



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

## Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

---

### ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DE LA FABRICACIÓN ADITIVA PARA LA ELABORACIÓN DE COMPONENTES INDUSTRIALES EN ALEACIONES DE TITANIO

TRABAJO FINAL DEL

**Grado en Ingeniería Mecánica**

REALIZADO POR

**Ricardo Ruiz Monsalve**

TUTORIZADO POR

**Ángel Vicente Escuder**

**Emilio Francisco Segovia**

**CURSO ACADÉMICO: 2019/2020**



## ÍNDICE DE DOCUMENTOS

1. MEMORIA DE PROYECTO.
2. PLIEGO DE CONDICIONES.
3. PRESUPUESTO.



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer al departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la Universidad Politécnica de Valencia que me han dado la oportunidad de realizar con ellos este proyecto. También a mis tutores que me han estado enseñando y ayudando en todo momento, así como al resto de integrantes del departamento que me han ayudado y enseñado a utilizar los diversos equipos empleados para este trabajo.

A mi familia que me ha apoyado en todo momento y me han regalado esta educación.

Y por último a mis amigos que son un apoyo fundamental y con los que he compartido buenos momentos durante estos años de estudio de grado.

## RESUMEN

Este trabajo consiste en realizar un estudio sobre la viabilidad del proceso de fabricación aditiva para la obtención de piezas y componente industriales a partir de la aleación Ti6Al4V.

Con este estudio se pretende conocer las propiedades de piezas de Titanio obtenidas mediante la fabricación aditiva y con los resultados obtenidos evaluar el uso de está técnica para reemplazar los métodos convencionales como por ejemplo la forja. También se estudiará el efecto que tiene el proceso de prensado isostático en caliente (HIP) sobre la fabricación aditiva y si es viable su utilización como post-proceso.

Por último, para obtener las diferentes propiedades se realizará una caracterización mecánica mediante ensayos de tracción y flexión. También se realizará una caracterización microestructural.



# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

---

**DOCUMENTO N°1:**

## **MEMORIA**

**ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DE LA FABRICACIÓN ADITIVA PARA LA  
ELABORACIÓN DE COMPONENTES INDUSTRIALES EN ALEACIONES DE  
TITANIO**

