliminará la necesidad de los carros que transportaban el poliestireno expandido, sin necesidad de que el cliente tenga que variar su modo de trabajo.



Figura 1 Proyecto de embalaje de voluminosos de APS

Este nuevo embalaje se basa en un film multicapa que, mediante un proceso de soldadura, inflado y plegado, se convierte en piezas equivalentes a las de poliestireno expandido, garantizando la misma resistencia que dichas piezas a un menor coste. La soldadura de las láminas de plástico se realizará con un láser, de modo continuo, de forma que la máquina no tenga necesidad de parar.

Este informe se centrará en determinar qué tipo de láser es el adecuado para la aplicación anteriormente descrita y cuáles son los parámetros que optimizan el proceso.

## 2. Objetivo

---

El objetivo de este documento es determinar, mediante un plan de experimentos, una solución de soldadura por láser que garantice una resistencia y fiabilidad adecuados para el novedoso proyecto empresarial APS de embalaje de voluminosos.

## 3. Estado de la técnica

---

Como se ha comentado anteriormente, el embalaje de APS se fabrica a partir de film multicapa, que es sometido a unos procesos, para transformarlo en piezas, de un tamaño y forma adecuados, para ser colocadas en los cantos del producto a empaquetar.

En este apartado, se van a describir los distintos materiales y métodos de soldadura existentes para esta aplicación, así como la justificación de la solución más adecuada.

### 3.1. Material del film

Existen muchos materiales plásticos que pueden ser utilizados para la fabricación de film. En este apartado hablaremos de tres tipos de plásticos: polietileno, poliamida y EVOH; y de su aplicación en estructuras multicapa termoconformadas en la industria del envasado [1].



### 3.1.1. Polietileno

El polietileno, derivado químico del petróleo, tiene una gran diversidad de usos, dependiendo de los procesos a los que es sometido durante su fabricación. Es uno de los plásticos más comunes en alguna de sus variedades.

En base a su composición química, el polietileno puede dividirse en dos grandes conjuntos: los de alta densidad y los de baja densidad. Las diferencias entre el polietileno de alta densidad y el de baja se dan en base a las ramificaciones en sus cadenas y al peso molecular de las mismas. Esto es, a más ramificaciones, menos cristalino y, a mayor peso molecular, menor cristalinidad. En cuanto a las propiedades mecánicas, éstas se relacionan igualmente con estas características; a peso molecular y ramificaciones, mayores son sus propiedades mecánicas.

Ambos tipos de plástico tienen una buena resistencia térmica y a los golpes, y pueden ser termoformados. Asimismo, requieren técnicas especiales de impresión.

La densidad del Polietileno de Baja Densidad (LDPE o PE-LD) oscila entre 0.910 a 0.925 gr cm<sup>-3</sup> y es principalmente amorfo. Puede soportar temperaturas de hasta 80 grados Celsius, es muy resistente a los ataques de sustancias químicas, es atóxico, impermeable al agua y poco permeable al vapor de gases.

Por otra parte, el polietileno de alta densidad admite usos más variados, como los contenedores plásticos más gruesos y resistentes; algunos de ellos son los que se usan para detergentes líquidos y otras sustancias corrosivas o peligrosas. También se utilizan para la fabricación de juguetes, protectores corporales como rodilleras o cascos, diversas clases de prótesis y partes de automóviles. El HDPE puede soportar temperaturas de hasta 120 grados Celsius. Es transparente, rígido y resistente a muchos productos químicos diferentes.

La gran utilidad de los artículos fabricados en polietileno obliga a encontrar un equilibrio entre su utilización y la posterior recuperación por medio del reciclaje.

Las principales desventajas del polietileno son:

- Baja barrera a los gases.
- Baja barrera a los olores y sabores.
- Baja - media transparencia de los envases.
- Alta migración de grasas y aceites.
- Puede producirse deterioro del aislamiento debido a descargas parciales producidas por ionización.
- Su punto de fusión es bastante bajo.

### 3.1.2. Poliamida

Las poliamidas, o también conocidas como nylon, (PA) son polímeros semicristalinos. Se distinguen dos tipos: poliamidas estructuradas a partir de un solo material de partida (p. ej. PA 6) y poliamidas estructuradas a partir de 2 materiales de partida (p. ej. PA 66). Las poliamidas poseen un magnífico cuadro de propiedades mecánicas, una tenacidad muy elevada y unas excelentes características de deslizamiento y resistencia al desgaste. Sus propiedades varían desde la dura y tenaz PA 66 hasta la blanda y flexible PA 12. En función del tipo de material, las poliamidas absorben diferentes cantidades de humedad, con lo cual se ven influenciadas las características mecánicas y la precisión dimensional.

En la fabricación de productos semielaborados se distinguen la extrusión y la colada. Mediante el proceso de colada es posible fabricar productos semielaborados de poliamida de mayores dimensiones y un grado de cristalización superior (mayor resistencia mecánica), los cuales contienen menos tensiones internas. Por el contrario, el método de extrusión permite fabricar con costes más bajos.

A continuación, se muestran algunas de las propiedades de las poliamidas:

- Resistencia mecánica, dureza, rigidez y tenacidad medias-elevadas.
- Elevada capacidad de amortiguación mecánica.
- Buena resistencia a la fatiga.
- Excelente resistencia al desgaste.
- Buenas propiedades de deslizamiento.
- Elevada absorción de humedad.
- Reducida estabilidad dimensional.

Las principales desventajas de las poliamidas son:

- Requieren estabilización UV.
- Alta contracción en las secciones moldeadas.
- La elevada absorción de humedad degrada las propiedades eléctricas y mecánicas.
- Atacadas por agentes oxidantes.
- Atacadas por ácidos y bases fuertes.

### 3.1.3. EVOH

El EVOH es un plástico que actúa como barrera frente al oxígeno, hidrógeno y otros gases, evitando que se filtren sabores y aromas. De hecho, es uno de los polímeros termoplásticos con menor permeabilidad al oxígeno que existen, por lo que es perfecto para retrasar la degradación del alimento por oxidación. Tiene el inconveniente de que la capacidad de barrera de este polímero depende del grado de humedad exterior, por lo que, para protegerlo, suele colocarse entre dos capas aislantes a la humedad compuestas por poliolefinas.

Estas son algunas de las propiedades del EVOH:

- Muy buena barrera a los gases.
- Muy buena barrera al oxígeno.
- Excelente claridad y brillo.
- Resistente a altas temperaturas.
- Resistente a aceites y grasas.
- Resistente al desgaste.

Las principales desventajas del EVOH son:

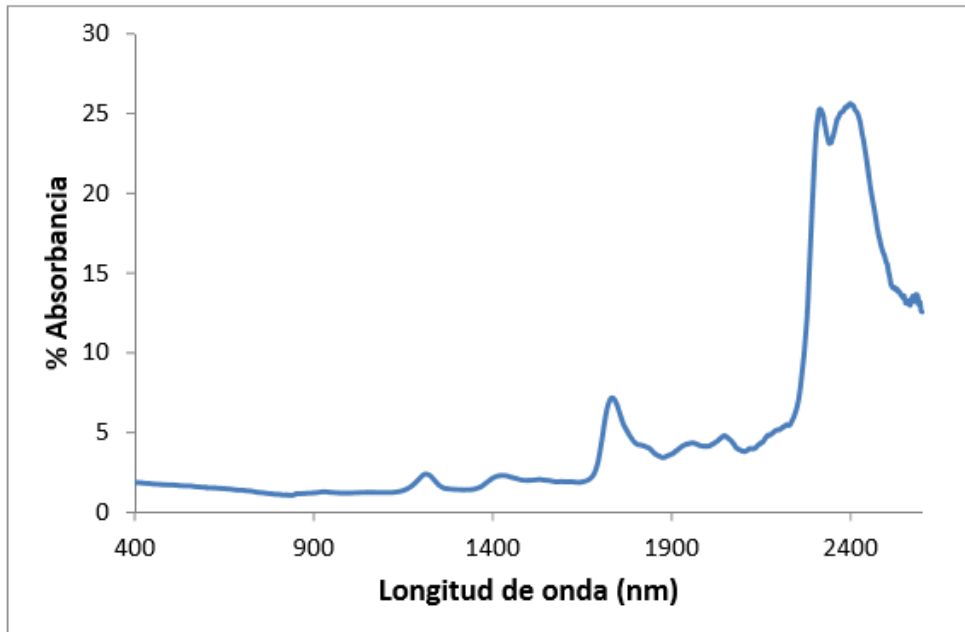
- Reducida estabilidad térmica en la transformación, que exige un equipamiento resistente a la corrosión de las máquinas de transformación.
- Reducida resistencia a radiaciones ultravioleta, por lo que tiende a fragilizarse, e insuficiente reutilización del desecho de producción.
- Reducida resistencia a bases y disolventes.

### 3.1.4. Estructuras

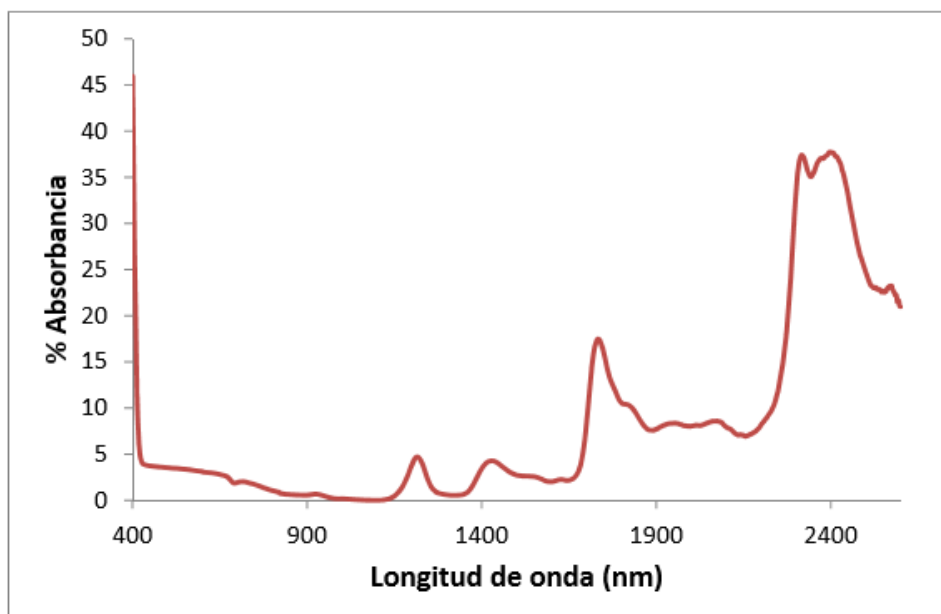
Para los diferentes ensayos que se van a realizar, se dispondrá de cinco muestras compuestas por los materiales descritos anteriormente, cuya estructura será:

- **A1** FILM POLIETILENO/POLIAMIDA/POLIETILENO 60μ
- **B1** FILM POLIETILENO/EVOH32%/POLIETILENO70 μ BLANCO
- **B2** FILM POLIETILENO/EVOH32%/POLIETILENO60 μ
- **B3** FILM POLIETILENO/POLIAMIDA/POLIETILENO 25μ VERDE
- **B4** FILM POLIETILENO/POLIAMIDA/POLIETILENO 50μ

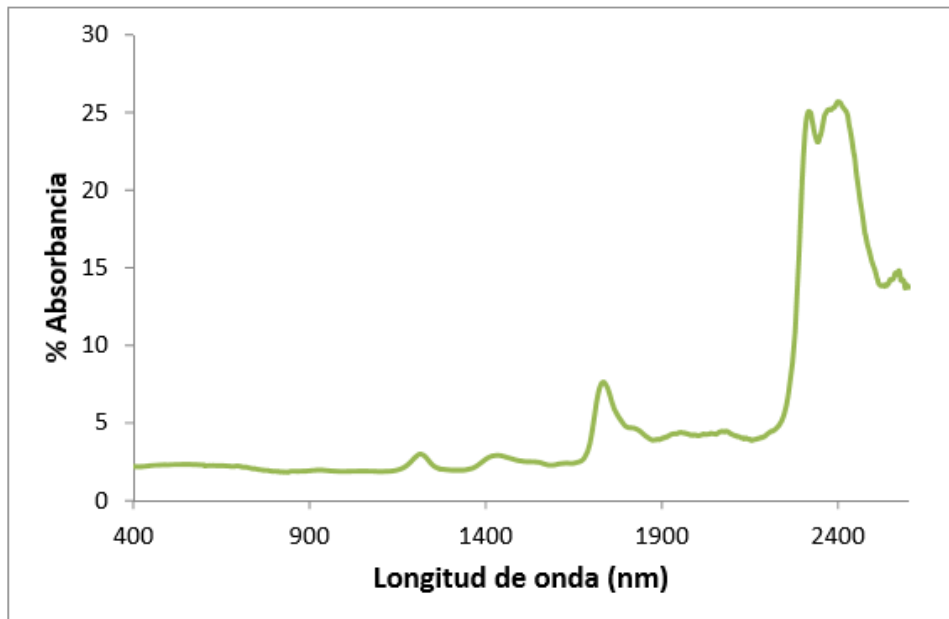
Se ha realizado un ensayo (Figura 2) para determinar la absorbancia de estos materiales en un rango de longitudes de onda desde 400 hasta 2600 nm. Este ensayo muestra en que longitudes de onda absorbe mayor energía el material, lo que permite conocer la longitud de onda en la que el láser tendrá un mayor efecto.



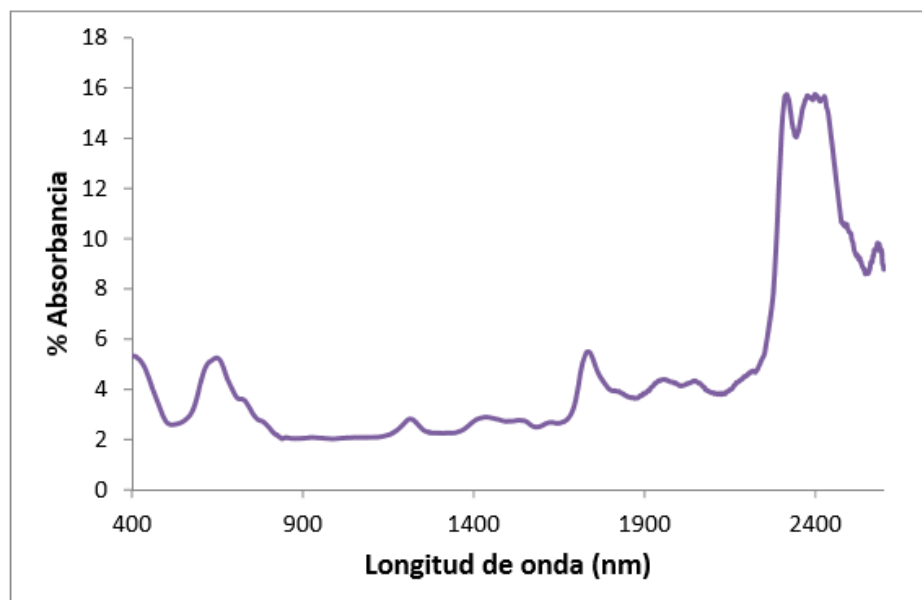
(a)



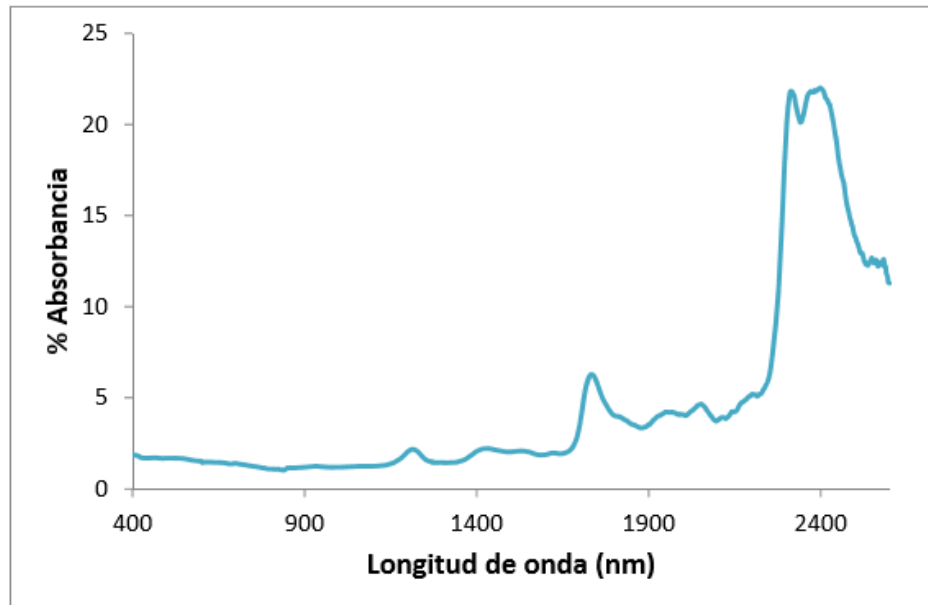
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 2 Absorbancia frente a longitud de onda para los materiales (a) A1, (b) B1, (c) B2, (d) B3, y (e) B4.

## 3.2. Métodos de soldadura

La soldadura es un método de unión de dos materiales muy utilizado en la industria, en particular, la soldadura de plásticos es muy útil a la hora de conseguir uniones permanentes y con una resistencia adecuada.

A continuación, se estudiarán los distintos métodos de soldadura de plásticos presentes en la industria [2], y se determinará el más adecuado para la aplicación del proyecto empresarial APS.

### 3.2.1. Soldadura por ultrasonido

Este método (Figura 3) utiliza vibraciones mecánicas de alta frecuencia para producir la unión. Las partes que se van a unir se mantienen juntas ejerciendo presión sobre ellas mientras están sujetas a vibraciones de en torno a 20 o 40 KHz. Alternando altas frecuencias, el estrés provoca calor en la interfase entre ambos materiales para producir una buena soldadura.

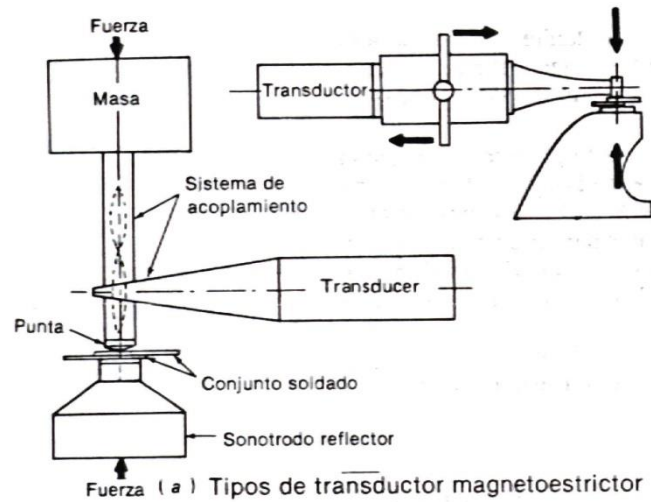


Figura 3 Esquema de soldadura por ultrasonido

Las herramientas necesarias para este proceso son bastante caras y, por lo tanto, es preferible un volumen de producción alto. Esta soldadura está limitada a componentes pequeños con longitudes de soldadura que no excedan los pocos centímetros.

### 3.2.2. Soldadura por fricción

Esta soldadura (Figura 4) se basa en el mismo principio que la que se usa para soldar metales. Uno de los sustratos a unir permanece inmóvil, mientras que el otro sustrato está girando a una velocidad angular controlada. Al presionar ambos sustratos, el calor generado por la fricción causa que los polímeros se unan, creándose una soldadura al enfriar.