TRABAJO FINAL DEL

**Grado en Ingeniería Mecánica**

REALIZADO POR

**Ricardo Ruiz Monsalve**

TUTORIZADO POR

**Ángel Vicente Escuder**

**Emilio Francisco Segovia**

**CURSO ACADÉMICO: 2019/2020**

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>15</b>
2.1. Fabricación Aditiva.....	17
2.1.1 Tecnologías de Fabricación Aditiva .....	19
2.1.2 Polvos Metálicos para Fabricación Aditiva .....	26
2.2. Prensado Isostático en Caliente (HIP).....	28
<b>3. MATERIALES</b> .....	<b>32</b>
3.1. Estructura de los Materiales .....	32
3.2. Aleación.....	34
3.2.1 Aleaciones de Titanio .....	35
<b>4. PLANIFICACIÓN EXPERIMENTAL</b> .....	<b>40</b>
<b>5. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>41</b>
5.1. Obtención de las muestras .....	41
5.2. Preparación de las muestras.....	43
5.3. Caracterización mecánica .....	45
5.3.1 Ensayo de tracción.....	45
5.3.2 Ensayo de flexión .....	51
5.4. Caracterización Microestructural .....	54
5.4.1 Obtención de las muestras.....	54
5.4.2 Embutición de las muestras.....	55
5.4.3 Desbaste .....	57
5.4.4 Pulido.....	59
5.4.5 Ataque Químico .....	61
5.4.6 Errores en la preparación .....	63
5.4.7 Microscopia óptica .....	63
5.4.8 Microscopia electrónica de barrido .....	65
<b>6. RESULTADOS</b> .....	<b>71</b>
6.1. Resultados caracterización mecánica.....	71
6.2. Resultados caracterización microestructural .....	86
<b>7. CONCLUSIONES</b> .....	<b>96</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>100</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Propiedades de diversos metales a 20°C. ....	13
<b>Tabla 2.</b> Composición en wt% de la aleación Ti6Al4V en función de varias normas.....	37
<b>Tabla 3.</b> Algunas propiedades mecánicas de la aleación Ti6Al4V .....	38
<b>Tabla 4.</b> Propiedades mecánicas de diferentes titanios puro comerciales.....	38
<b>Tabla 5.</b> Composición de la resina ClaroFast.....	55
<b>Tabla 6.</b> Parámetros para un cilindro de 25 mm de diámetro de ClaroFast.....	56
<b>Tabla 7.</b> Composición del ácido denominado Kroll .....	62
<b>Tabla 8.</b> Resumen de los 3 escenarios ensayados en el proyecto .....	71
<b>Tabla 9.</b> Dimensiones de las probetas de tracción del escenario 1 .....	72
<b>Tabla 10.</b> Resultados obtenidos para muestra del escenario 1 para el ensayo de tracción.....	73
<b>Tabla 11.</b> Dimensiones de las probetas de tracción del escenario 2.....	75
<b>Tabla 12.</b> Resultados obtenidos para muestra del escenario 2 para el ensayo de tracción.....	75
<b>Tabla 13.</b> Dimensiones de las probetas de tracción del escenario 3.....	77
<b>Tabla 14.</b> Resultados obtenidos para muestra del escenario 3 para el ensayo de tracción.....	78
<b>Tabla 15.</b> Resultados obtenidos para cada escenario .....	79
<b>Tabla 16.</b> Dimensiones de las probetas de flexión del escenario 1 .....	80
<b>Tabla 17.</b> Resultados obtenidos para muestra del escenario 1 para el ensayo de flexión .....	81
<b>Tabla 18.</b> Dimensiones de las probetas de flexión del escenario 2 .....	82
<b>Tabla 19.</b> Resultados obtenidos para muestra del escenario 2 para el ensayo de flexión .....	82
<b>Tabla 20.</b> Dimensiones de las probetas de flexión del escenario 3 .....	83
<b>Tabla 21.</b> Resultados obtenidos para muestra del escenario 3 para el ensayo de flexión .....	84
<b>Tabla 22.</b> Resultados promedios obtenidos para cada escenario.....	85
<b>Tabla 23.</b> Espectros de la línea 2 y la línea 3 de ilustración 52 .....	90
<b>Tabla 24.</b> Espectros de la línea 2 y la línea 3 de ilustración 53 .....	93
<b>Tabla 25.</b> Espectros del recuadro 2 de la ilustración 58 .....	95
<b>Tabla 26.</b> Espectros de los recuadros 3,4 y de toda la zona de la ilustración 58 .....	95
<b>Tabla 27.</b> A)Tabla con la resistencia a tracción del Ti64 según normativa .....	97



**Tabla 28.** Resultados promedios del ensayo de tracción .....97  
**Tabla 29.** Resultados obtenidos en ensayo a flexión .....98



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1.</b> Proceso de fabricación sustractivo [1] .....	16
<b>Ilustración 2.</b> Esquema de inyectora de plástico [2] .....	16
<b>Ilustración 3.</b> Ejemplo de pieza con geometría compleja y de tamaño muy pequeño fabricada mediante FA. [3].....	17
<b>Ilustración 4.</b> Ejemplo de pieza con zonas huecas fabricada mediante FA [4] .....	18
<b>Ilustración 5.</b> Esquema proceso fabricación con filamento fundido (FFF) [5].....	20
<b>Ilustración 6.</b> Bolígrafo 3D [6].....	20
<b>Ilustración 7.</b> Tecnología de estereolitografía [7] .....	20
<b>Ilustración 8.</b> Representación del proceso de fabricación mediante LBM [8].....	21
<b>Ilustración 9.</b> Representación del funcionamiento de una máquina de EBM [9] .....	22
<b>Ilustración 10.</b> Proceso fabricación por impresión 3D o chorro de tinta [10] .....	23
<b>Ilustración 11.</b> Esquema etapas procesos de fabricación aditiva.....	24
<b>Ilustración 12.</b> Proceso de atomización con gas [11].....	26
<b>Ilustración 13.</b> Etapas del proceso de fabricación HIP .....	29
<b>Ilustración 14.</b> Representación de los 7 sistemas básicos de cristalización [12].....	33
<b>Ilustración 15.</b> Representación de la estructura FCC [13] .....	33
<b>Ilustración 16.</b> Representación de la estructura BCC [13] .....	34
<b>Ilustración 17.</b> Representación de la estructura HD [14].....	34
<b>Ilustración 18.</b> Muestra escenario 1, Ti6Al4V con EBM e HIP y enfriamiento de 500 °C/min.....	42
<b>Ilustración 19.</b> Muestra escenario 1, Ti6Al4V con EBM e HIP y enfriamiento de 100 °C/min.....	42
<b>Ilustración 20.</b> Muestra escenario 3, Ti6Al4V con EBM.....	43
<b>Ilustración 21.</b> Representación de las dimensiones de la muestra y tras las cortes ....	43
<b>Ilustración 22.</b> Tronzadora Struers Accutom 10 .....	44
<b>Ilustración 23.</b> Muestra del escenario 1 cortada.....	44
<b>Ilustración 24.</b> Muestra del escenario 2 cortada.....	45
<b>Ilustración 25.</b> Geometría de las probetas para ensayo a tracción. Probeta de sección circular (a), probeta de sección rectangular (b) [15] .....	46
<b>Ilustración 26.</b> Probeta de tracción [16].....	47
<b>Ilustración 27.</b> Esquema de una máquina universal de ensayos [16] .....	47
<b>Ilustración 28.</b> Probeta de sección rectangular preparada para ser ensayada.....	50
<b>Ilustración 29.</b> Maquina universal de ensayos Shimadzu .....	51





.....	93
<b>Ilustración 56.</b> Imagen escenario 2 100x .....	93
<b>Ilustración 57.</b> A) Imagen escenario 3 (EBM) 1.0k x.      B) Imagen escenario 3 (EBM) 10.0k x.....	94
<b>Ilustración 58.</b> Imagen escenario 3 (EBM) 10.0k x.....	95



## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1.</b> Esquema de las principales tecnologías de FA .....	21
<b>Gráfico 2.</b> Gráfico carga-alargamiento de ensayo a tracción.....	48
<b>Gráfico 3.</b> Gráfico tensión-deformación.....	48
<b>Gráfico 4.</b> Gráfica Tensión-Deformación ensayo a tracción de la muestra 1A .....	74
<b>Gráfico 5.</b> Gráfica Tensión-Deformación ensayo a tracción de la muestra 1D.....	74
<b>Gráfico 6.</b> Gráfica Tensión-Deformación ensayo a tracción de la muestra 2A .....	76
<b>Gráfico 7.</b> Gráfica Tensión-Deformación ensayo a tracción de la muestra 2E .....	76
<b>Gráfico 8.</b> Gráfica Tensión-Deformación ensayo a tracción de la muestra 3A .....	78
<b>Gráfico 9.</b> Gráfica Tensión-Deformación ensayo a flexión de la muestra 1-3-3.....	81
<b>Gráfico 10.</b> Gráfica Tensión-Deformación ensayo a flexión de la muestra 2-6-8.....	83
<b>Gráfico 11.</b> Gráfica Tensión-Deformación ensayo a flexión de la muestra 3-2-11 .....	84

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Como sabemos en los últimos años ha habido una gran inversión y desarrollo de las aleaciones de Titanio. Hoy en día el uso de estas aleaciones está muy extendido en el sector aeronáutico debido a sus propiedades. Esto es debido a que el titanio es ligero ya que presenta una densidad más baja que el acero.

La densidad del titanio es de  $4507 \text{ kg/m}^3$  mientras que el hierro presenta una densidad de  $7874 \text{ kg/m}^3$ ; entre  $7750$  y  $8050 \text{ kg/m}^3$ , si hablamos de aceros dependiendo de su composición. Como vemos el titanio es más ligero que el acero, presenta una gran relación peso resistencia lo que resulta muy útil en muchos sectores industriales y sobre todo en la aeronáutica ya que es necesario aligerar el peso de los componentes. Es el elemento metálico con la proporción resistencia-densidad más elevada.

Además, el titanio no es solo importante debido a su peso también presenta otras propiedades que son necesarias mencionar.