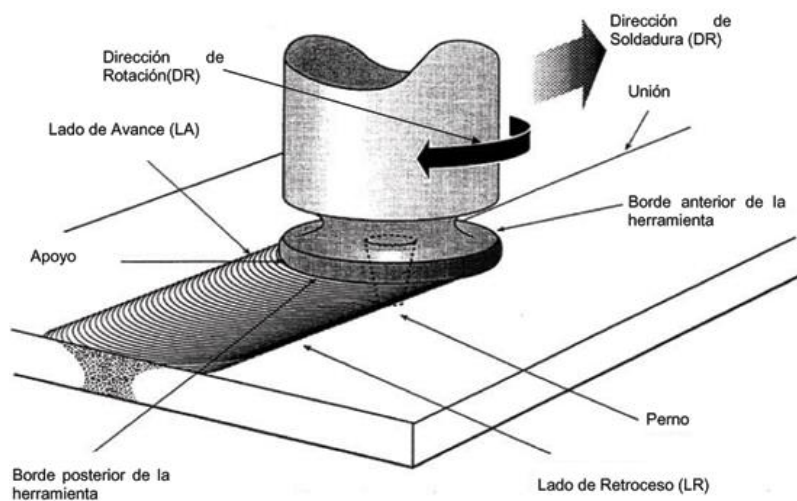


Figura 4 Esquema de soldadura por fricción

Esta soldadura tiene claras ventajas, ya que crea una buena unión y el proceso es muy simple y fácil de reproducir. El problema de este tipo de proceso es que no es aplicable para el proyecto APS, puesto que en dicho proyecto el film se mueve de forma lineal y continua y, en este proceso, se requiere que al menos una de las partes realice un movimiento rotacional.

### 3.2.3. Soldadura por vibración

En este tipo de soldadura (Figura 5), dos sustratos de plástico permanecen en contacto, bajo presión y a una frecuencia y amplitud adecuadas, hasta que se genera el calor suficiente para mezclar los polímeros. Antes de parar la vibración, las partes se alinean de modo que se les permita solidificar formando el cordón de soldadura. La diferencia entre la soldadura por vibración y la soldadura por fricción es que, en la primera, el movimiento es lineal en vez de rotacional.

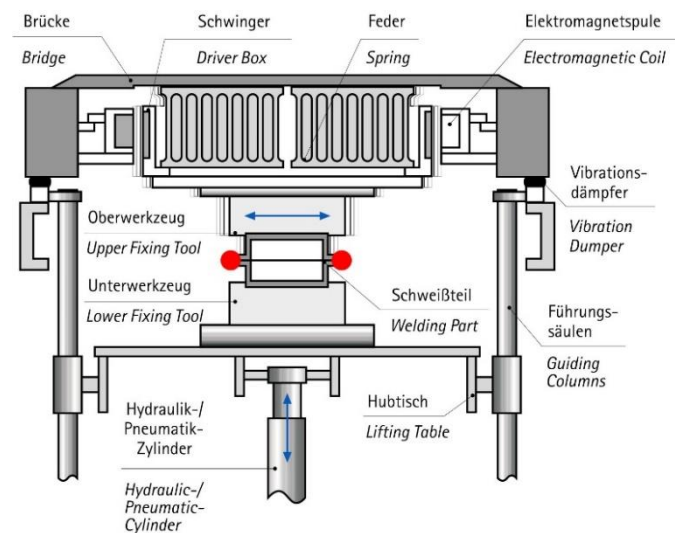


Figura 5 Esquema de soldadura por vibración

La principal ventaja de este proceso es que permite soldar largas y complicadas uniones a una alta velocidad de producción. Otras de sus ventajas son la posibilidad de realizar varias soldaduras de forma simultánea, la simplicidad de las herramientas necesarias y la capacidad de soldar casi todos los materiales termoplásticos. El principal problema que presenta este tipo de soldadura para el proyecto APS es que no permite una soldadura en modo continuo, ya que, los materiales a soldar, deben permanecer inmóviles durante el proceso.



### 3.2.4. Soldadura por placa caliente

Esta soldadura (Figura 6) es la más simple de las técnicas para la producción en masa de uniones plásticas. El proceso consiste en situar una placa caliente entre las superficies a unir hasta que estas se ablandan. Después, se retira la placa y se ponen en contacto las superficies, bajo una presión adecuada, un periodo de tiempo determinado. Esto permite a los plásticos enfriar, creando un cordón de soldadura.

La principal desventaja de este proceso es que los tiempos de enfriamiento son altos, en el rango de 10 a 20 segundos para piezas pequeñas y hasta 30 minutos para piezas mayores. Este hecho, unido a la dificultad de hacer uniones precisas con este método, hacen de él un método inadecuado para el proyecto APS.

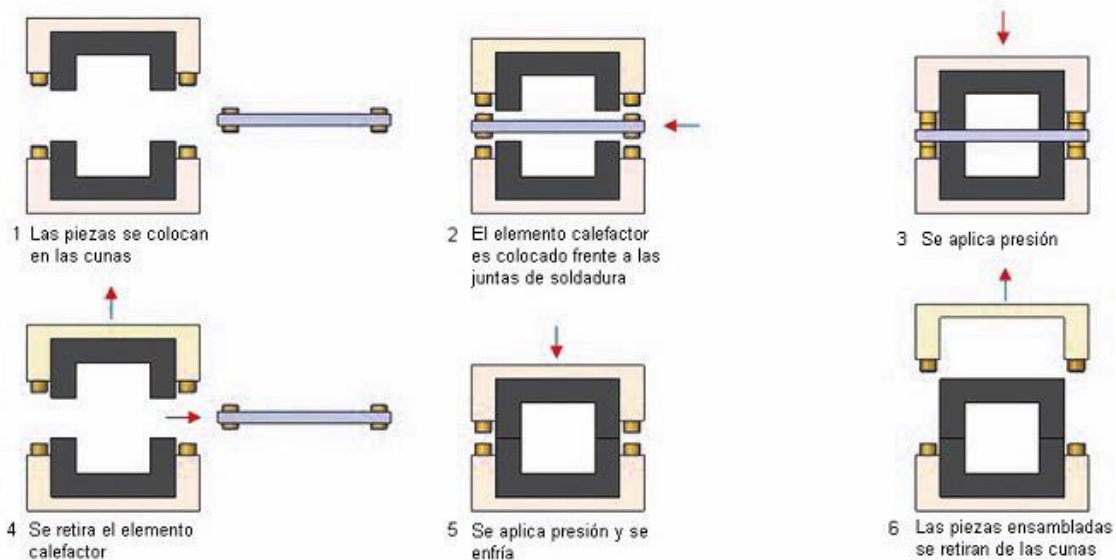


Figura 6 Esquema de soldadura por placa caliente

### 3.2.5. Soldadura por aire caliente

Esta técnica (Figura 7) es parecida a la soldadura oxiacetilénica de metales, con la única diferencia de que la llama de oxiacetileno es remplazada por una corriente de aire caliente. El aire, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno o dióxido de carbono comprimido, se calienta gracias a una resistencia eléctrica, y pasa por la pistola de soldadura. Este método se utiliza para la fabricación de materiales termoplásticos y suele dar resultados satisfactorios, además de ser barato.

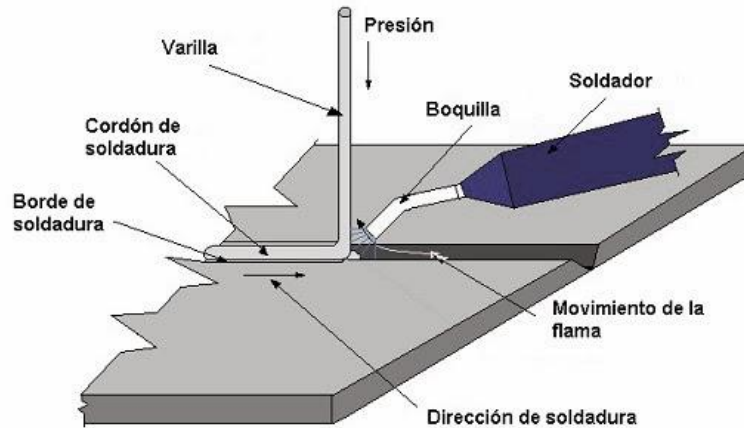


Figura 7 Esquema de soldadura por aire caliente

La mayor ventaja de este método es que permite realizar fabricaciones grandes y complejas. Sus principales desventajas son la baja velocidad del proceso y la necesidad de un operario. Dado que el proyecto APS pretende ser completamente automatizado, estas desventajas hacen de la soldadura por aire caliente una técnica inadecuada.

### 3.2.6. Soldadura de implantes

En este proceso, se colocan insertos de metal entre las partes a unir y se calientan por inducción o mediante una resistencia. El material termoplástico se derrite alrededor de los implantes y fluye para formar una unión.

Esta técnica se aplica en uniones complejas y grandes componentes, no es adecuada para la unión de materiales de bajo espesor.

### 3.2.7. Soldadura por láser

La soldadura por láser consiste en la aplicación de un haz láser en la zona de unión para fundir el plástico. Se genera un intenso haz de radiación que está enfocado sobre el material a unir. Esto excita una frecuencia de resonancia de la molécula, dando como resultado el calentamiento del material circundante.

Este método de soldadura es para grandes volúmenes de producción y tiene la ventaja de no crear vibraciones. Los beneficios del sistema láser incluyen: el control de la potencia del haz, la reducción del riesgo de distorsiones o daños en el material, la precisión del foco del haz láser, y el hecho de ser un proceso sin contacto y limpio.

Por todo ello, se considera que la soldadura por láser es el método más adecuado para este proyecto.

Existen varios tipos de láseres, según su fuente de alimentación, que son aplicables al proceso de soldadura de plásticos [3]. A continuación, se describen los más importantes:

### 3.2.7.1. Láseres de diodo

Hoy en día, los láseres de diodo son una de las fuentes láser más importantes para aplicaciones industriales, disponibles en una amplia gama de longitudes de onda en el rango de la radiación UV a IR con potencias desde los mW a los kW.

Para la soldadura de plásticos, es interesante el rango de longitudes de onda desde 800 a 2000 nm. Comúnmente, para la soldadura de plásticos con láseres de diodo se usan las longitudes de onda de 808 nm, 940 nm o 980 nm con potencias de hasta 300 W. Aun así, debido a las propiedades de absorción de la radiación para los distintos materiales plásticos, se están desarrollando láseres en un amplio rango de longitudes de onda.

El medio láser-activo de los láseres de diodo son los materiales semiconductores como GaAlAs o InGaAsP, que tienen una influencia directa en la longitud de onda de la radiación láser. La activación del proceso para generar la emisión láser se da directamente aplicando una corriente eléctrica a los diodos láser. Debido a esto y a la eficiencia cuántica del proceso, los láseres de diodo tienen un alto grado de eficacia, en el rango de hasta el 40%.

El montaje general de un láser de diodo (Figura 8) para el procesado de material viene dado por un par de emisores individuales colocados en una barra de diodos. La construcción de un láser de diodo se consigue apilando varias barras de diodos en una pila.

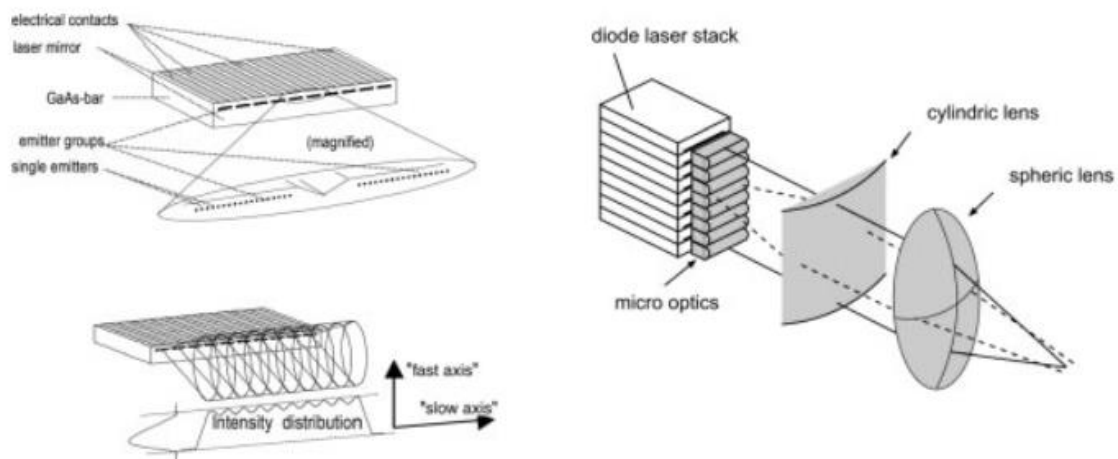


Figura 8 Esquema del montaje de un láser de diodo [3]

Cada emisor individual de la barra de diodos lleva su propio resonador láser en el extremo delantero y trasero para generar radiación láser. Esta radiación se transforma en un haz láser gracias a unas microlentes.

Los láseres de diodo de fibra acoplada (Figura 9) usan fibra de vidrio para transportar el haz láser desde el láser hasta la unidad de enfoque. La radiación láser se acopla en la fibra de vidrio con un sistema de lentes especialmente diseñado que conlleva una cierta pérdida de potencia. El haz, a la salida de la fibra de vidrio, tiene una distribución de intensidad en forma de sombrero de copa circular, con mejor calidad del haz que los láseres de diodo de acoplamiento directo.



Figura 9 Láser de diodo de fibra acoplada con potencias de hasta 500 W [3]

### 3.2.7.2. Láseres de Nd:YAG

Los láseres de Nd:YAG, como los de estado sólido, de longitudes de onda de 1064 nm, se usan en aplicaciones industriales desde hace mucho tiempo con potencias de hasta varios kW. Antes del desarrollo de los láseres de diodo, los de Nd:YAG estaban disponibles en onda de pulso o continua.

En el montaje de un láser de Nd:YAG bombeado por lámpara (Figura 10), la varilla de cristal de Nd:YAG, como el medio láser, se coloca junto con la lámpara de bomba dentro de un espejo como elíptica pulida (usando una lámpara) o doble cavidad elíptica (usando dos lámparas).

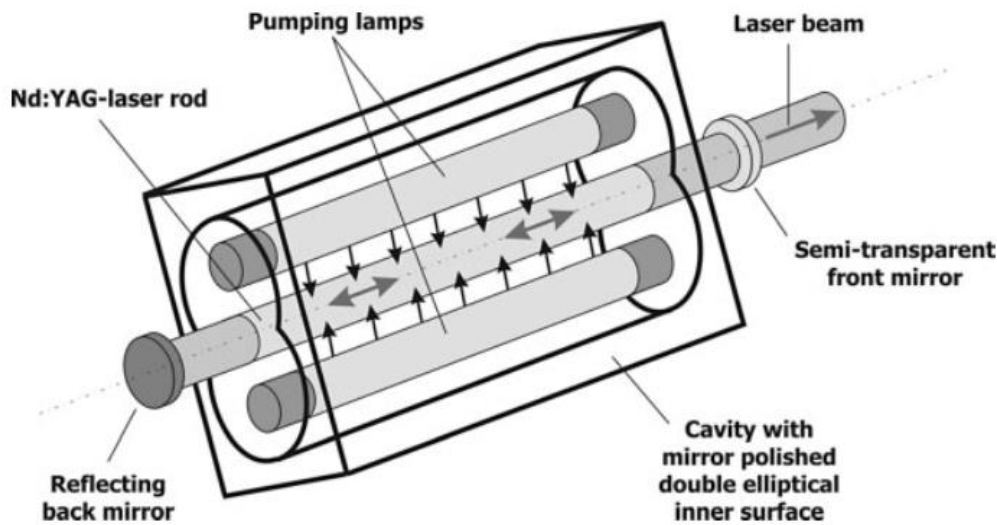


Figura 10 Configuración principal de un láser de Nd:YAG bombeado por lámpara [3]

Tanto las lámparas como la barra de cristal están colocadas en el centro de la cavidad elíptica. Por lo tanto, la radiación óptica de las lámparas se centrará en la barra de cristal para la estimulación efectiva del proceso láser. La radiación láser se forma gracias a dos espejos resonadores, uno con reflectividad total y el otro semitransparente para desacoplar el haz láser.

La efectividad de estos láseres es muy baja, con una relación de potencia del láser a la entrada eléctrica de alrededor del 3%. La mayoría de las emisiones de las lámparas generan un calor que tiene que ser disipado mediante un flujo continuo de agua de refrigeración alrededor del medio láser.

Trabajando en la longitud de onda apropiada para las propiedades de absorción del medio láser Nd:YAG, la calidad de estos láseres ha aumentado considerablemente. Su efectividad ha aumentado hasta valores en torno al 10%, la influencia térmica del medio láser ha disminuido y la calidad del haz es mucho mejor que la de los láseres de Nd:YAG bombeados por lámpara.

Nuevos desarrollos de láseres de Nd:YAG resultan de la optimización de la geometría del medio láser y de bombearlo con un láser de diodo, en los llamados láseres de disco de Nd:YAG. El medio láser activo es un disco fino de cristal de Nd:YAG, montado sobre un disipador de calor para un enfriamiento eficaz. La losa es bombeada ópticamente por los láseres de diodo y una estructura de resonancia compleja genera la radiación láser (Figura 11) con un haz de rayos de salida de alta calidad.

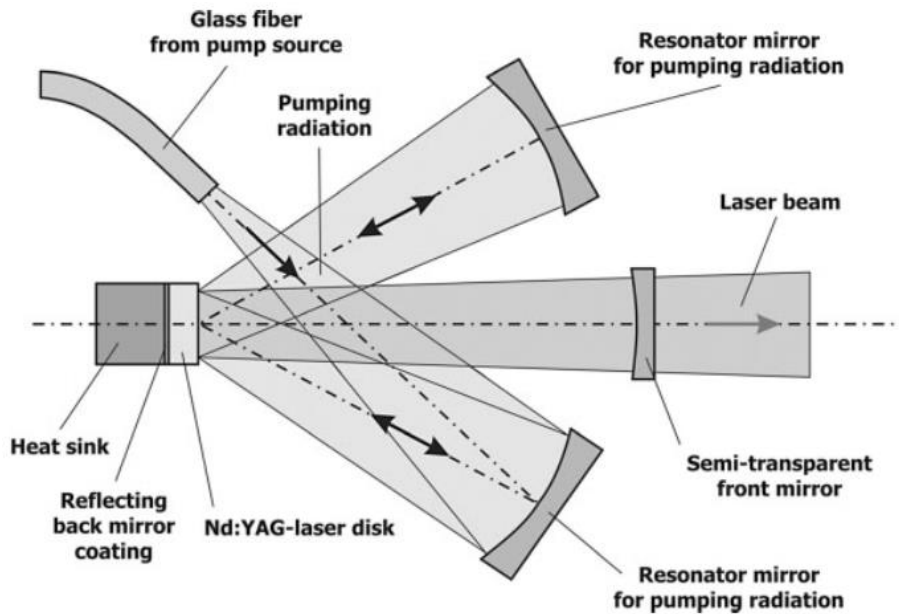


Figura 11 Configuración principal de un láser de disco de Nd:YAG [3]

Como los láseres de diodo, los láseres de Nd:YAG se usan con un haz de trabajo directo o como los láseres de fibra acoplada. Normalmente, el haz láser, que viene directo desde la fuente, se guía a través de un expansor de haz para aumentar su radio y obtener unas propiedades de enfoque mejores.

### 3.2.7.3. Láseres de fibra

Dentro de la familia de los láseres NIR, los láseres de fibra son lo último en el desarrollo de fuentes láser para aplicaciones de procesamiento de material. Los láseres de fibra están disponibles para potencias ópticas de salida de hasta varios kW, trabajando en distintas longitudes de onda dependiendo del tipo de medio activo. En el campo de la soldadura de termoplásticos, los láseres de fibra son una alternativa interesante a los de diodo y Nd:YAG por la alta calidad de su haz láser y su eficacia de en torno al 30%.

La unidad base de un láser de fibra (Figura 12) es una fibra de vidrio de pequeño diámetro con un núcleo especial de sílice dopado como medio activo. El tipo de dopado del núcleo establecerá la longitud de onda de la radiación láser.

El resonador láser de un láser de fibra está constituido por recubrimientos especiales en ambos extremos de la fibra de vidrio. El recubrimiento es reflector para la radiación láser generada y transparente para la radiación bombeada, generando el proceso láser dentro del núcleo de sílice.



El bombeo se lleva a cabo mediante radiación óptica dentro de una longitud de onda determinada, por ejemplo, procedente de una fuente de láser de diodo. La radiación bombeada se acoplará al revestimiento de sílice de la fibra de vidrio y se transmitirá a lo largo de la longitud de la misma hasta llegar al núcleo para generar la radiación láser.

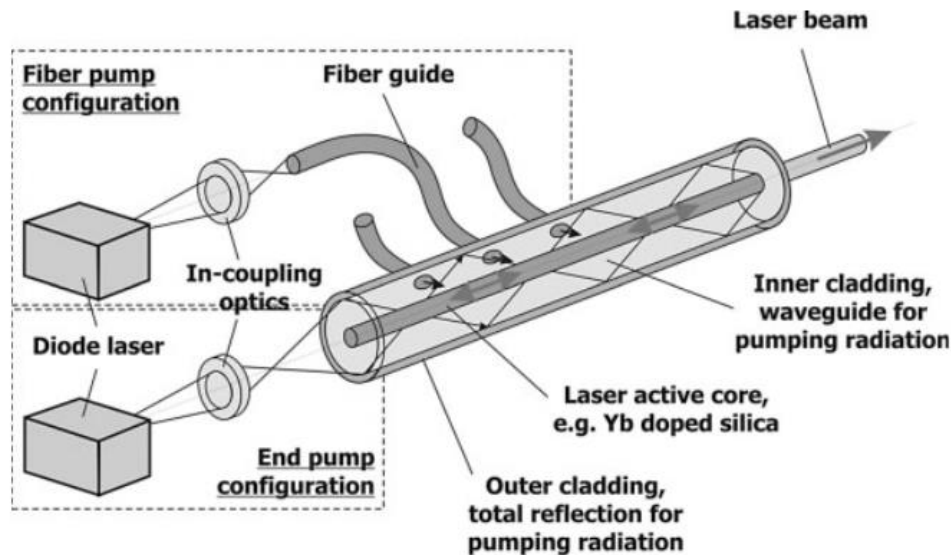


Figura 12 Configuración principal de un láser de fibra bombeado por diodo [3]

Debido a la longitud y el diámetro de la fibra de vidrio, el haz láser de un láser de fibra será de alta calidad y se acoplará a un sistema de entrega del haz de la fibra de bajo diámetro, para guiar al haz hasta un dispositivo de enfoque.

### 3.2.7.4. Láseres de CO<sub>2</sub>

Los láseres de CO<sub>2</sub> son láseres de gas que trabajan con una mezcla de nitrógeno (N<sub>2</sub>), helio (He) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a baja presión. Para el procesado de plásticos es común el uso de láseres de CO<sub>2</sub> de flujo lento o guía de onda, con alta calidad del haz láser y potencias de hasta 500 W. Debido a la baja penetración de los láseres de CO<sub>2</sub> en los materiales termoplásticos, estos no suelen usarse para la soldadura de plásticos, pero sí para aplicaciones especiales como la soldadura de films termoplásticos.

El proceso de bombeado para estos láseres es diferente del bombeado óptico de los láseres de Nd:YAG y de fibra, y diferente del bombeado eléctrico directo de los láseres de diodo. El bombeado para los láseres de CO<sub>2</sub> es mediante una descarga eléctrica de gas a baja presión.

En el montaje de un láser de CO<sub>2</sub> de flujo lento (Figura 13) la unidad base es un tubo cilíndrico de cristal lleno de gas con una salida que contiene un ánodo y un cátodo para la descarga de corriente continua. El tubo de cristal está sellado en sus dos

extremos, contra la presión atmosférica, por dos ventanas de ZnSe transparentes para la radiación CO<sub>2</sub>. La mezcla de gas fluye de forma laminar a lo largo del tubo de cristal mientras la descarga está ardiendo entre el cátodo y el ánodo.

La descarga eléctrica aumenta la energía de las moléculas de nitrógeno provocando oscilaciones lineales. Estas moléculas activadas chocan con las moléculas de dióxido de carbono y les transmiten su energía. El estado de salida de las moléculas de dióxido de carbono se relaja a un estado energético inferior emitiendo fotones en una longitud de onda de 10 μm, generando el proceso láser entre los espejos resonadores. Una fracción de la radiación láser generada atraviesa el espejo semitransparente y provoca la formación del haz láser.

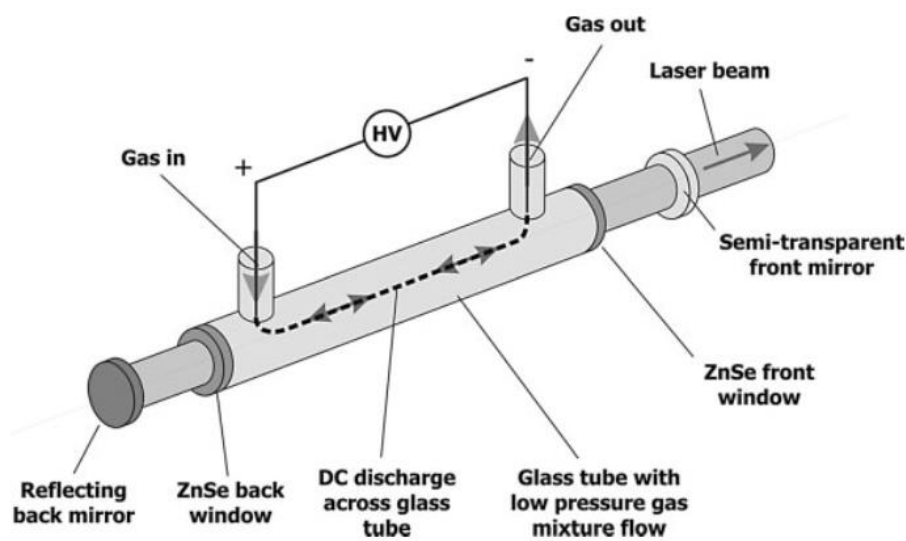


Figura 13 Configuración principal de un láser de CO<sub>2</sub> de flujo lento [3]

La configuración principal de un láser de CO<sub>2</sub> de guía de ondas (Figura 14) es diferente a la de un láser de flujo lento. Su unidad base es una cavidad cerámica con un pequeño orificio que contiene la mezcla de gas. El orificio está sellado en sus dos extremos contra la presión atmosférica por dos ventanas de ZnSe o directamente por los espejos resonadores.

La mezcla de gas permanece estática en el orificio sin ningún tipo de flujo. La estimulación del proceso láser se lleva a cabo mediante una descarga eléctrica de alta frecuencia, producida dentro de la mezcla de gas por dos electrodos situados en la parte superior e inferior de la cavidad cerámica.

Los láseres de guía de ondas con una cavidad cerámica están disponibles para una potencia máxima de aproximadamente 100 W. Para obtener potencias de hasta 500 W, se combinan varias cavidades cerámicas en un solo haz láser, manteniendo la alta calidad del haz.



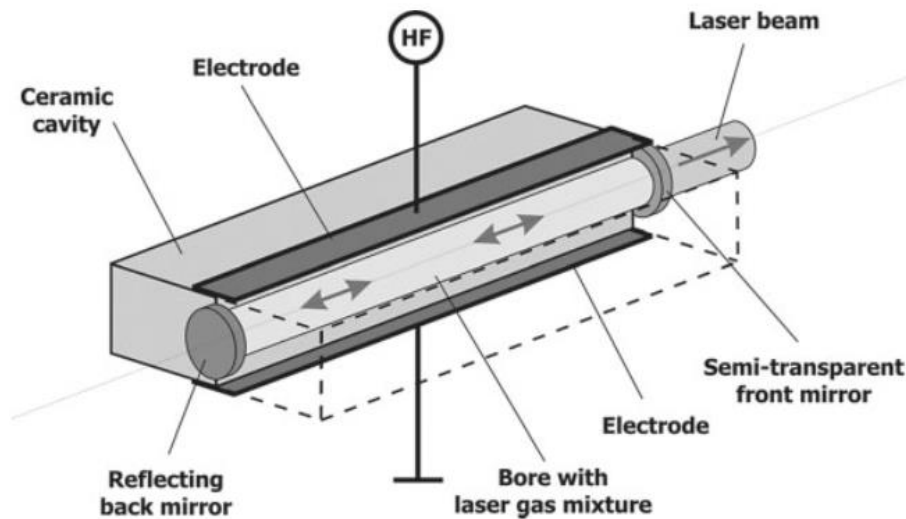


Figura 14 Configuración principal de un láser de CO2 de guía de ondas [3]

### 3.2.7.5. Comparativa

Todas las fuentes láser descritas anteriormente son aplicables al proceso de soldadura de plásticos. La elección de la mejor fuente para una aplicación concreta dependerá de factores como la absorbancia del material a soldar o la geometría del cordón de soldadura. La absorbancia de los termoplásticos se puede adaptar al proceso usando agentes absorbentes de la radiación láser.

En la mayoría de los casos, la calidad del haz láser no es un factor crítico, debido al valor tan reducido del ancho del cordón de soldadura. Las fuentes láser estándar para la soldadura de plásticos son los láseres de diodo con longitudes de onda de 940 o 980 nm. Los láseres de Nd:YAG con longitudes de onda de 1064 nm, hoy en día, juegan un papel menos importante.

Los nuevos desarrollos de aplicaciones para la soldadura de termoplásticos transparentes sin necesidad de un absorbedor adicional se llevan a cabo mediante láseres de diodo con longitudes de onda de 1500 o 2000 nm. Pero estos láseres pueden ser más caros y, por lo tanto, se ha de elegir entre estos o el uso de agentes absorbentes.

Para aplicaciones con geometrías de soldadura de pequeño tamaño, se pueden usar láseres de fibra con alta calidad del haz. Estos láseres, con longitudes de onda de entorno a los 1000 nm, necesitan agentes absorbentes. De todas maneras, hay disponibles láseres de fibra con mayores longitudes de onda que no los necesitarían.

La tabla 1 muestra, para los diferentes tipos de láseres, las longitudes de onda típicas disponibles, la calidad del haz láser y su eficiencia. También presenta el comportamiento de la absorción de resinas termoplásticas naturales y los agentes absorbentes adicionales requeridos para una buena soldadura.

Tabla 1 Fuentes láser típicas para la soldadura de plásticos [3]

Laser	Wavelength	Beam quality	Efficiency	Absorption to natural plastic	Need for additional absorber
Diode laser	808 nm	low	>35%	transparent	yes
	940 nm	low	>40%	transparent	yes
	980 nm	low	>40%	transparent	yes
	1550 nm	low	>10%	volume	no <sup>a)</sup>
	1940 nm	low	>6%	volume	no <sup>a)</sup>
Fiber laser	1050 nm	good	n.a.	transparent	yes
	1070 nm	good	>25%	transparent	yes
	1090 nm	good	n.a.	transparent	yes
	1550 nm	good	>10%	volume	no <sup>a)</sup>
	2000 nm	good	>5%	volume	no <sup>a)</sup>
Nd:YAG laser	1064 nm	medium	<5%	transparent	yes
CO <sub>2</sub> laser	10.6 μm	good	10%	surface	no

a) If laser intensity is sufficiently high.

## 4. Modelo termodinámico

De acuerdo con Coelho [4], es necesario establecer un modelo teórico que aborde la transferencia de calor que ocurre durante el proceso de soldadura con láser. A continuación, se muestra dicho modelo basado en el documento de Coelho.

En la teoría de la conducción del calor, el parámetro que se conserva se genera o se pierde es la energía térmica. La densidad por unidad de masa de un material (sólido o líquido) de densidad  $\rho$  [kg m<sup>-3</sup>] y calor específico a presión constante  $C_p$  [J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>] viene dada por  $\rho \cdot \int C_p dT$ , y la tasa del vector de transferencia de calor viene dada por  $\mathbf{Q} = -\mathbf{K} \cdot \nabla(T) + \rho \vec{v} \int C_p dT$ , donde  $\mathbf{K}$  [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>] es la conductividad térmica, y  $\vec{v}$  el vector de velocidad. Si la temperatura cambia con el tiempo y hay presente una fuente de calor, se puede establecer el siguiente balance de energía:

$$\begin{aligned} & \text{Energía conducida al interior del material} + \text{Calor generado en el interior} \\ & = \text{Energía conducida al exterior del material} \\ & + \text{Variación de la energía interna} \end{aligned}$$

Y la ecuación de la conducción de energía es, entonces:

$$\left\{ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) \right\} \int C_p dT + \rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot K \nabla T + Q(r) \quad (1)$$

Debido a la conservación de la masa, la ecuación se simplifica a:

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot K \nabla T + Q(r) \quad (2)$$

Considerando  $\mathbf{K} = \mathbf{K}(T)$ , definiendo la difusividad térmica  $\mathbf{k}$  [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ] como

$$k = \frac{K}{\rho C_p},$$

y con  $\rho$ ,  $C_p$  y  $\mathbf{k}$  constantes, la Ec. (2) se convierte en:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + \frac{Q(r)}{\rho C_p} \quad (3)$$

Asumiendo que, el plástico a soldar se mueve solo en una dirección, entonces, la Ec. (3) puede tomar la forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \{\Delta T(r, t)\} = k \nabla^2 \{\Delta T(r, t)\} - v_x \frac{\partial}{\partial x} \{\Delta T(r, t)\} + \frac{1}{\rho C_p} Q(r) \quad (4)$$

donde  $\Delta T(r, t)$  es la variación de temperatura (a la temperatura ambiente) y  $r$  representa las coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . El calor producido por el material debido a la absorción de la radiación láser viene dado por:

$$Q(r) = a_T \cdot I(r) \cdot \exp(-a_T \cdot z) = \frac{4a_T P}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \exp\left[-\frac{2(x^2+y^2)}{\left(\frac{d}{2}\right)^2}\right] \cdot \exp(-a_T \cdot z) \quad (5)$$

siendo la intensidad dentro del spot  $I(r)$ , para una sola capa de material, según Ukar [5]:

$$I(r) = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} \cdot \exp\left[\frac{-2 \cdot ((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2)}{\left(\frac{d}{2}\right)^2}\right]$$

donde  $P$  [W] representa la potencia promedio entregada por el láser,  $d$  [m] es el diámetro del haz en el material y  $a_T$  es el coeficiente de absorción que, acorde con Coelho [6], se mide como:

$$a_T = \frac{1}{h} \ln \frac{I_0}{I}$$

donde  $h$  es el espesor de la muestra,  $I$  es la irradiancia transmitida e  $I_0$  es la irradiancia incidente.

Para el caso de films termoplásticos procesados a una velocidad de 100 mm s<sup>-1</sup>, el medio puede considerarse como un espacio infinito, ya que  $h \gg 2k/v_x$  es válido. Luego, considerando que el haz láser se propaga en la dirección Z, las condiciones de contorno para resolver la Ec. (4) son:

$$\begin{aligned} \Delta T(x, y, z, t)|_{t=0} &= 0, \\ \Delta T(x, y, z, t)|_{x, y, z = \pm \infty} &= 0, \quad (6) \\ \delta T(x, y, z, t)|_{t=0} &= 0, \end{aligned}$$

con  $\delta T$  siendo el gradiente de temperaturas.

Usando la función Green, la solución puede escribirse como:

$$\Delta T(x, y, z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} Q(\xi, \eta, \mu, \tau) \cdot G\left(\frac{x}{\xi}, \frac{y}{\eta}, \frac{z}{\mu}, \frac{t}{\tau}\right) \cdot d\xi \cdot d\eta \cdot d\mu \cdot d\tau \quad (7)$$

Esta metodología tiene la ventaja de que la función Green es independiente de los términos no homogéneos de la ecuación diferencial; luego, habiendo determinado dicha función, la solución se puede obtener simplemente integrando. La función Green satisface la ecuación diferencial

$$\frac{\partial G}{\partial t} - k\nabla^2 G + v_x \frac{\partial G}{\partial x} = \frac{1}{\rho C_p} \delta(x - \xi)\delta(y - \eta)\delta(z - \mu)\delta(t - \tau) \quad (8)$$

donde  $\delta$  representa la función delta de Dirac. Aplicando la transformada de Fourier, la solución de la Ec. (8) en el espacio  $\omega_x$ ,  $\omega_y$  y  $\omega_z$  es:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G_F}{\partial t} + k(\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2)G_F - i\omega_x v_x G_F \\ = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \rho C_p} \exp[i(\omega_x \xi + \omega_y \eta + \omega_z \mu)] \delta(t - \tau) \end{aligned} \quad (9)$$

donde  $G_F$  representa la transformada de Fourier de  $G$ . Para simplificar la Ec. (9), se aplica la transformada de Laplace, obteniendo:

$$\begin{aligned} sG_{FL} + k(\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2)G_{FL} - i\omega_x v_x G_{FL} \\ = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \rho C_p} \exp[i(\omega_x \xi + \omega_y \eta + \omega_z \mu)] \exp(-s\tau) \end{aligned} \quad (10)$$

o

$$G_{FL} = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \rho C_p} \cdot \frac{\exp[i(\omega_x \xi + \omega_y \eta + \omega_z \mu)] \exp(-s\tau)}{s + k(\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2) - i\omega_x v_x} \quad (11)$$

donde  $G_{FL}$  es la transformada de Laplace de  $G_F$ . Invirtiendo estas operaciones, se puede obtener la función Green como:

$$\begin{aligned} G = \frac{u(t - \tau)}{[4\pi k(t - \tau)]^{3/2} \rho C_p} \\ \cdot \exp\left\{-\frac{[x - \xi + v_x(t - \tau)]^2 + (y - \eta)^2 + (z - \mu)^2}{4k(t - \tau)}\right\} \end{aligned} \quad (12)$$

Luego, introduciendo las Ecs. (12) y (5) en la Ec. (7) obtenemos:

$$\Delta T(x, y, z, t) = \frac{2a_T \cdot P}{\pi \rho C_p} \cdot \int_0^t \frac{1}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + 8k(t - \tau)} \cdot \exp\left\{-\frac{[x - v_x(t - \tau)]^2 + y^2}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + 8k(t - \tau)}\right\} \cdot \{a_T[k(t - \tau) - z]\} \cdot \operatorname{erfc}\left\{\frac{2a_T \cdot k(t - \tau) - z}{[4k(t - \tau)]^{\frac{1}{2}}}\right\} \cdot d\tau \quad (13)$$

Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, los films termoplásticos estudiados en este documento presentan una baja absorbancia para la radiación láser, y una conducción del calor reducida debido a los valores tan bajos de conductividad térmica. Por lo tanto, la influencia de  $z$  se puede despreciar de la solución, excepto en el término  $\exp(-a_T z)$ , ya que representa la atenuación del haz láser en la trayectoria. Luego, el modelo queda como:

$$\Delta T(x, y, z, t) = \frac{4a_T \cdot P}{\pi \rho C_p} \exp(-a_T \cdot z) \cdot \int_0^t \frac{1}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + 8k(t - \tau)} \cdot \exp\left\{-\frac{[x - v_x(t - \tau)]^2 + y^2}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + 8k(t - \tau)}\right\} \cdot d\tau \quad (14)$$

El comportamiento térmico durante el enfriamiento puede predecirse con la relación

$$\Delta T(x, y, z, t)|_{t > t_{inter}} = \Delta T(x, y, z, t) - \Delta T(x, y, z, t - t_{inter}) \quad (15)$$

donde  $t_{inter}$  es el tiempo de interacción.