En primer lugar, presenta un punto de fusión de  $1660 \text{ }^\circ\text{C}$  superior a la de otros metales industriales como el hierro cuyo punto de fusión se encuentra a  $1535 \text{ }^\circ\text{C}$  y el del níquel a  $1455^\circ\text{C}$ . También tiene una baja conductividad tanto térmica como eléctrica.

El titanio también se oxida en contacto con el oxígeno del aire a temperaturas de  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ , pero tiene una buena resistencia a la corrosión ya que resiste ácidos como el sulfúrico.

PROPIEDADES	UNIDADES	TITANIO	HIERRO	COBRE	ALUMINIO
DENSIDAD	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	4507	7874	8960	2700
CALOR ESPECÍFICO	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	520	450	390	880
PUNTO DE FUSIÓN	$^\circ\text{C}$	1668	1538	1085	660
RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	$\mu\Omega\text{m}$	0,5	0,98	0,015	0,027

Tabla 1. Propiedades de diversos metales a  $20^\circ\text{C}$ .



Un aspecto muy importante es su elevada reactividad, es decir, la capacidad que tiene para reaccionar y provocar reacciones químicas. Debido a esto, es más complicada su extracción y transformación. También es muy reactivo termodinámicamente.

Finalmente es considerado un metal industrial caro debido a lo comentado anteriormente de su elevada reactividad. A pesar de ello tampoco se puede considerar de lo más caros ya que otros metales como el germanio o el galio, que se utilizan en el industria solar y electrónica, o por ejemplo el niobio, muy importante en la industria aeronáutica, son metales mucho más caros en comparación con el titanio.

Por tanto, hoy en día, el titanio es de las mejores opciones en aquellos sectores industriales donde se busca buena resistencia y dureza reduciendo el peso y además el presupuesto no sea un factor excesivamente limitante.

El objetivo de este proyecto es analizar las propiedades obtenidas en una misma aleación de Titanio fabricada mediante fusión por haz de electrones, conocido como EBM de Electron Beam Melting. La aleación a estudio es Ti-6Al-4V, conocida también como TC4 o Ti64. Esta aleación de titanio alfa-beta presenta una gran relación resistencia peso y muy buena resistencia a corrosión. Esta aleación como bien indica contiene aluminio y vanadio y es de las más empleadas en diversas aplicaciones industriales, así como aeroespaciales y biomédicas.

Se estudiarán y compararán 3 escenarios de fabricación distintos. Además, dos de los tres escenarios fueron sometidos a Hot Isostatic Pressing (HIP) con diferentes velocidades de enfriamiento.

## 2. ESTADO DEL ARTE

La fabricación aditiva, en inglés Additive Manufacturing Technology (AM), también conocida como impresión 3D, consiste en un proceso de fabricación donde se unen materiales con diversas técnicas para realizar objetos a partir de un modelo previo 3D. Normalmente, este proceso se realiza capa a capa. Este tipo de tecnología surgió en el último cuarto del siglo XX.

A partir de este momento podemos clasificar las técnicas de fabricación de piezas en 3 principales grupos:

**Tecnologías aditivas:** a partir de un modelo se obtiene la pieza añadiendo material. Existen diversos métodos y para la obtención de piezas metálicas se fabrican mediante polvos del material deseado. Más adelante se explica detalladamente esta tecnología.

**Tecnologías sustractivas:** esta tecnología obtiene la pieza a través de retirar material de un elemento de mayor tamaño o bien un bloque o barra y se va revelando, sustrayendo el material con diferentes herramientas de mecanizado.

La técnica más empleada en la tecnología sustractiva son las máquinas de control numérico por computadora conocido como CNC. Estas máquinas permiten realizar los procesos de mecanizado de forma automática. Esto supone una gran ventaja ya que se reducen los tiempos no productivos como por ejemplo las trayectorias y velocidades en vacío, tiempos de revisión de datos y reglajes. Por tanto, podemos encontrar máquinas de CNC como un torno, prensa de punzonado o electroerosión.

También cabe destacar, la existencia de un proceso de mecanizado por descarga eléctrica (EDM) o electroerosión. Este proceso se basa en generar un arco eléctrico entre la pieza y un electrodo en un medio dieléctrico y así sustraer partículas de la pieza hasta obtener la pieza deseada.