Además, para este modelo, se considera el introducir un material reflectante bajo las muestras de film. Este fenómeno puede simularse considerando la existencia de otra fuente bajo el termoplástico, resultante de la reflectancia  $R^*$ , y se espera que mejore la eficiencia del proceso. Luego, la Ec. (14) debe de alterarse acorde a esto, resultando en:

$$\Delta T(x, y, z, t) = \Delta T(x, y, z, t)|_{\bar{w}/subst} + (1 - A)^2 \cdot R^* \cdot \Delta T(x, y, |z - 2 \cdot h|, t)|_{\bar{w}/subst} \quad (16)$$

representando  $\Delta T(x, y, z, t) |_{\bar{w}/subst}$ , el valor esperado sin el material reflectante, dado por la Ec. (14) o (15), y  $A$ , la absorbancia del film.

Las relaciones anteriores permiten realizar la una predicción de los parámetros ingenieriles necesarios para alcanzar la temperatura de soldadura  $T_s$ . Un método habitual es considerar la densidad de energía entregada  $(E/A_r)_0$  como un parámetro útil, combinando los valores de las variables del proceso: potencia del láser incidente  $P_0$ , velocidad de desplazamiento  $v_x$ , y diámetro del spot  $d$ , sobre el material. Luego la ecuación (17) relaciona todos los parámetros ingenieriles más importantes envueltos en el procesado láser.

$$\left(\frac{E}{A_r}\right)_0 = \frac{4P_0}{\pi \cdot v_x \cdot d} \quad (17)$$

## 5. Proceso experimental

---

En este apartado, se va a describir el plan de ensayos, en consonancia con el informe de Coelho [7], que se consideran necesarios para determinar los parámetros del láser y las características de una buena soldadura. Se realizarán estimaciones teóricas de los valores a obtener y se compararán con los resultados experimentales.

### 5.1. Estimaciones

Antes de proceder con los ensayos, se va a realizar una estimación de la densidad de energía necesaria para la soldadura con láser de un film de LDPE transparente, con un diámetro de spot de 2.3 mm y un espesor de 60  $\mu\text{m}$ . A continuación (Tabla 2), se muestran los valores para algunos parámetros importantes de distintos plásticos:

Tabla 2 Parámetros termoplásticos para  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  [4]

	HD PE		LD PE transparent	PP transparent
	transparent	white		
Absorption coefficient $a_r$ [ $\times 10^3 \text{ m}^{-1}$ ], measured	0.822	1.561	1.092	3.831
Attenuation length $L$ [ $\times 10^{-3} \text{ m}$ ], measured	1.22	0.64	0.92	0.26
Complex refractive index, measured	$1.5 - 7 \times 10^{-4} i$	$1.5 - 10^{-3} i$	$1.6 - 9 \times 10^{-4} i$	$1.5 - 3 \times 10^{-3} i$
Thermal expansion coefficient $\alpha$ [ $\times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ]	3.6	=	4.5	0.8
Thermal conductivity $K$ [ $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ]	0.490	=	0.335	0.150
Density $\rho$ [ $\text{kg m}^{-3}$ ]	952	=	917	890
Specific heat capacity $C_p$ [ $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ]	3150	2737	1157	1469
Tensile modulus $E$ [ $\times 10^6 \text{ Pa}$ ]	0.80	=	0.25	1.35
Thermal diffusivity $k$ [ $\times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ]	0.16	0.19	0.32	0.12
Melting temperature $T_f$ [K], measured	396	=	377	433
Welding temperature $T_s$ [K]	474	=	474	500
Latent heat of fusion $L_f$ [ $\text{J kg}^{-1}$ ]	103340	91685	34120	47005

Para el cálculo de la energía necesaria para soldar el plástico, se ha de tener en cuenta que el proceso ocurre en tres fases: en la primera el plástico se calienta hasta la temperatura de mezcla, en la segunda las dos capas de plástico se mezclan a temperatura más o menos constante y, en la tercera, el plástico se calienta hasta la temperatura de soldadura.

Antes de realizar el cálculo de las energías, es necesario conocer el volumen y la masa de plástico a soldar, considerando que se colocan dos capas de material:

$$V = A_r \cdot 2h = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot 2h = \pi \left(\frac{2.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot 2 \cdot 60 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 4.98 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3$$

$$m = \rho \cdot V = 917 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4.98 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3 = 4.57 \cdot 10^{-7} \text{ kg}$$

A continuación, se muestra el cálculo de la energía para cada una de las fases del proceso de soldadura, considerando como temperatura ambiente 23 °C (296.15 K):

$$Q_1 = C_p \cdot m \cdot \Delta T_1 = 1157 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 4.57 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot (377 - 296.15) \text{ K} = 0.043 \text{ J}$$



$$Q_2 = Lf \cdot m = 34120 \frac{J}{kg} \cdot 4.57 \cdot 10^{-7} kg = 0.016 J$$

$$Q_3 = Cp \cdot m \cdot \Delta T_2 = 1157 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 4.57 \cdot 10^{-7} kg \cdot (474 - 377) K = 0.051 J$$

$$E = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0.043 J + 0.016 J + 0.051 J = 0.11 J$$

Una vez obtenida la energía total del proceso **E**, se procede al cálculo de la densidad de energía necesaria para la soldadura:

$$\left(\frac{E}{A_r}\right) = \frac{0.11 J}{\pi \left(\frac{2.3 \cdot 10^{-3} m}{2}\right)^2} = 26475.68 \frac{J}{m^2}$$

Considerando que la mayoría de los termoplásticos, como HDPE, LDPE o PP, con espesores menores a 100  $\mu m$ , tienen una baja absorción de la radiación láser, normalmente más baja del 20 % [4], la densidad de energía que debe aportar el láser para que se produzca la soldadura puede aproximarse como:

$$\left(\frac{E}{A_r}\right) = 26475.68 \frac{J}{m^2} \cdot \frac{1}{0.20} = 132378 \frac{J}{m^2}$$

El valor obtenido sale más bajo que el valor experimental del informe de Coelho [7], esto se debe a que se ha realizado la suposición de que el calor específico **C<sub>p</sub>** no varía con la temperatura. Como se puede observar en el gráfico (Figura 15), esta suposición no es correcta, pero si aproximada. Este cálculo sirve para hacerse una idea del orden de magnitud de la densidad de energía.

Otra de las razones por las cuales el calor real necesario es mayor que el calculado es que, en el cálculo, no se tiene en cuenta que el material circundante de la muestra, aunque poco, también se calienta, debido a la baja conductividad térmica del LDPE. Además, en el estudio de Coelho, se utiliza un láser de 900 W a una velocidad de 2 m s<sup>-1</sup>, lo que provoca una pluma de plasma que absorbe el 30% de la energía.

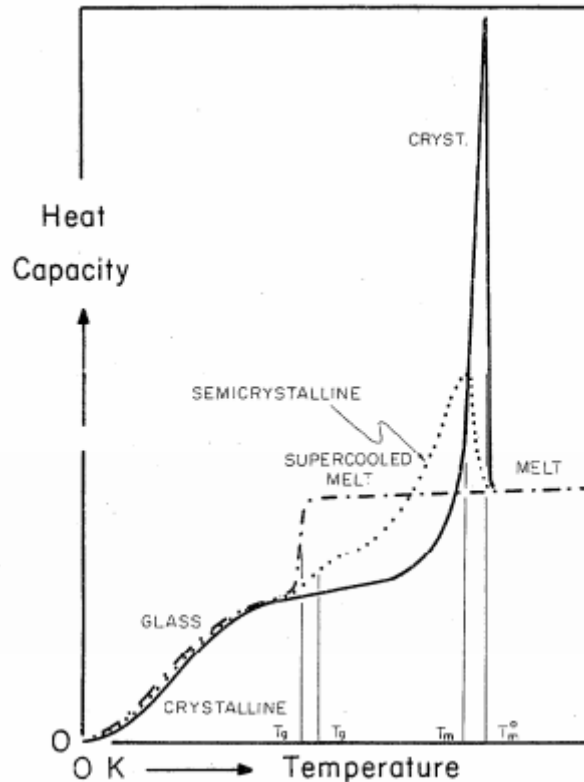


Figura 15 Gráfica de la capacidad calorífica frente a la temperatura para macromoléculas lineales [8]

En el caso de este proyecto, se va a colocar un material reflectante debajo de la muestra, de forma que el haz láser rebote al chocar contra él, y el material pueda absorber parte de esa energía además de la que ya ha absorbido en la primera pasada. El material utilizado con este fin tiene una reflectividad de **R = 89%**.

Se puede estimar cuanto aumentará el porcentaje de absorbancia del plástico al colocar el material reflectante como se muestra a continuación:

$$A = A_0 + (100 - A_0) \cdot \frac{R}{100} \cdot \frac{A_0}{100}$$

siendo **A<sub>0</sub>** el porcentaje de energía absorbida por el plástico sin colocar el material reflectante y **A** el porcentaje de energía absorbida por el plástico al colocar el material reflectante. Se va a suponer que el ensayo se realiza con un láser de longitud de onda de en torno a los 2300 nm y que, por lo tanto, la absorbancia del plástico es de alrededor del 20%.

Teniendo en cuenta todo esto, la densidad de energía que debe aportar el láser para conseguir una buena soldadura es:

$$A = 20 + (100 - 20) \cdot \frac{89}{100} \cdot \frac{20}{100} = 34.24\%$$

$$\left(\frac{E}{A_r}\right) = 26475.68 \frac{J}{m^2} \cdot \frac{1}{0.3424} = 77324 \frac{J}{m^2}$$

Se puede observar que, colocando el material reflectante, la densidad de energía necesaria disminuye, facilitando así el proceso. Esto quiere decir que, la potencia del láser necesaria para realizar la soldadura también disminuye.

Considerando que el objetivo de este proyecto es realizar la soldadura a una velocidad de  $100 \text{ mm s}^{-1}$  y con un diámetro del spot de  $2.3 \text{ mm}$ , se puede calcular dicha potencia con la Ec. (17) del apartado anterior.

$$\left(\frac{E}{A_r}\right) = \frac{4P}{\pi \cdot v_x \cdot d}$$

$$P = \frac{\pi \cdot v_x \cdot d}{4} \cdot \left(\frac{E}{A}\right)_0 = \frac{\pi \cdot 100 \cdot 10^{-3} \frac{m}{s} \cdot 2.3 \cdot 10^{-3} m}{4} \cdot 77324 \frac{J}{m^2} = 14 \text{ W}$$

Este cálculo aproximado nos muestra la posibilidad de realizar buenas soldaduras con una baja potencia del láser, lo que se tratará de demostrar realizando los ensayos experimentales descritos más adelante.

## 5.2. Material necesario

En este apartado se van a describir todos los aparatos y sistemas necesarios para realizar los ensayos de soldadura por láser.

### 5.2.1. Mesa X-Y

El movimiento del láser para realizar la soldadura se hará mediante una mesa x-y (Figura 16), que se compone de controlador DSP (Figura 17), controlador de motor (Figura 18) y partes mecánicas que hacen posible el movimiento: ejes, guías, rodamientos, servomotor, soportes.

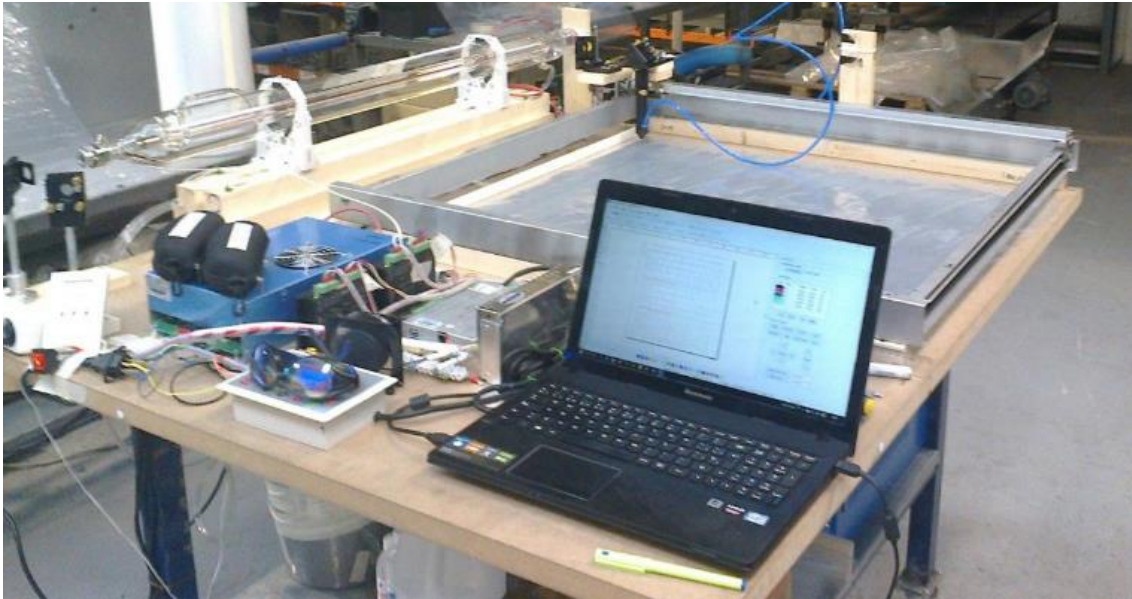


Figura 16 Sistema de mesa x-y para soldadura por láser

El controlador DSP es un dispositivo que se encarga de controlar, por ordenador, una máquina láser de CNC con posibilidad de realizar varias tareas de mecanizado. Este sistema se compone de un panel de control, un sistema de control y un software compatible.



Figura 17 Controlador DSP AWC680

El controlador de motor es una unidad de control electrónico encargada de administrar varios de los parámetros del motor. Este dispositivo permite controlar la velocidad del motor de manera que se produzcan las condiciones mínimas de ruido y vibración.



Figura 18 Controlador Power Step PSD5042-2P

Para realizar las soldaduras, se hará un diseño de la geometría deseada mediante el programa LaserCAD, este diseño será transferido a la máquina controladora, que es la responsable de interpretar este código para controlar el láser que soldará el film. Los ejes de la máquina son movidos por tornillos, cremalleras o correas que son impulsados por los motores servo o motores paso a paso. Las señales de la máquina controladora son amplificadas por los Drives, que harán funcionar los motores.

### 5.2.2. Programa de soldadura LaserCAD V7.40B

Este programa permite realizar todo tipo de geometrías para trasladarlas al movimiento del láser que, gracias a la mesa x-y, podrá reproducir dichas geometrías sobre el plástico. Las geometrías se pueden dibujar en el espacio de trabajo (Figura 19) o pueden ser importadas en varios formatos.

Además de esto, el programa permite manejar parámetros del láser y de la mesa x-y. Se pueden modificar, mediante el panel de control (Figura 20), la velocidad de desplazamiento, la potencia y el modo del láser.

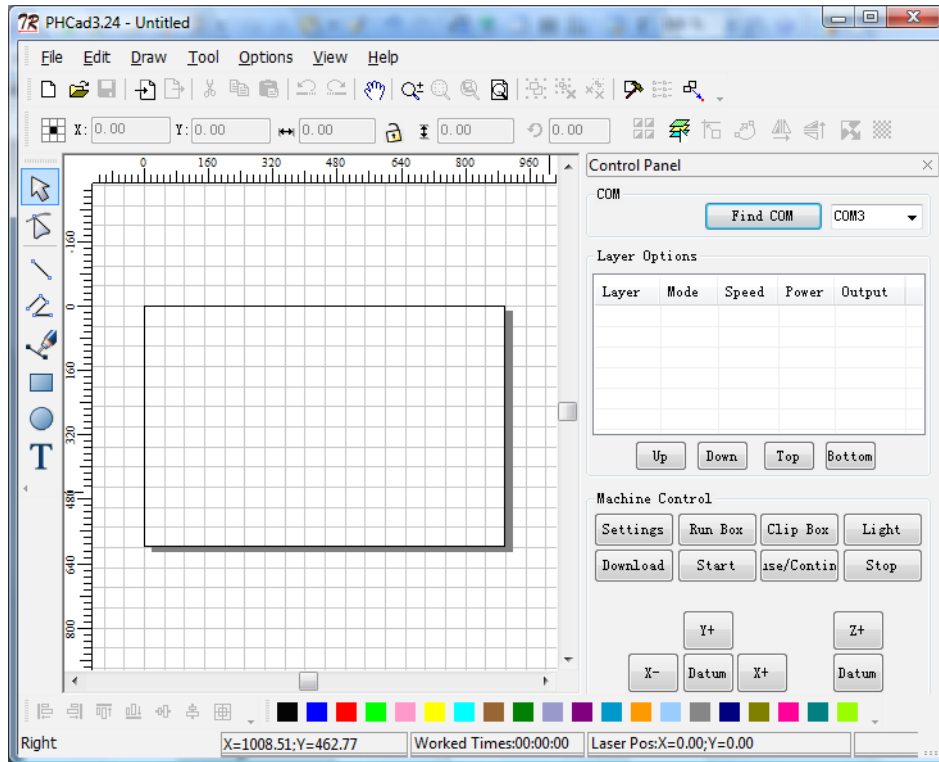


Figura 19 Espacio de trabajo del LaserCAD

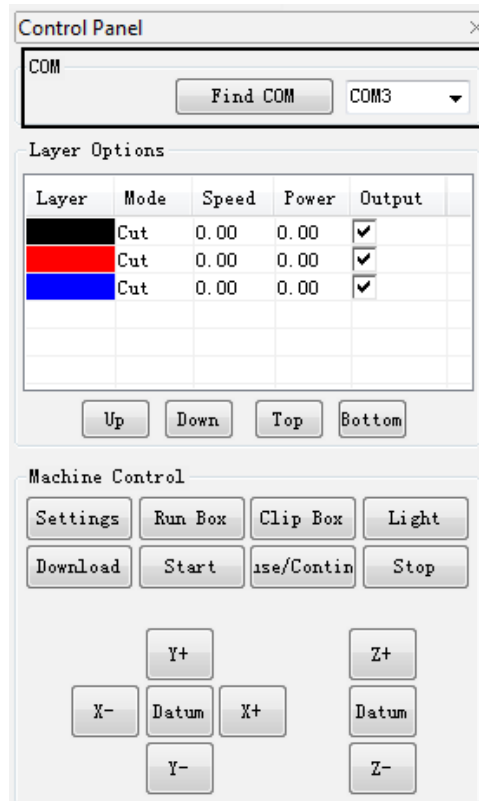


Figura 20 Panel de control del LaserCAD

### 5.2.3. Dinamómetro

El dinamómetro es un aparato capaz de medir la fuerza de tracción ejercida al estirar el plástico. Está provisto de un dispositivo de montaje para un puesto de prueba de fuerza y se utilizará en el ensayo de resistencia de la soldadura.

El modelo seleccionado para los ensayos es un dinamómetro PCE-FM50 (Figura 21).



Figura 21 Dinamómetro PCE-FM50

En la tabla 3 se muestran las especificaciones técnicas del dinamómetro escogido:

Tabla 3 Especificaciones técnicas dinamómetro PCE-FM50

Especificaciones técnicas	
<b>Modelo de dinamómetro</b>	PCE-FM50
<b>Carga de medición máxima</b>	5 kg / 49 N
<b>Resolución</b>	1 g / 0,01 N
<b>Precisión</b>	± 0,4 %, + 1 dgt.
<b>Unidades de medición</b>	gramo / Newton
<b>Sobrecarga máxima</b>	7,5 kg
<b>Puerto de conexión</b>	RS-232
<b>Software y cable de datos</b>	opcional



## 5.2.4. Sistema mecánico de ensayo de tracción

Para comprobar la resistencia de las soldaduras al realizar los ensayos, es necesario hacer una prueba de tracción con el plástico soldado. Para ello se va a diseñar un sistema mecánico que sea capaz de traccionar el film uniformemente en la dirección perpendicular a la soldadura, para probar su resistencia. A continuación, se muestra el primer esquema del sistema (Figura 22) realizado en la fase preliminar del diseño.