Subtractive manufacturing

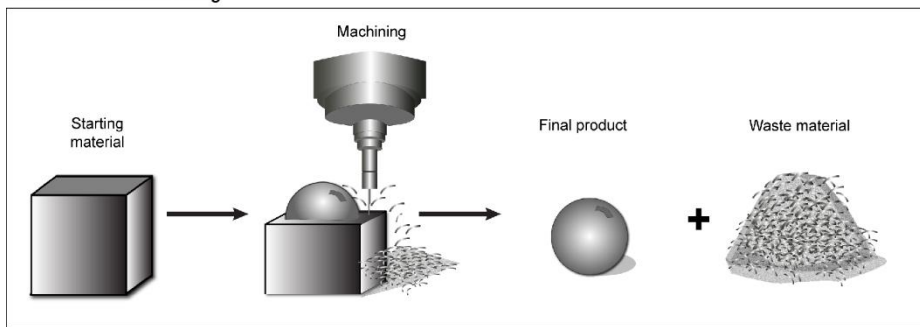


Ilustración 1. Proceso de fabricación sustractivo [1]

**Tecnologías conformativas:** mediante herramientas con formas ya preestablecidas obtienen la geometría deseada. El material, del que se desea que sea fabricada la pieza, se introduce en una matriz con la geometría deseada. Los principales métodos de la fabricación conformativa son la forja, pulvimetalurgia y el moldeo por inyección como en las inyectoras de plástico.

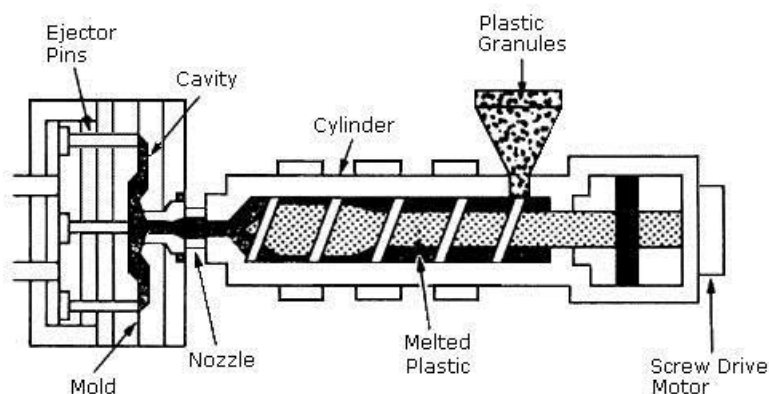


Ilustración 2. Esquema de inyectora de plástico [2]

Tanto la tecnología sustractiva y la conformativa, son los procesos de fabricación más convencionales debido a que son utilizados en la industria desde hace muchos años atrás.



## 2.1. Fabricación Aditiva

Actualmente, el estudio y el uso de la tecnología aditiva en la industria está en pleno crecimiento. Es un proceso muy útil para la fabricación de piezas con geometrías complejas.

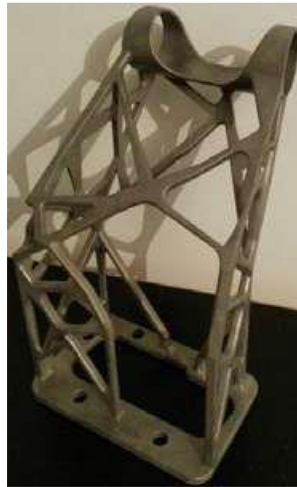
Este aumento en el uso y en su popularidad es debido a que esta tecnología presenta una gran cantidad de beneficios lo que le otorga ventajas competitivas con el resto de los métodos.

Una de las principales ventajas es que permite la elaboración de piezas complejas, así como con canales internos o distintas partes integradas en la misma pieza. Normalmente, las geometrías complejas suponen un mayor coste con otros procesos mientras que con AM se puede hasta abaratar. Por tanto, le otorga una gran libertad a la hora de diseñar las piezas.