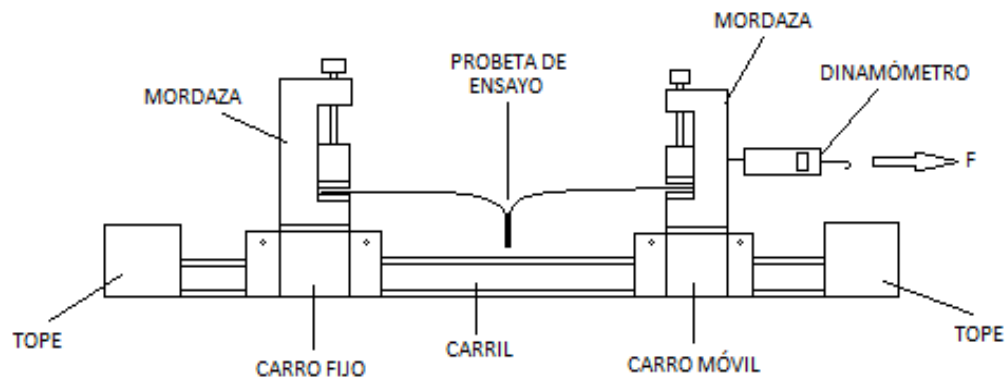


Figura 22 Esquema del sistema mecánico para en ensayo de tracción

El sistema consiste en un carril con dos carros HIWIN (Figura 23), uno fijo y otro móvil. Sobre los carros se acoplan unas mordazas de sujeción, como las PCE-SJJ05 (Figura 24), que se encargarán de sujetar el plástico por sus extremos, quedando el cordón de soldadura en un punto medio entre los carros. Se coloca el dinamómetro en el carro móvil para medir la fuerza con la que se tira del plástico y dos tope para evitar que los carros se desacoplen del carril.



Figura 23 Carril con dos carros HIWIN

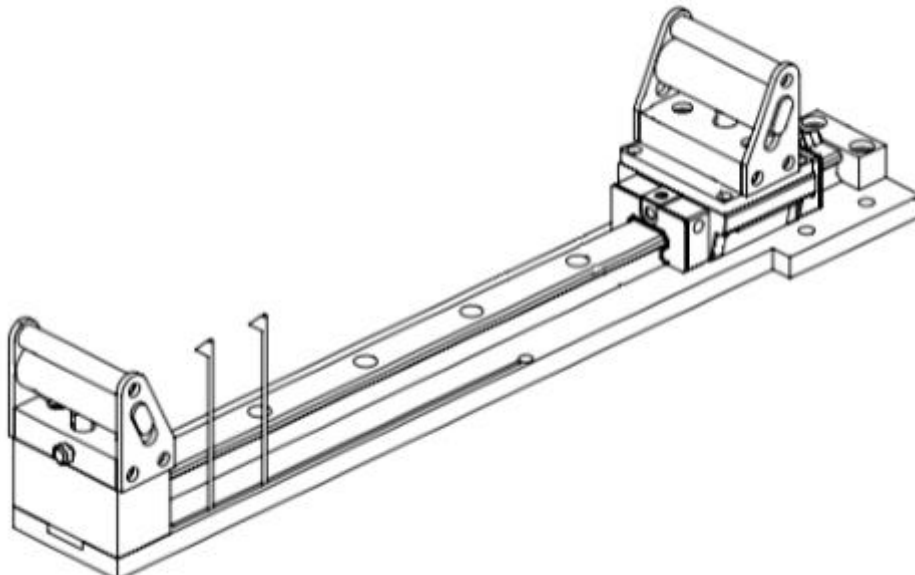


Todo el sistema se coloca en horizontal, para evitar que el peso del carro móvil y la mordaza influya en la medida del dinamómetro.



**Figura 24** Mordaza de sujeción PCE-SJJ05

Tras una etapa de diseño mediante la herramienta SolidWorks, se llega a desarrollar un sistema (figura 25) que da solución al problema planteado, y se procede a su fabricación. En el Anexo I se pueden observar los planos de conjunto y despiece del sistema.



**Figura 25** Sistema de tracción para medir la resistencia del plástico soldado

En el diseño final del sistema, sólo se coloca un carro, en lugar de dos. Una de las mordazas se acopla al tope soporte, que permanece inmóvil, y la otra a una pieza intermedia que, a su vez, está unida al carro móvil.

El carro se desplaza en una sola dirección, esto permite que el plástico sea traccionado por uno de sus lados hasta que se produzca la rotura o la elongación deseada. Tanto el carro como el raíl que lo sostiene son elementos comerciales, elegidos para facilitar el diseño y evitar la necesidad de fabricarlos.

El sistema también cuenta con dos marcadores de posición, que se mueven en la misma dirección del carro, gracias a los cuales se puede medir la elongación del plástico en movimiento.

Por último, el rail va ajustado en un canal de asiento, para evitar vibraciones y desplazamientos en otras direcciones. Este canal se puede anclar a una mesa de trabajo mediante cuatro pernos.

### 5.2.5. Láser diodo

Para realizar los ensayos, es necesario un láser de diodo con una longitud de onda de 1734 nm y una potencia de máxima de 10 W. APS dispone de un láser de diodo de 650 – 1050 nm (figura 26), y va a adquirir un láser de diodo que se ajuste a las necesidades del proyecto.

Dado que el láser tiene un plazo de entrega que excede al plazo para la realización del proyecto, los ensayos se realizarán estimando los valores de resistencia en función de la densidad de energía necesaria calculada. Estos valores podrán compararse, más adelante, con los obtenidos experimentalmente con el nuevo láser de APS.



Figura 26 Láser de 650 - 1050 nm de Laser Components

### 5.3. Procedimiento

En este apartado, se van a realizar diferentes ensayos para determinar las condiciones para una buena soldadura. Los parámetros que van a determinar esas condiciones y que, por lo tanto, consideraremos como variables dentro de estos ensayos, son: velocidad de desplazamiento **v**, potencia del láser **P**, y diámetro del spot **d**. Se realizarán ensayos para cada uno de los materiales descritos en el apartado 3.1.4. de este documento.

En los primeros ensayos (tablas 4 a 8) se varía la velocidad desde 50 hasta 400 mm s<sup>-1</sup>. Para cada velocidad, se va aumentando la potencia desde 5 hasta 10 W, y se mide la resistencia de la unión soldada, traducida a un porcentaje de la resistencia del material sin soldar. En todos los ensayos se mantiene un valor para el diámetro del spot de 2.3 mm.

Se considerará que una soldadura es válida (OK) cuando su resistencia llegue al menos al 80% de la resistencia del material sin soldar, y no válida (NOK) cuando su valor sea menor del 80%.

**Tabla 4 Resistencia a la tensión R, y densidad de energía E/A, para el material A1 y las velocidades (a) 50 mm s<sup>-1</sup>, (b) 100 mm s<sup>-1</sup>, (c) 200 mm s<sup>-1</sup>, (d) 300 mm s<sup>-1</sup>, (e) 400 mm s<sup>-1</sup>.**

(a)

<i>v = 50 mm s<sup>-1</sup></i>		
<i>Material: A1</i>		
<i>P (W)</i>	<i>R (%)</i>	<i>E/A (x10<sup>6</sup> J/m<sup>2</sup>)</i>
<b>5</b>	NOK	0,055
<b>6</b>	NOK	0,066
<b>7</b>	OK	0,078
<b>8</b>	OK	0,089
<b>9</b>	OK	0,100
<b>10</b>	OK	0,111

(b)

$v = 100 \text{ mm s}^{-1}$

Material: A1

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,028
<b>6</b>	NOK	0,033
<b>7</b>	NOK	0,039
<b>8</b>	NOK	0,044
<b>9</b>	NOK	0,050
<b>10</b>	NOK	0,055

(c)

$v = 200 \text{ mm s}^{-1}$

Material: A1

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,014
<b>6</b>	NOK	0,017
<b>7</b>	NOK	0,019
<b>8</b>	NOK	0,022
<b>9</b>	NOK	0,025
<b>10</b>	NOK	0,028

(d)

$v = 300 \text{ mm s}^{-1}$

Material: A1

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,009
<b>6</b>	NOK	0,011
<b>7</b>	NOK	0,013
<b>8</b>	NOK	0,015
<b>9</b>	NOK	0,017
<b>10</b>	NOK	0,018

(e)

---

$v = 400 \text{ mm s}^{-1}$

Material: A1

---

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,007
<b>6</b>	NOK	0,008
<b>7</b>	NOK	0,010
<b>8</b>	NOK	0,011
<b>9</b>	NOK	0,012
<b>10</b>	NOK	0,014

---

Tabla 5 Resistencia a la tensión R, y densidad de energía E/A, para el material B1 y las velocidades (a) 50 mm s<sup>-1</sup>, (b) 100 mm s<sup>-1</sup>, (c) 200 mm s<sup>-1</sup>, (d) 300 mm s<sup>-1</sup>, (e) 400 mm s<sup>-1</sup>.

(a)

---

$v = 50 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B1

---

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	OK	0,055
<b>6</b>	OK	0,066
<b>7</b>	OK	0,078
<b>8</b>	OK	0,089
<b>9</b>	OK	0,100
<b>10</b>	OK	0,111

---

(b)

$v = 100 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B1

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,028
<b>6</b>	OK	0,033
<b>7</b>	OK	0,039
<b>8</b>	OK	0,044
<b>9</b>	OK	0,050
<b>10</b>	OK	0,055

(c)

$v = 200 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B1

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,014
<b>6</b>	NOK	0,017
<b>7</b>	NOK	0,019
<b>8</b>	NOK	0,022
<b>9</b>	NOK	0,025
<b>10</b>	NOK	0,028

(d)

$v = 300 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B1

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,009
<b>6</b>	NOK	0,011
<b>7</b>	NOK	0,013
<b>8</b>	NOK	0,015
<b>9</b>	NOK	0,017
<b>10</b>	NOK	0,018

(e)

---

$v = 400 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B1

---

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,007
<b>6</b>	NOK	0,008
<b>7</b>	NOK	0,010
<b>8</b>	NOK	0,011
<b>9</b>	NOK	0,012
<b>10</b>	NOK	0,014

---

Tabla 6 Resistencia a la tensión  $R$ , y densidad de energía  $E/A$ , para el material B2 y las velocidades (a) 50  $\text{mm s}^{-1}$ , (b) 100  $\text{mm s}^{-1}$ , (c) 200  $\text{mm s}^{-1}$ , (d) 300  $\text{mm s}^{-1}$ , (e) 400  $\text{mm s}^{-1}$ .

(a)

---

$v = 50 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B2

---

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,055
<b>6</b>	NOK	0,066
<b>7</b>	OK	0,078
<b>8</b>	OK	0,089
<b>9</b>	OK	0,100
<b>10</b>	OK	0,111

---

(b)

$$v = 100 \text{ mm s}^{-1}$$

Material: B2

<i>P (W)</i>	<i>R (%)</i>	<i>E/A (x10<sup>6</sup> J/m<sup>2</sup>)</i>
<b>5</b>	NOK	0,028
<b>6</b>	NOK	0,033
<b>7</b>	NOK	0,039
<b>8</b>	NOK	0,044
<b>9</b>	NOK	0,050
<b>10</b>	NOK	0,055

(c)

$$v = 200 \text{ mm s}^{-1}$$

Material: B2

<i>P (W)</i>	<i>R (%)</i>	<i>E/A (x10<sup>6</sup> J/m<sup>2</sup>)</i>
<b>5</b>	NOK	0,014
<b>6</b>	NOK	0,017
<b>7</b>	NOK	0,019
<b>8</b>	NOK	0,022
<b>9</b>	NOK	0,025
<b>10</b>	NOK	0,028

(d)

$$v = 300 \text{ mm s}^{-1}$$

Material: B2

<i>P (W)</i>	<i>R (%)</i>	<i>E/A (x10<sup>6</sup> J/m<sup>2</sup>)</i>
<b>5</b>	NOK	0,009
<b>6</b>	NOK	0,011
<b>7</b>	NOK	0,013
<b>8</b>	NOK	0,015
<b>9</b>	NOK	0,017
<b>10</b>	NOK	0,018



(e)

---

$v = 400 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B2

---

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,007
<b>6</b>	NOK	0,008
<b>7</b>	NOK	0,010
<b>8</b>	NOK	0,011
<b>9</b>	NOK	0,012
<b>10</b>	NOK	0,014

---

Tabla 7 Resistencia a la tensión  $R$ , y densidad de energía  $E/A$ , para el material B3 y las velocidades (a) 50  $\text{mm s}^{-1}$ , (b) 100  $\text{mm s}^{-1}$ , (c) 200  $\text{mm s}^{-1}$ , (d) 300  $\text{mm s}^{-1}$ , (e) 400  $\text{mm s}^{-1}$ .

(a)

---

$v = 50 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B3

---

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,055
<b>6</b>	NOK	0,066
<b>7</b>	NOK	0,078
<b>8</b>	NOK	0,089
<b>9</b>	OK	0,100
<b>10</b>	OK	0,111

---

(b)

$v = 100 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B3

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,028
<b>6</b>	NOK	0,033
<b>7</b>	NOK	0,039
<b>8</b>	NOK	0,044
<b>9</b>	NOK	0,050
<b>10</b>	NOK	0,055

(c)

$v = 200 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B3

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,014
<b>6</b>	NOK	0,017
<b>7</b>	NOK	0,019
<b>8</b>	NOK	0,022
<b>9</b>	NOK	0,025
<b>10</b>	NOK	0,028

(d)

$v = 300 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B3

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,009
<b>6</b>	NOK	0,011
<b>7</b>	NOK	0,013
<b>8</b>	NOK	0,015
<b>9</b>	NOK	0,017
<b>10</b>	NOK	0,018

(e)

---

$v = 400 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B3

---

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,007
<b>6</b>	NOK	0,008
<b>7</b>	NOK	0,010
<b>8</b>	NOK	0,011
<b>9</b>	NOK	0,012
<b>10</b>	NOK	0,014

---

Tabla 8 Resistencia a la tensión  $R$ , y densidad de energía  $E/A$ , para el material B4 y las velocidades (a) 50  $\text{mm s}^{-1}$ , (b) 100  $\text{mm s}^{-1}$ , (c) 200  $\text{mm s}^{-1}$ , (d) 300  $\text{mm s}^{-1}$ , (e) 400  $\text{mm s}^{-1}$ .

(a)

---

$v = 50 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B4

---

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,055
<b>6</b>	NOK	0,066
<b>7</b>	NOK	0,078
<b>8</b>	OK	0,089
<b>9</b>	OK	0,100
<b>10</b>	OK	0,111

---

(b)

$v = 100 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B4

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,028
<b>6</b>	NOK	0,033
<b>7</b>	NOK	0,039
<b>8</b>	NOK	0,044
<b>9</b>	NOK	0,050
<b>10</b>	NOK	0,055

(c)

$v = 200 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B4

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,014
<b>6</b>	NOK	0,017
<b>7</b>	NOK	0,019
<b>8</b>	NOK	0,022
<b>9</b>	NOK	0,025
<b>10</b>	NOK	0,028

(d)

$v = 300 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B4

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x10}^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,009
<b>6</b>	NOK	0,011
<b>7</b>	NOK	0,013
<b>8</b>	NOK	0,015
<b>9</b>	NOK	0,017
<b>10</b>	NOK	0,018

(e)

---

$v = 400 \text{ mm s}^{-1}$

Material: B4

---

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x}10^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,007
<b>6</b>	NOK	0,008
<b>7</b>	NOK	0,010
<b>8</b>	NOK	0,011
<b>9</b>	NOK	0,012
<b>10</b>	NOK	0,014

---

Con el objetivo de comprobar el valor óptimo del diámetro del spot, para trabajar en unas condiciones determinadas, se va a realizar otro ensayo. En este ensayo (tabla 9) se varía el diámetro del spot desde 1.5 hasta 2.7 mm. Para cada valor del diámetro del spot, se varía la potencia desde 5 hasta 10 W, y se mide la resistencia de la unión soldada, traducida a un porcentaje de la resistencia del material sin soldar. Todas las soldaduras se realizan a una velocidad de  $100 \text{ mm s}^{-1}$ . El material con el que se realizará este ensayo es el A1.

Se considerará que una soldadura es válida (OK) cuando su resistencia llegue al menos al 80% de la resistencia del material sin soldar, y no válida (NOK) cuando su valor sea menor del 80%.

Tabla 9 Resistencia a la tensión  $R$ , y densidad de energía  $E/A$ , para una velocidad de  $100 \text{ mm s}^{-1}$  y un diámetro de spot de (a) 1.5 mm, (b) 2 mm, (c) 2.3 mm, (d) 2.5 mm, (e) 2.7 mm.

(a)

---

$d = 1.5 \text{ mm}$

---

$P \text{ (W)}$	$R \text{ (\%)}$	$E/A \text{ (x}10^6 \text{ J/m}^2\text{)}$
<b>5</b>	NOK	0,042
<b>6</b>	NOK	0,051
<b>7</b>	NOK	0,059
<b>8</b>	NOK	0,068
<b>9</b>	OK	0,076
<b>10</b>	OK	0,085

---

(b)

<i>d = 2 mm</i>		
<i>P (W)</i>	<i>R (%)</i>	<i>E/A (x10<sup>6</sup> J/m<sup>2</sup>)</i>
<b>5</b>	NOK	0,032
<b>6</b>	NOK	0,038
<b>7</b>	NOK	0,045
<b>8</b>	NOK	0,051
<b>9</b>	NOK	0,057
<b>10</b>	NOK	0,064

(c)

<i>d = 2.3 mm</i>		
<i>P (W)</i>	<i>R (%)</i>	<i>E/A (x10<sup>6</sup> J/m<sup>2</sup>)</i>
<b>5</b>	NOK	0,028
<b>6</b>	NOK	0,033
<b>7</b>	NOK	0,039
<b>8</b>	NOK	0,044
<b>9</b>	NOK	0,050
<b>10</b>	NOK	0,055

(d)

<i>d = 2.5 mm</i>		
<i>P (W)</i>	<i>R (%)</i>	<i>E/A (x10<sup>6</sup> J/m<sup>2</sup>)</i>
<b>5</b>	NOK	0,025
<b>6</b>	NOK	0,031
<b>7</b>	NOK	0,036
<b>8</b>	NOK	0,041
<b>9</b>	NOK	0,046
<b>10</b>	NOK	0,051

(e)

<i>d = 2.7 mm</i>		
<i>P (W)</i>	<i>R (%)</i>	<i>E/A (x10<sup>6</sup> J/m<sup>2</sup>)</i>
<b>5</b>	NOK	0,024
<b>6</b>	NOK	0,028
<b>7</b>	NOK	0,033
<b>8</b>	NOK	0,038
<b>9</b>	NOK	0,042
<b>10</b>	NOK	0,047

## 6. Resultados experimentales

Para realizar la medida de la resistencia del plástico soldado, se utilizará un dinamómetro, que cuantificará la fuerza realizada al estirar el plástico, y un sistema mecánico de tracción.

Se considerará una buena soldadura aquella que sea capaz de resistir una elongación del plástico del 200%. Para medir esta elongación, se realizarán dos marcas en el plástico antes de traccionarlo, a una distancia entre ellas de 10 mm, y se procederá con el ensayo. Al estirar el plástico, las marcas se desplazarán en la dirección de la fuerza y se separarán, hasta una distancia que equivale al 200% de elongación.

Para saber cuál es esa distancia, se aplica la fórmula de la elongación:

$$e = \frac{l_f - l_0}{l_0} \rightarrow l_f = e \cdot l_0 + l_0$$

siendo **e** la elongación, **l<sub>0</sub>** la longitud inicial y **l<sub>f</sub>** la longitud final. Sustituyendo los datos conocidos queda:

$$l_f = \frac{200}{100} \cdot 10 \text{ mm} + 10 \text{ mm} = 30 \text{ mm}$$

Por lo tanto, cuando las marcas estén separadas 30 mm, se habrá producido una elongación del 200% y, si la soldadura no ha sufrido daños, se considerará aceptable.

Se sabe, por ensayos previos realizados por APS, que con un láser de CO<sub>2</sub>, que absorbe en la superficie del film, con el 20% de 80 W, a 160 mm s<sup>-1</sup> y un diámetro de spot de 2,3 mm, la soldadura es buena. Estos parámetros dan una densidad de energía de 0,05522 x10<sup>6</sup> J/m<sup>2</sup>.

La absorción a una longitud de onda de 1734 nm se realiza en todo el volumen del plástico, no solo en su superficie. No se sabe con seguridad, pero es probable que esto disminuya la necesidad de potencia en un 20%. Por lo tanto, con esta longitud de onda, la soldadura será válida para todos los valores de densidad de energía por encima de 0,04417 x10<sup>6</sup> J/m<sup>2</sup>.

A continuación, se puede observar una estimación de los valores de densidad de energía necesarios (tabla 10) para realizar una buena soldadura, teniendo en cuenta la absorbancia de cada material a una longitud de onda de 1734 nm. Se ha de tener en cuenta que, la absorbancia del film para el CO<sub>2</sub> es aproximadamente de un 13% y, por lo tanto, la densidad de energía necesaria para cada material será distinta.

Tabla 10 Valores de densidad de energía necesaria para una buena soldadura en los distintos materiales

<i>Absorbancias medidas en el ensayo a 1734 nm</i>		<i>Absorbancia del film para el CO2 aprox. del 13%</i>	
<i>Material</i>	<i>Abs (%)</i>	<i>Relación de absorbancias respecto a la del CO2</i>	<i>E/A (x10<sup>6</sup> J/m<sup>2</sup>)</i>
<b>A1</b>	7,18%	55,23%	0,0797
<b>B1</b>	17,48%	134,46%	0,0327
<b>B2</b>	7,63%	58,69%	0,0750
<b>B3</b>	5,50%	42,31%	0,1040
<b>B4</b>	6,28%	48,31%	0,0911

Con estos valores, podemos suponer que todas las soldaduras realizadas con una densidad de energía inferior a las de la tabla para cada material, no serán válidas.

Observando las tablas de ensayos, se puede ver que la mayoría de las soldaduras para velocidades mayores a 100 mm s<sup>-1</sup> no son válidas, esto se debe a que la densidad de energía aportada por el láser a esas velocidades no es la suficiente, sería necesario realizar ensayos a menores velocidades para obtener más datos positivos y compararlos con los estimados.

Además de esto, también se puede establecer una relación entre el espesor del material y la densidad de energía necesaria para soldarlo. En la tabla 11 se pueden ver los valores de espesor y densidad de energía para los distintos materiales y, en la figura 27, se observa la relación entre dichos valores.



Tabla 11 Valores de densidad de energía para distintos espesores

Material	Espesor ( $\times 10^{-6}$ m)	E/A ( $\times 10^6$ J/m <sup>2</sup> )
<b>B3</b>	25	0,1040
<b>B4</b>	50	0,0911
<b>A1</b>	60	0,0797
<b>B2</b>	60	0,0750
<b>B1</b>	70	0,0327

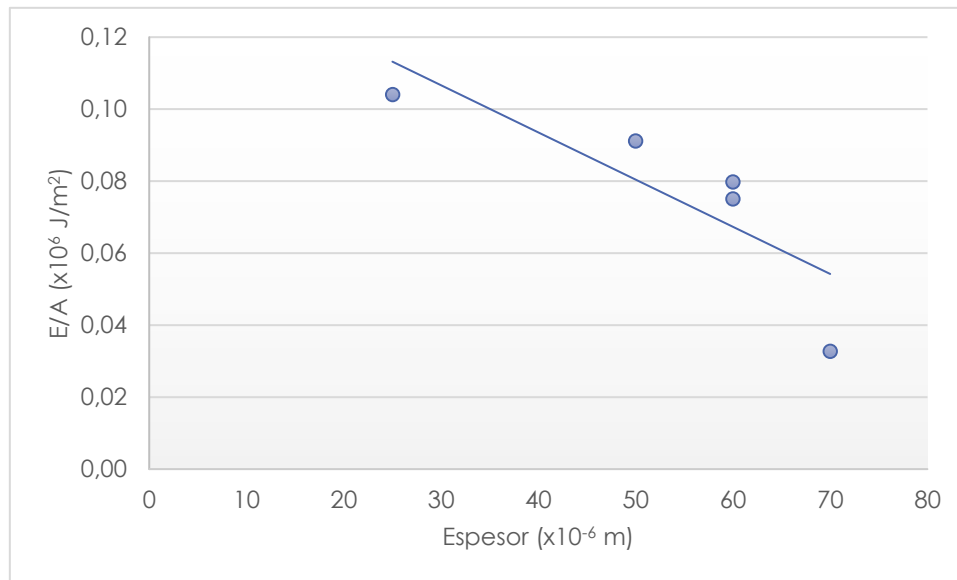


Figura 27 Espesor del material frente a densidad de energía

Como puede verse en la gráfica, la densidad de energía necesaria para soldar el material disminuye con el espesor, al contrario de lo que pasaba en el informe de Coelho. Esto se debe a que cada espesor hace referencia a un material distinto y, aunque la composición de todos los materiales tenga de base el LDPE, su absorbanza es distinta.

La absorbanza de un material depende de su espesor, cuanto menor es el espesor menor es la absorbanza y, a su vez, a menor absorbanza más densidad de energía es necesaria para soldar el material. Al tener en cuenta los tres parámetros en la misma gráfica, nos sale una curva descendente, que nos dice que la absorbanza del material juega un papel muy relevante en la soldadura por láser.

## 7. Conclusiones

---

De los ensayos realizados, se puede concluir que es posible realizar una buena soldadura con una baja potencia de láser, siempre y cuando la absorbancia del material para la longitud de onda del láser escogido sea la adecuada.

Es posible realizar buenas soldaduras con potencias de en torno a 10 W con un láser de longitud de onda de 1734 nm a velocidades menores de 100 mm s<sup>-1</sup>, para todos los materiales considerados.

Se ha comprobado que la absorbancia del material es un factor muy importante para la soldadura por láser y, por tanto, la longitud de onda del láser es un parámetro esencial para conseguir la soldadura deseada.

Otra observación interesante es el uso de aditivos para aumentar la absorbancia del material B1, que tiene un acabado blanco, lo que aumenta su capacidad de absorción y consigue que la densidad de energía necesaria para soldarlo sea considerablemente inferior a la de los demás materiales.

Por último, se recomienda la realización de ensayos posteriores para verificar los resultados de este proyecto y conseguir datos más precisos para optimizar el proceso. Se puede realizar un ensayo a velocidades más bajas, en el rango de 10 – 50 mm s<sup>-1</sup>, que permita obtener unos resultados más positivos y extraer más información. Además de este ensayo, se puede realizar una prueba con distintos espesores de un mismo material, para verificar que el espesor también juega un papel importante en la soldadura por láser.

Otro concepto interesante para aplicar en el proyecto es el desarrollo del sistema mecánico de tracción como un quinto módulo de la máquina, que sirva para comprobar la resistencia de las soldaduras de cara a realizar un control de calidad. Para ello, el diseño planteado en este documento serviría de primer boceto para la realización de ese módulo, necesitando una fase de diseño más desarrollada para optimizar el sistema.

Sería recomendable que el sistema pudiera medir la resistencia de forma exacta, para poder compararla con la resistencia del material sin soldar. Para ello es necesario medir tanto la fuerza aplicada como la elongación que sufre el material. Esto es posible gracias al dinamómetro y los marcadores del diseño, que podrían optimizarse para obtener una medida exacta.

Además, se podría diseñar un sencillo sistema con una polea y unos pesos para ejercer siempre la misma fuerza sobre el material y facilitar así la comparativa entre los resultados obtenidos de varias pruebas.

## 8. Referencias

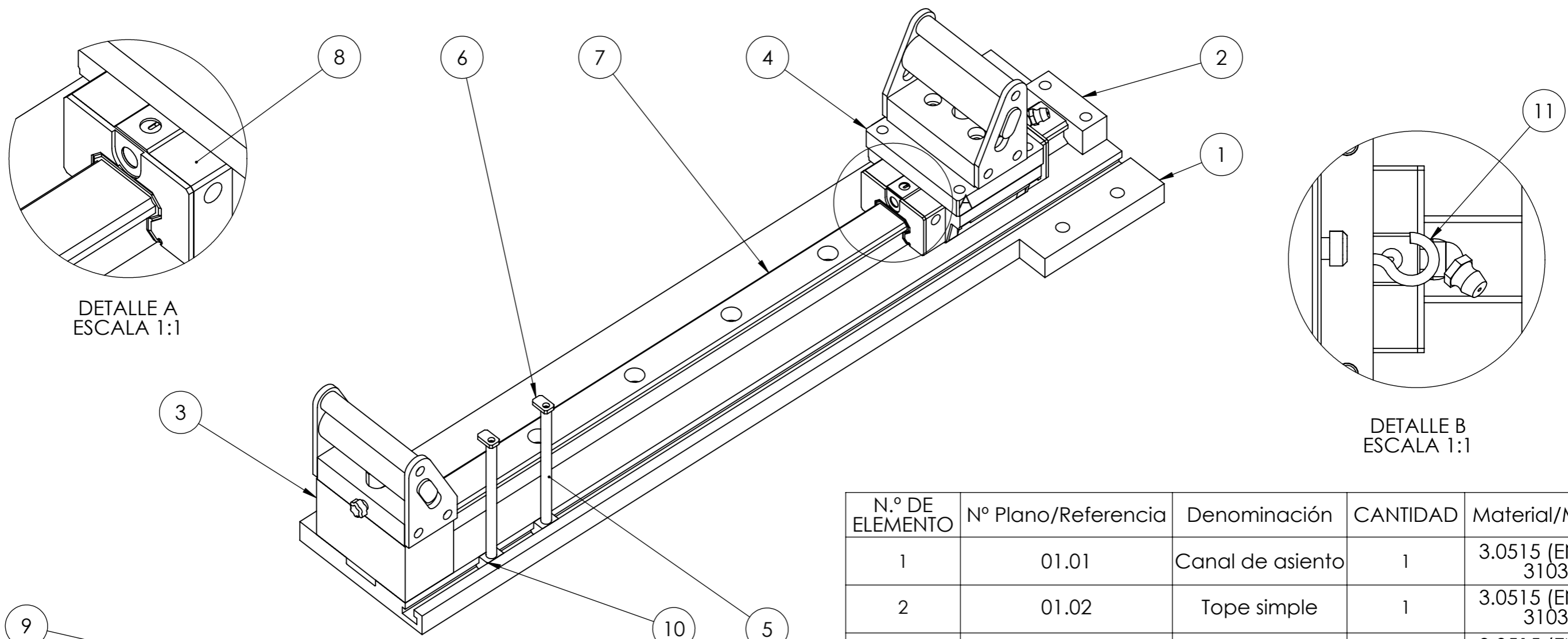
---

- [1] Enrique Giménez Torres, "Desarrollo y caracterización de sistemas de alta barrera basados en un copolímero de etileno y alcohol vinílico (EVOH) para su aplicación en estructuras multicapa termoconformadas en la industria del envasado", Castellón, marzo de 2001.
- [2] E.Paul Degarmo, J.T Black, Ronald A Kohser, "Materials and processes in manufacturing", Prentice Hall, India, 2003.
- [3] Rolf Klein, "Laser Welding of Plastics", Germany, 2012.
- [4] Joao M. P. Coelho, Manuel A. Abreu, F. Carvalho Rodrigues, "Thermal modeling CO2 laser radiation transmission welding of superposed thermoplastic films", Portugal, 2003.
- [5] E. Ukar, S. Martinez, A. Lamikiz, I. Tabernero, "Modelo térmico láser con transformaciones intermedias en calentamiento", País Vasco, 2010.
- [6] Joao M. P. Coelho, Manuel A. Abreu, F. Carvalho Rodrigues, "Methodologies for determining thermoplastic films optical parameters at 10.6  $\mu\text{m}$  laser wavelength", Portugal, 2003.
- [7] J.P. Coelho, M.A. Abreu, M.C. Pires, "High-speed laser welding of plastic films", Lisboa, Portugal, 2000.
- [8] Umesh Gaur, Bernhard Wunderlich, "Heat capacity and other thermodynamic properties of linear macromolecules", J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 10, No. 1, 1981.

## 9. Anexo

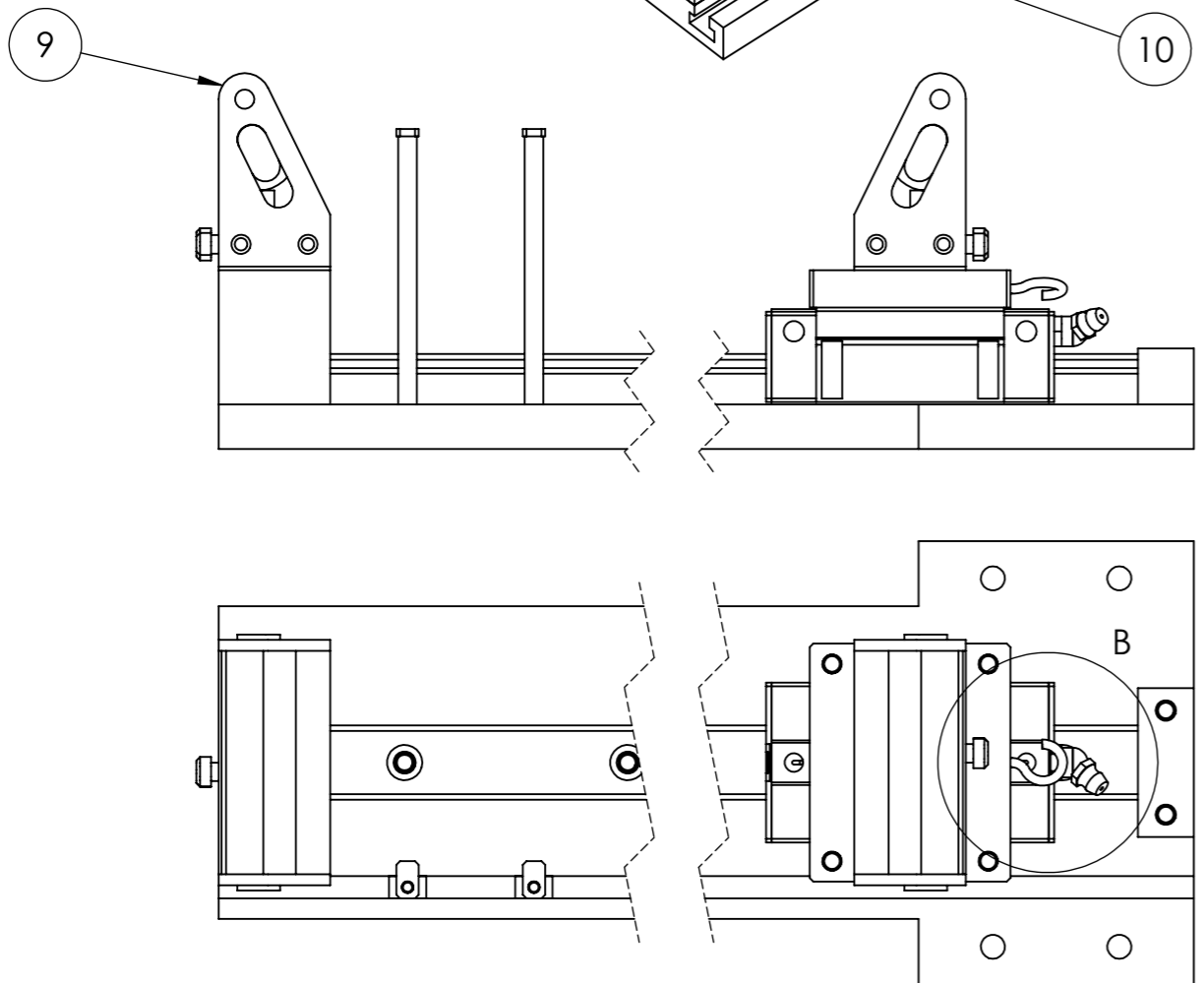
---

En este apartado, se muestran los planos del diseño del Sistema mecánico de tracción, además de los catálogos de los productos comerciales adquiridos para su montaje.



DETALLE A  
ESCALA 1:1

DETALLE B  
ESCALA 1:1

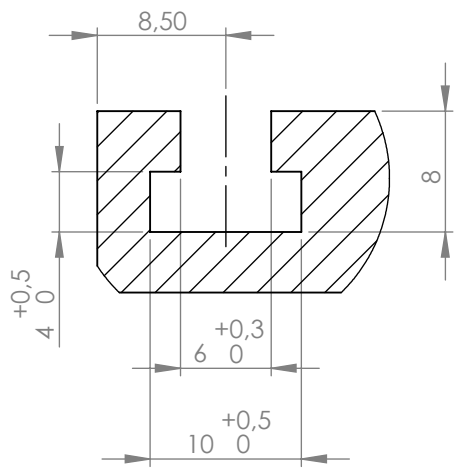


N.º DE ELEMENTO	Nº Plano/Referencia	Denominación	CANTIDAD	Material/Marca
1	01.01	Canal de asiento	1	3.0515 (EN-AW 3103)
2	01.02	Tope simple	1	3.0515 (EN-AW 3103)
3	01.03	Tope soporte	1	3.0515 (EN-AW 3103)
4	01.04	Placa soporte	1	3.0515 (EN-AW 3103)
5	01.05	Marcador	2	3.0515 (EN-AW 3103)
6	01.06	Placa	2	3.0515 (EN-AW 3103)
7	HGR20R400C	Rail	1	HIWIN
8	HGW20CCZ0	Block	1	HIWIN
9	SJJ05	Mordaza	2	PCE
10	DIN 508-6-8	Tuerca en T	2	ELESA+GANter
11	A2/211321-2,5X10	Gancho	1	BÉNÉ INOX