**Ilustración 3.** Ejemplo de pieza con geometría compleja y de tamaño muy pequeño fabricada mediante FA. [3]

- Otra ventaja importante es que se trata de un proceso de fabricación directo por tanto no es necesario diseñar y fabricar equipo adicional como utillajes para poder fabricar la pieza deseada.
- Debido a la capacidad de realizar geometrías complejas, se pueden obtener piezas con un peso inferior con la realización de estructuras internas huecas que no afecten a la finalidad de la pieza



**Ilustración 4.** Ejemplo de pieza con zonas huecas fabricada mediante FA [4]

- Otra ventaja considerable es que se consume menos materia prima en comparación con el mecanizado lo que suponen una gran ventaja cuando se utilizan aleaciones caras. Esto es debido a que no se tiene un bloque inicial del que se extrae materia si no se añade en función del diseño de las capas que sean necesarias además de que la gran parte del material que no se ha utilizado en el proceso se puede reutilizar.
- Relacionado con lo anterior, no es necesario operaciones de ensamblaje como soldaduras. Además, debido a que no se utilizan moldes no es necesario el uso de otros tipos de herramientas de extracción. Esto también supone una ventaja económica ya que la fabricación de moldes suele ser un proceso costoso.

Por otro lado, esta tecnología también presenta una serie de limitaciones que no nos permiten prescindir del resto de procesos de fabricación.



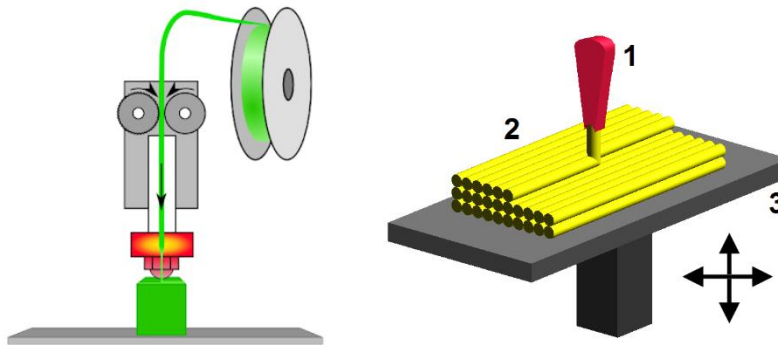
- Una de las más importante es el tamaño de la pieza, no es posible realizar piezas de grandes dimensiones y si son excesivamente grandes sería un proceso demasiado lento y costoso. Hoy en día es muy complicado realizar piezas metálicas con un volumen superior a un cubo de 500 mm de lado.
- También, relacionado con la velocidad de producción, el resultado final del acabado superficial depende de la velocidad.
- Por último, otro aspecto muy importante es el coste. Las maquinas necesarias suelen tener costes muy elevados, así como el material también suele ser caro.

### **2.1.1 Tecnologías de Fabricación Aditiva**

En este apartado voy a tratar las tecnologías de fabricación aditiva con metal. También hay procesos de fabricación aditiva para otros materiales no metálicos como cerámicos y sobre todo polímeros. A continuación, voy a realizar una pequeña mención a la tecnología relacionada con los polímeros ya que no es de gran importancia para este proyecto.

- Fabricación con Filamento Fundido (FFF)

Empleado a pequeña escala. La técnica consiste en ir depositando el polímero en capas. El polímero se encuentra por encima de su temperatura de fusión, pero como se construyen con finos hilos, éstos se solidifican rápidamente. Esta tecnología es la comúnmente conocida como impresoras 3D (ilustración 5).



**Ilustración 5.** Esquema proceso fabricación con filamento fundido (FFF) [5]

- Bolígrafo 3D

El bolígrafo 3D (ilustración 6) consiste en un pequeño dispositivo de mano del tamaño ligeramente superior a un bolígrafo que en lugar de expulsar tinta expulsa plástico. El funcionamiento es el igual que para FFF. Hoy en día, esta tecnología es más de uso lúdico que industrial.