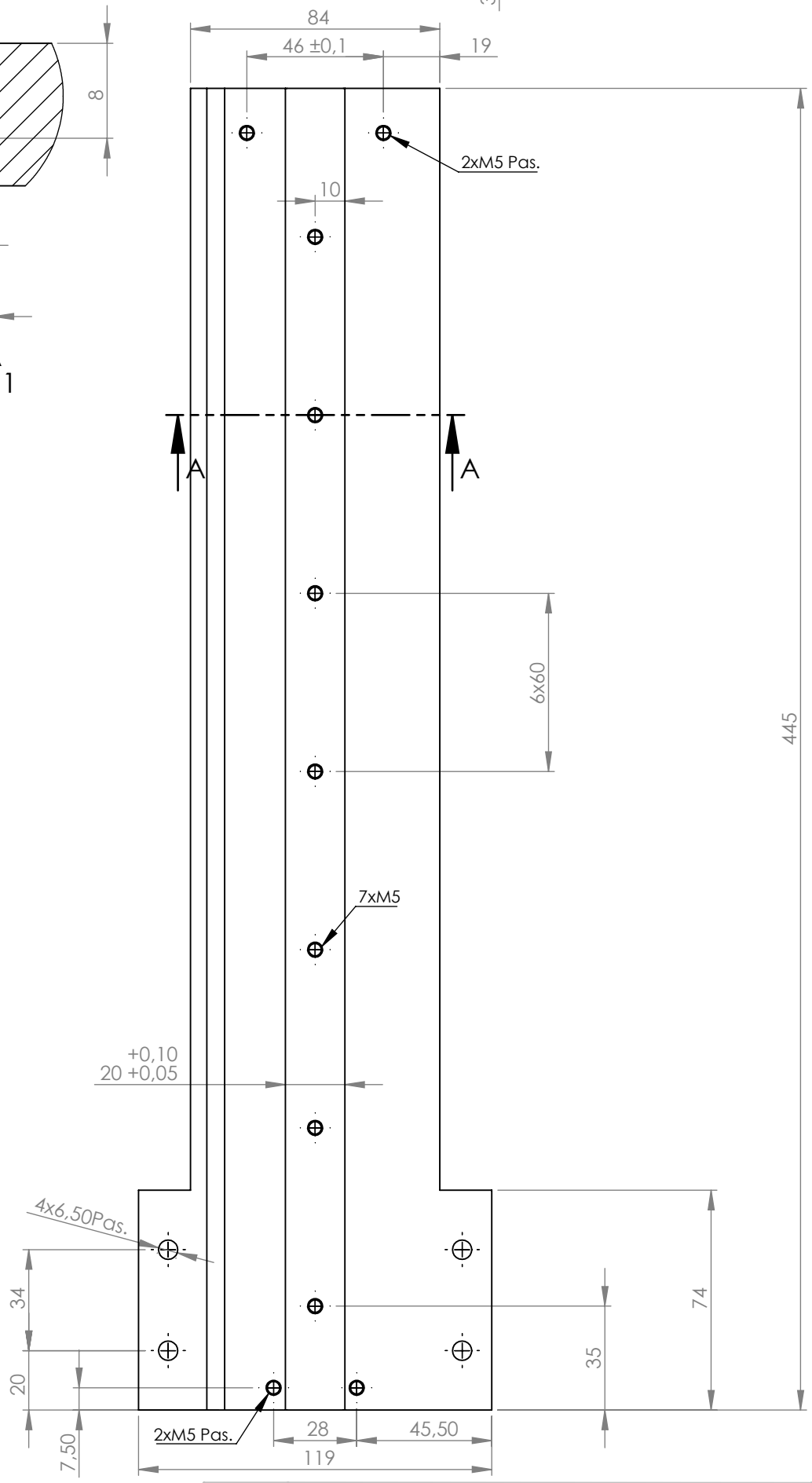
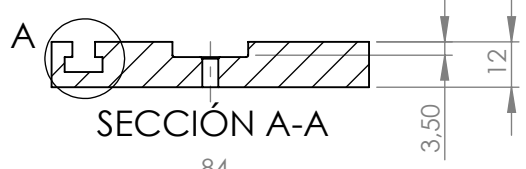
**APS**

Denominación: Sistema Mecánico de Tracción A3

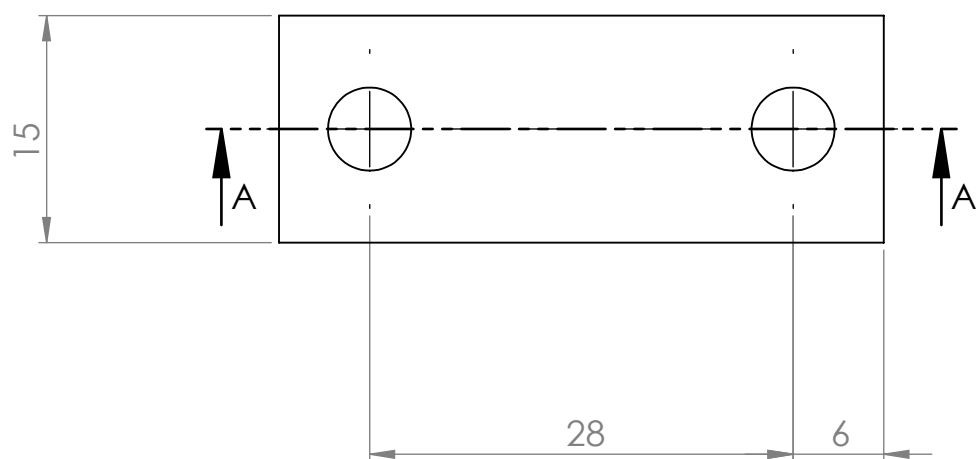
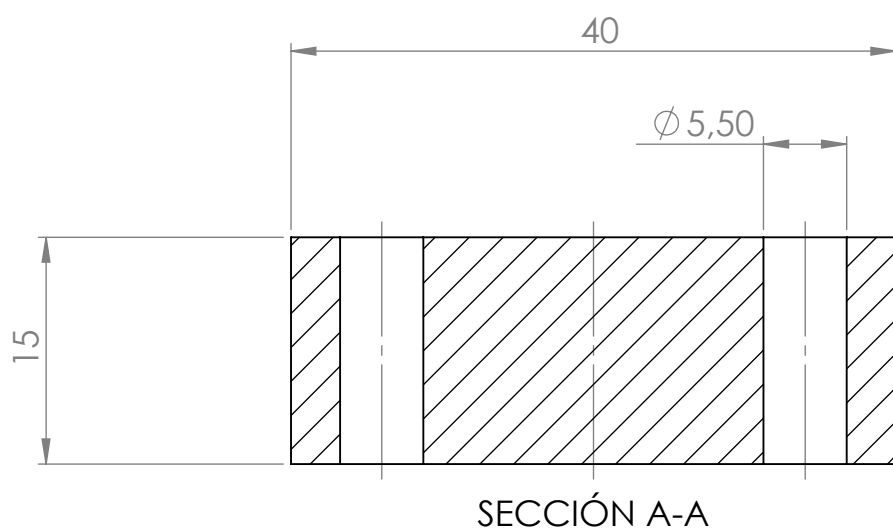
Escala 1:2 Fecha: 23/06/2017 Autor: Josu Salinas López Nº Plano: 1



DETALLE A  
ESCALA 2 : 1



APS	Denominación:	CANAL DE ASIENTO	A4
	Escala 1:2	Fecha: 23/06/2017	Autor: Josu Salinas López N° Plano: 01.01

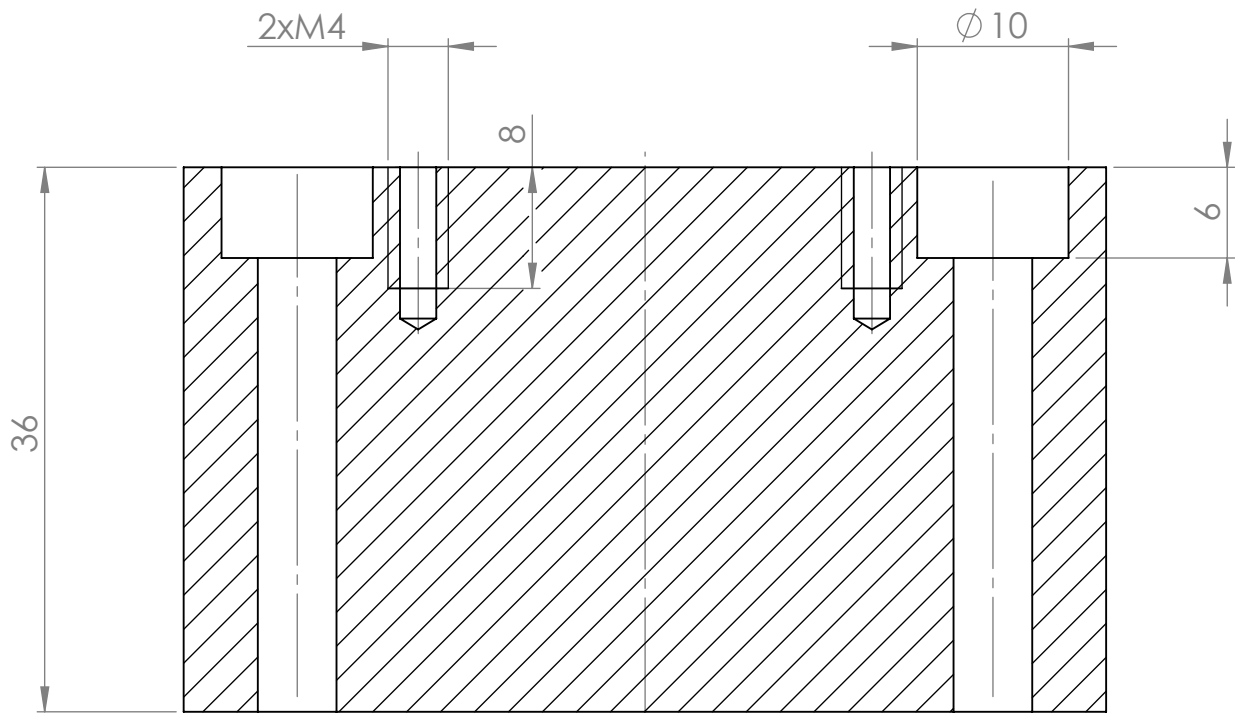


APS

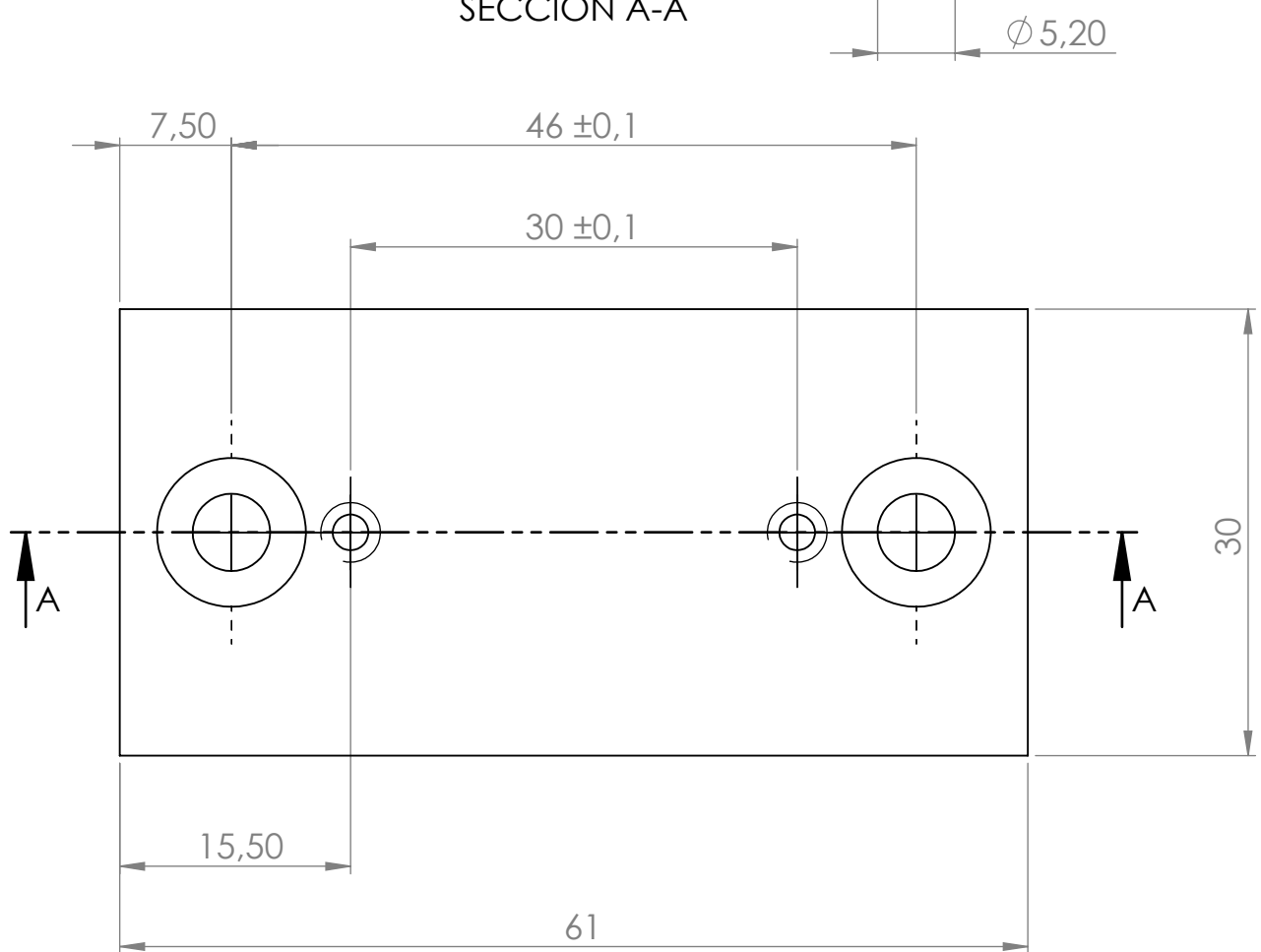
Denominación: TOPE SIMPLE

A4

Escala 2:1 Fecha: 23/06/2017 Autor: Josu Salinas López N° Plano: 01.02



SECCIÓN A-A

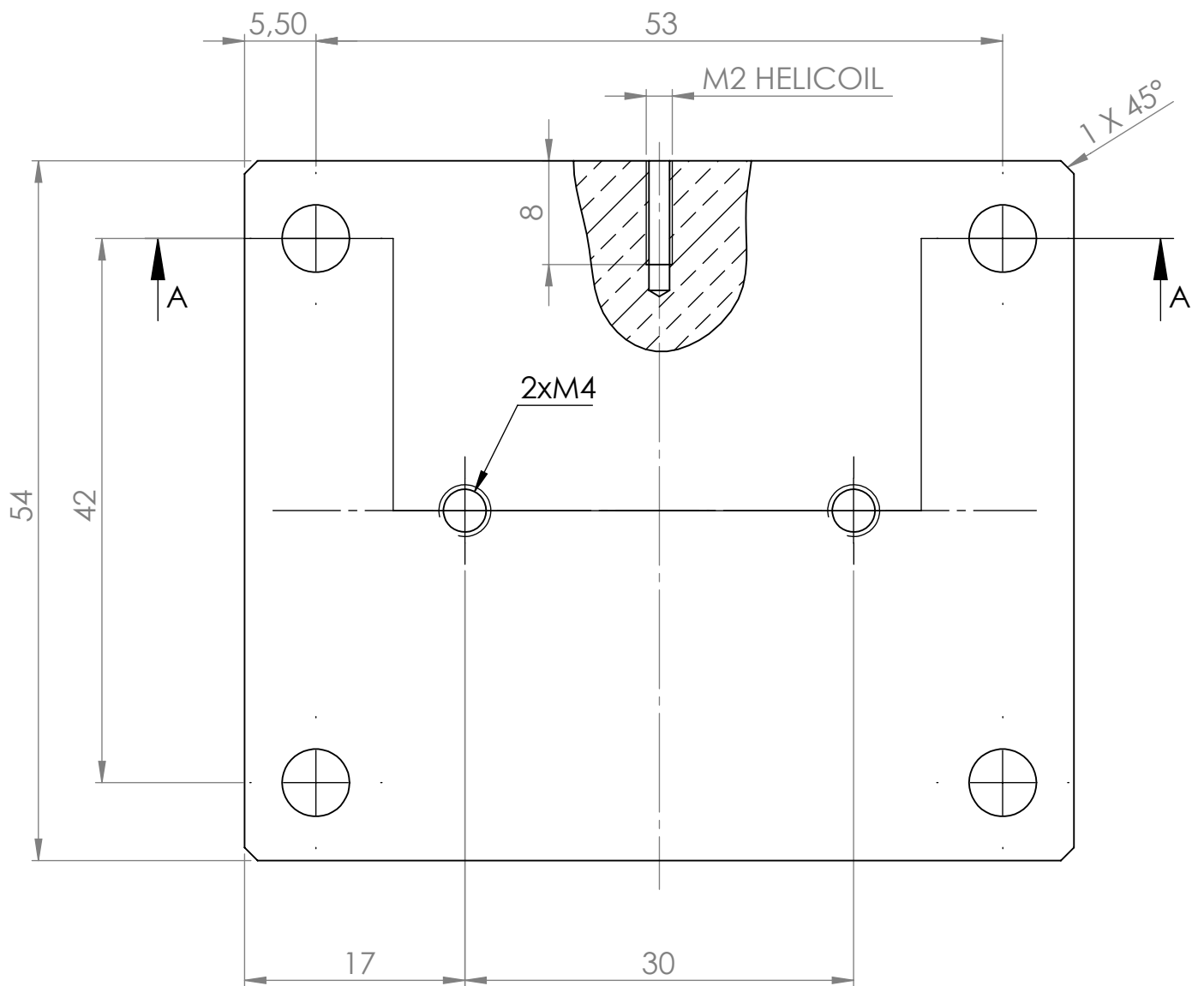
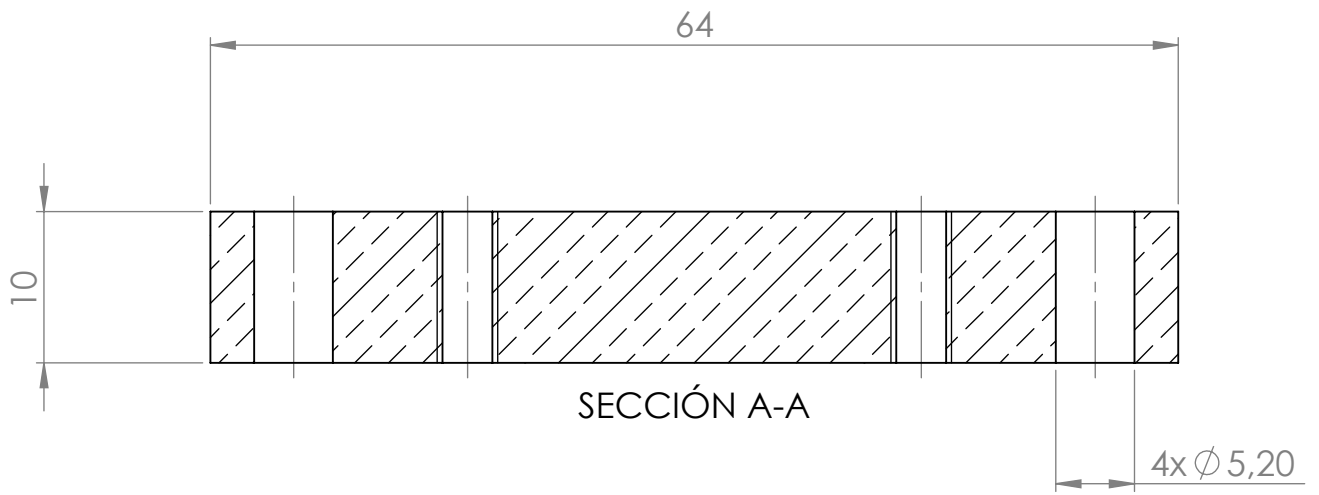


APS

Denominación: TOPE SOPORTE

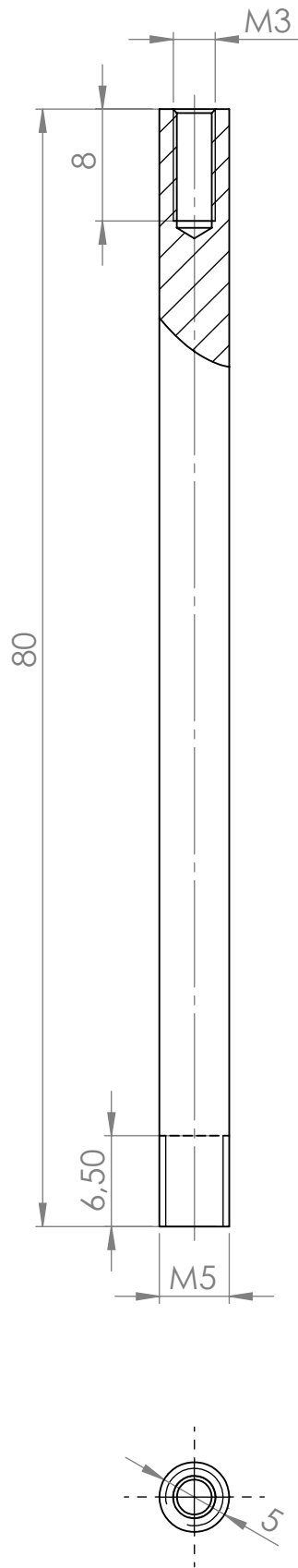
A4

Escala 2:1 | Fecha: 23/06/2017 | Autor: Josu Salinas López | N° Plano: 01.03



APS	Denominación:	SOPORTE	A4
	Escala 2:1	Fecha: 23/06/2017	Autor: Josu Salinas López N° Plano: 01.04