**Ilustración 6.** Bolígrafo 3D [6]

- Estereolitografía (SLA)

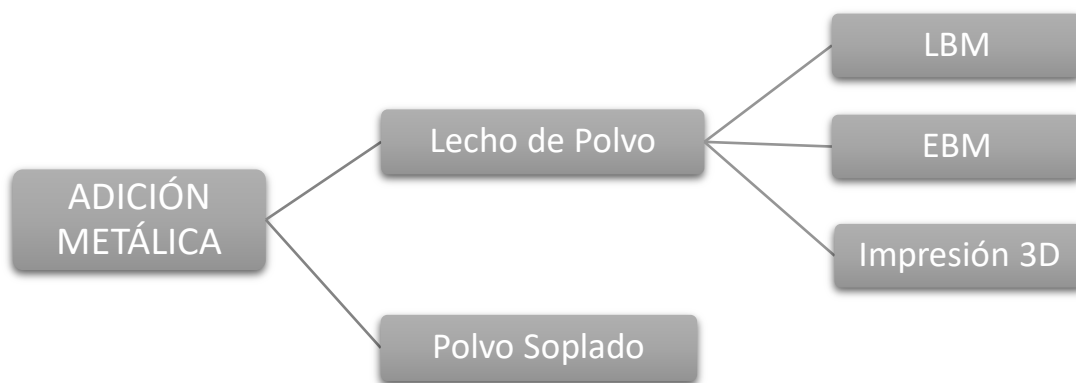
Este proceso consiste en crear piezas 3D con resinas sensibles a rayos UV. Un láser con emisión de rayos UV pasa capa por capa para solidificar el material.



**Ilustración 7.** Tecnología de estereolitografía [7]

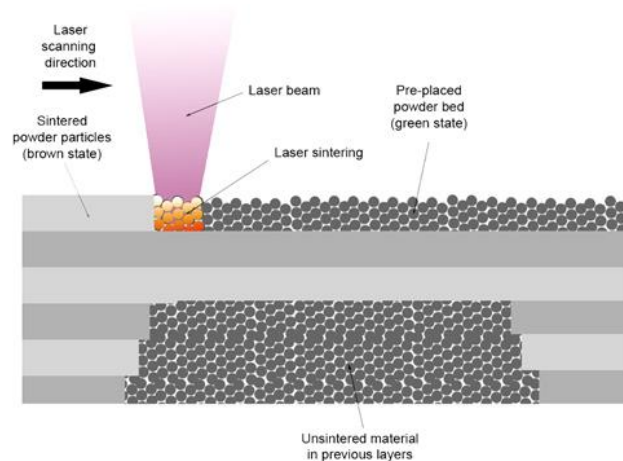
A continuación, se va a explicar con mayor detalle diferentes tecnologías de fabricación aditiva para metales.

Existen dos ramas principales, por un lado, está la tecnología de lecho de polvo y por otro la tecnología de polvo soplado conocido como DED o LMD. Además, dentro de la propia tecnología de lecho de polvo existen diferentes formas de fabricación. Tenemos por haz láser de fusión (LBM), fusión por haz de electrones (EBM) y por último impresión 3D o por chorro de tinta.



**Gráfico 1.** Esquema de las principales tecnologías de FA

El lecho de polvo consiste: en primer lugar, se coloca sobre una plataforma una fina capa del polvo metálico que se vaya a emplear en la fabricación. Luego se le aplica un rayo láser o de electrones en la capa superior del polvo. Una vez finalizada esta primera capa se coloca una nueva encima de la anterior y se repite el proceso hasta que se finaliza la pieza. La plataforma se suele bajar entre 20 y 100  $\mu\text{m}$ .

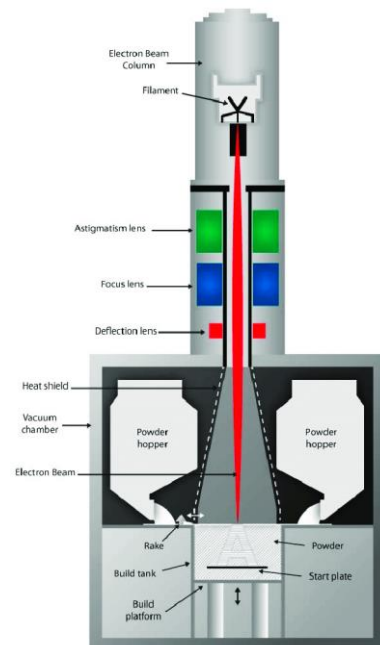


**Ilustración 8.** Representación del proceso de fabricación mediante LBM [8]

Normalmente en la tecnología LBM el haz de rayo láser que se utiliza es de un

diámetro entorno a los 100  $\mu\text{m}$ . Al aplicar el láser sobre el lecho de polvo se forman grupos de fusión en los polvos y rápidamente se solidifican. Normalmente la potencia del láser varía entre 200 W y 1000 W en función del material y lo que se quiera fabricar.