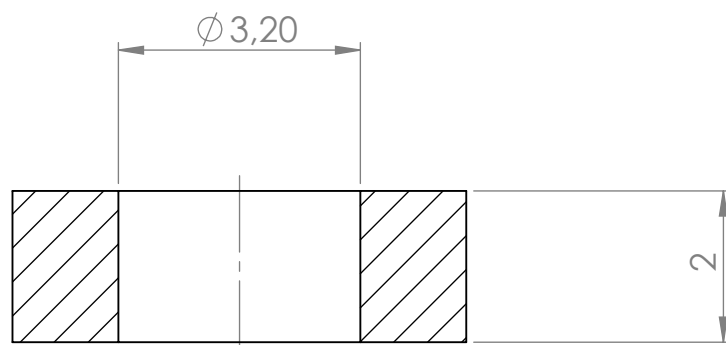
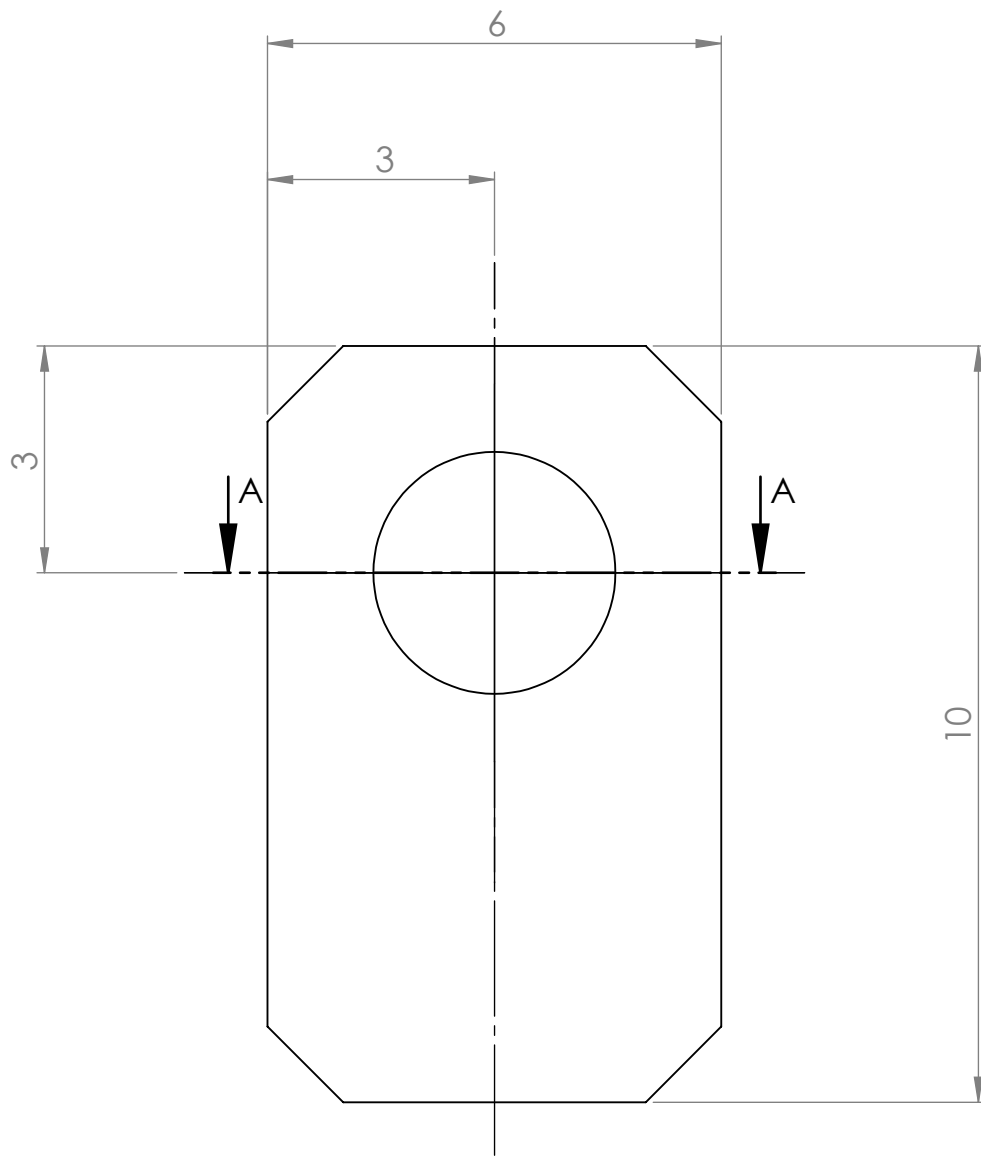


APS

Denominación: MARCADOR

A4

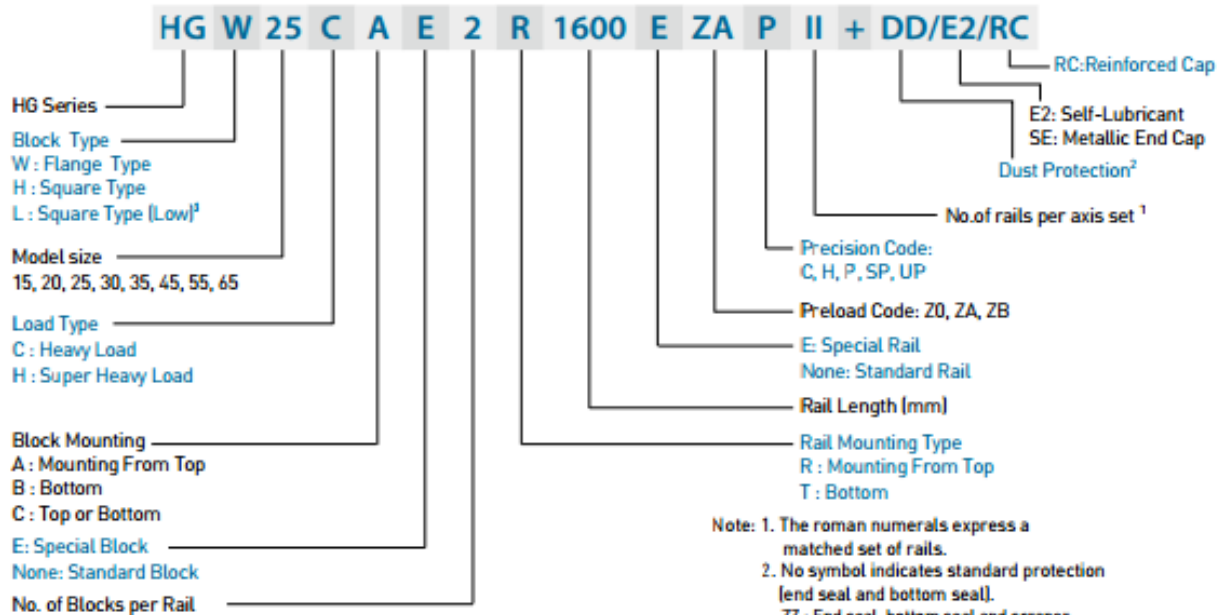
Escala 2:1 | Fecha: 23/06/2017 | Autor: Josu Salinas López | N° Plano: 01.05



SECCIÓN A-A

APS	Denominación:	PLACA	A4
	Escala 10:1	Fecha: 23/06/2017	Autor: Josu Salinas López N° Plano: 01.06

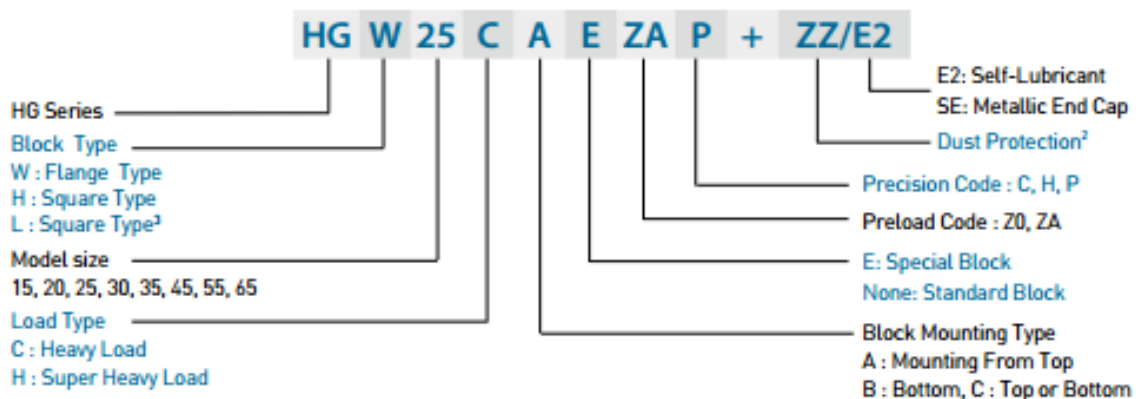
(1) Non-interchangeable type



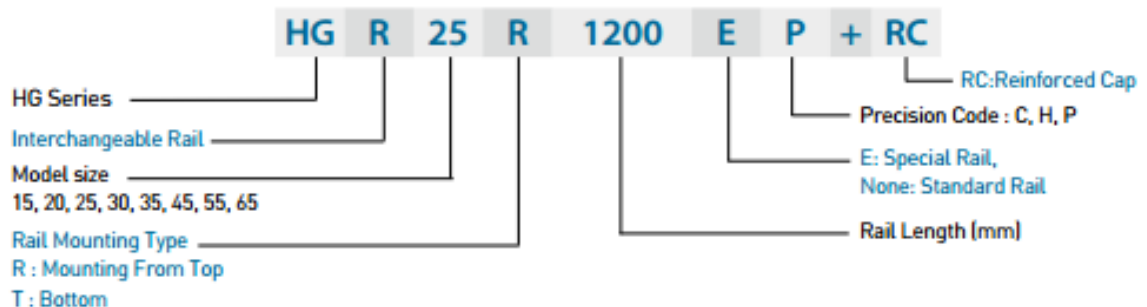
- Note: 1. The roman numerals express a matched set of rails.  
 2. No symbol indicates standard protection (end seal and bottom seal).  
 ZZ : End seal, bottom seal and scraper  
 KK: Double seals, bottom seal and scraper.  
 DD: Double seals and bottom seal  
 3. Block type HGL is the low profile design of HGH (square type), the assembled height is same as HGW (flange type) in same size.

(2) Interchangeable type

○ Model Number of HG Block



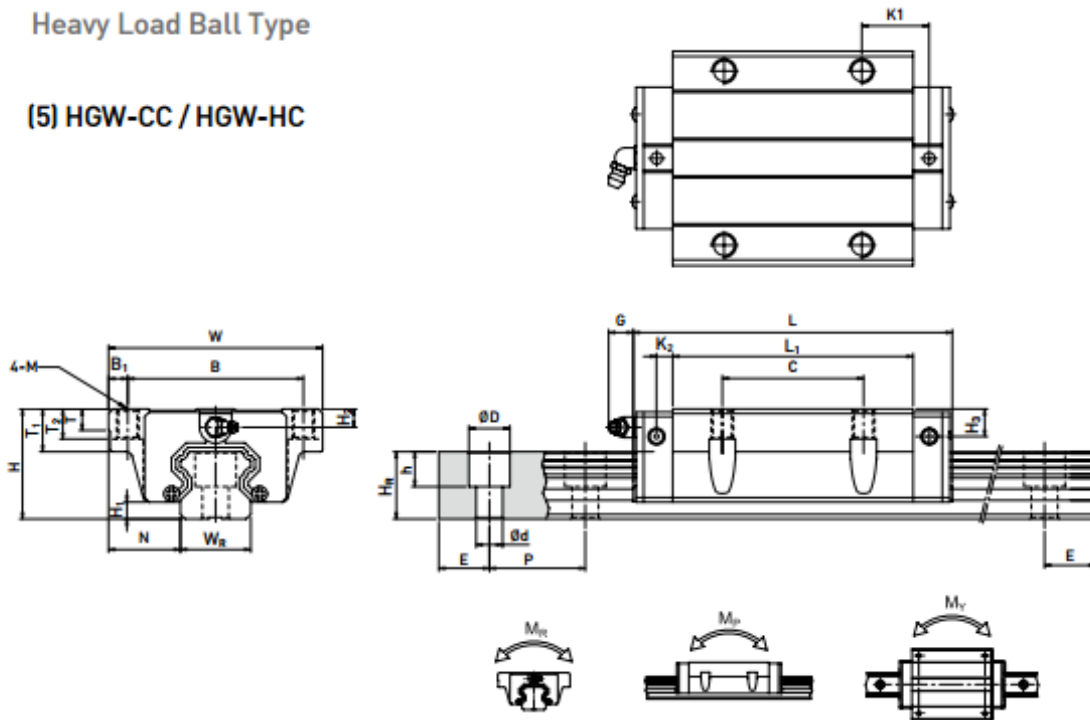
○ Model Number of HG Rail



## HG Series

Heavy Load Ball Type

(5) HGW-CC / HGW-HC



Model No.	Dimensions of Assembly (mm)		Dimensions of Block (mm)													Dimensions of Rail (mm)					Mounting Bolt for Rail (mm)	Basic Dynamic Load Rating C (kN)	Basic Static Load Rating C <sub>0</sub> (kN)	Static Rated Moment			Weight							
	H	H <sub>1</sub>	N	W	B	B <sub>1</sub>	C	L <sub>1</sub>	L	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	G	M	T	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	W <sub>a</sub>	H <sub>a</sub>				D	h	d	P	E	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>	Block	Rail	
	kgf	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm				mm	mm	mm	mm	mm	mm	kgf	kgf	kgf	kg	kg/m
HGW15CC	24	4.3	16	47	38	4.5	30	39.4	61.4	8	4.85	5.3	M5	6	8.9	6.95	3.95	3.7	15	15	7.5	5.3	4.5	40	20	M4x16	11.38	16.97	0.12	0.10	0.10	0.17	1.45	
HGW20CC	30	4.6	21.5	63	53	5	40	50.5	77.5	10.25																								
HGW20HC								65.2	92.2	17.6	6	12	M4	8	10	9.5	6	6	20	17.5	9.5	8.5	6	40	20	M5x16	21.18	35.90	0.35	0.35	0.35	0.52	2.21	
HGW25CC	36	5.5	23.5	70	57	6.5	45	58	84	10.7																								
HGW25HC								78.6	104.6	21	6	12	M8	8	14	10	6	5	23	22	11	9	7	40	20	M6x20	32.75	49.44	0.56	0.57	0.57	0.80	3.21	
HGW30CC	42	6	31	90	72	9	52	70	97.4	14.25																								
HGW30HC								93	120.4	25.75	6	12	M10	8.5	16	10	6.5	10.8	28	26	14	12	9	80	20	M8x25	47.27	69.16	0.88	0.92	0.92	1.44	4.47	
HGW35CC	48	7.5	33	100	82	9	62	80	112.4	14.6																								
HGW35HC								105.8	138.2	27.5	7	12	M10	10.1	18	13	9	12.6	34	29	14	12	9	80	20	M8x25	60.21	91.63	1.54	1.40	1.40	2.06	6.30	
HGW45CC	60	9.5	37.5	120	100	10	80	97	139.4	13																								
HGW45HC								128.8	171.2	28.9	10	12.9	M12	15.1	22	15	8.5	20.5	45	38	20	17	14	105	22.5	M12x35	77.57	102.71	1.98	1.55	1.55	2.79	10.41	
HGW55CC	70	13	43.5	140	116	12	95	117.7	166.7	17.35																								
HGW55HC								155.8	204.8	36.4	11	12.9	M14	17.5	26.5	17	12	19	53	44	23	20	16	120	30	M14x45	139.35	196.20	4.88	4.57	4.57	5.96	15.08	
HGW65CC	90	15	53.5	170	142	14	110	144.2	200.2	23.1																								
HGW65HC								203.4	259.6	52.8	14	12.9	M16	25	37.5	23	15	15	63	53	26	22	18	150	35	M16x50	208.36	303.13	9.38	7.38	7.38	12.89	21.18	

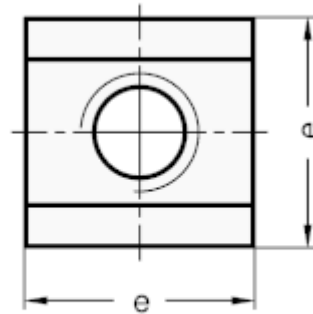
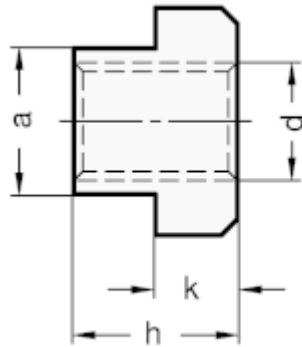
Note : 1 kgf = 9.81 N



# DIN 508

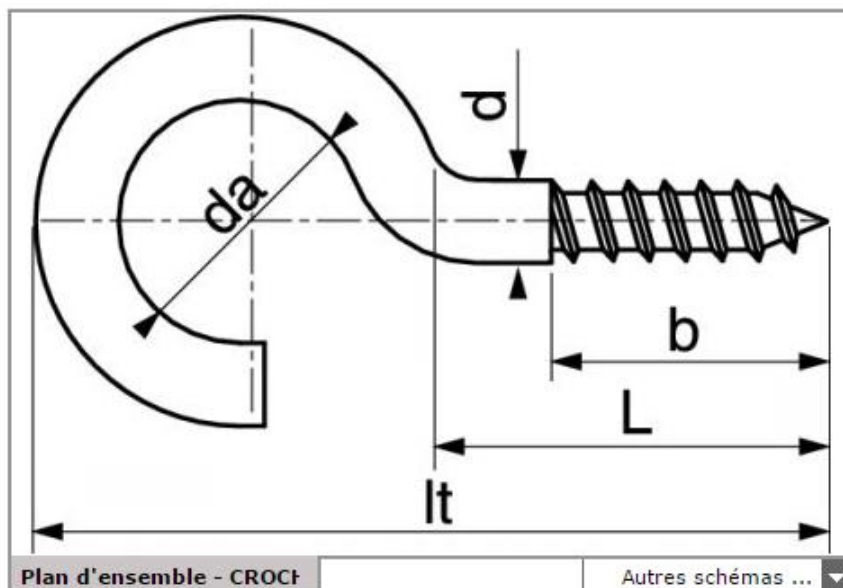
Tuercas en T

Acero / Acero inoxidable



Descripción	a -0.3/-0.5	d	e	h	k	Ancho de ranura en T DIN 650	Peso
<b>DIN 508-6-8</b>	6	-	10 -0.5	8	4 -0.5	6	4

# CROCHET D'ARMOIRE À FILETAGE BOIS INOX A2 (211321)



Zoom

Référence  
EXEMPLE DE COMMANDE : 211321-2,5X10

Ref	2,5	10	da (mm)	b (mm)	lt (mm)
211321-2,5X10	2,5	10	8	8	21/24