Por otro lado, tenemos la fusión de haz de electrones (EBM). En este caso el lecho de polvo se funde y se solidifica con el uso de un haz de electrones de alta potencia. Este haz se genera gracias a bobinas electromagnéticas, además el proceso se realiza en vacío y a elevada temperatura. El vacío evita grandes porosidades y defectos internos. Como se aprecia en la imagen, en la parte superior se encuentra el filamento donde se emite el haz de electrones. Este filamento está fabricado con tungsteno y también hay un ánodo. Se calienta el filamento a unos 5000  $^{\circ}\text{C}$  para emitir el haz. Seguidamente hay 3 lentes en serie que permiten concentrar el haz aumentando así la potencia de éste. Mas abajo se encuentra el contenedor donde está la plataforma con el lecho de polvo y además en los lados hay unas tolvas que se encargan de depositar el polvo de la siguiente capa. Todo esto está dentro de una cámara de vacío.



**Ilustración 9.** Representación del funcionamiento de una máquina de EBM [9]

Con este método es complicado la fabricación de grandes piezas ya que necesitaría una cámara de vacío, así como una plataforma acorde con las dimensiones de la pieza deseada.

Por último, el proceso de impresión 3D o chorro de tinta incluye 2 pasos ya que es un proceso indirecto. Una vez dispuesta la capa de polvo en la plataforma, en esta ocasión el polvo se aglomera con el uso de un aglutinante que se distribuye a través de una boquilla. Este proceso se repite cíclicamente hasta que se obtiene la pieza deseada y se retira de la plataforma. Para la solidificación de la

parte metálica se utiliza un proceso de desbobinado y sinterización.  
Esta tecnología es más productiva que la fusión por láser, pero los materiales son más limitados y las propiedades mecánicas obtenidas son inferiores a los otros 2 métodos.

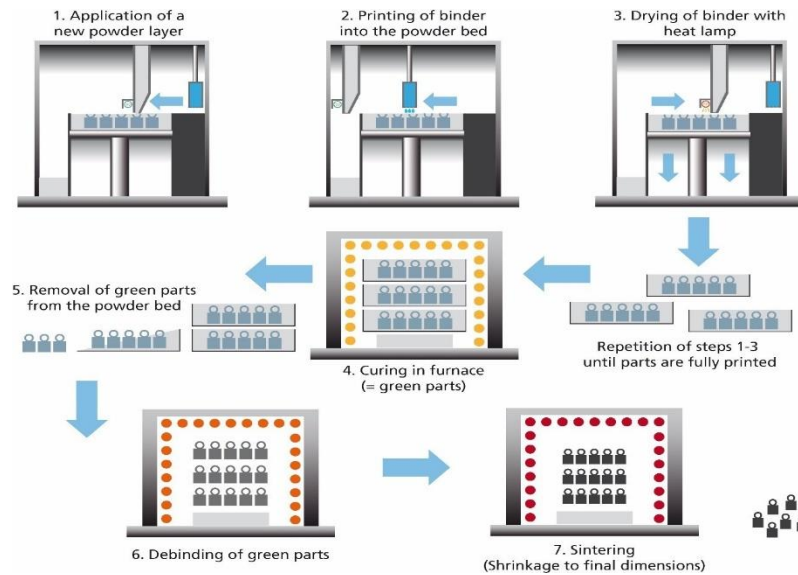


Ilustración 10. Proceso fabricación por impresión 3D o chorro de tinta [10]

### PROCESO FA

El proceso de fabricación aditiva tiene una serie de etapas. Este proceso está comprendido en 4 etapas. A continuación, muestro un esquema del proceso (ilustración 11) y seguidamente una explicación.

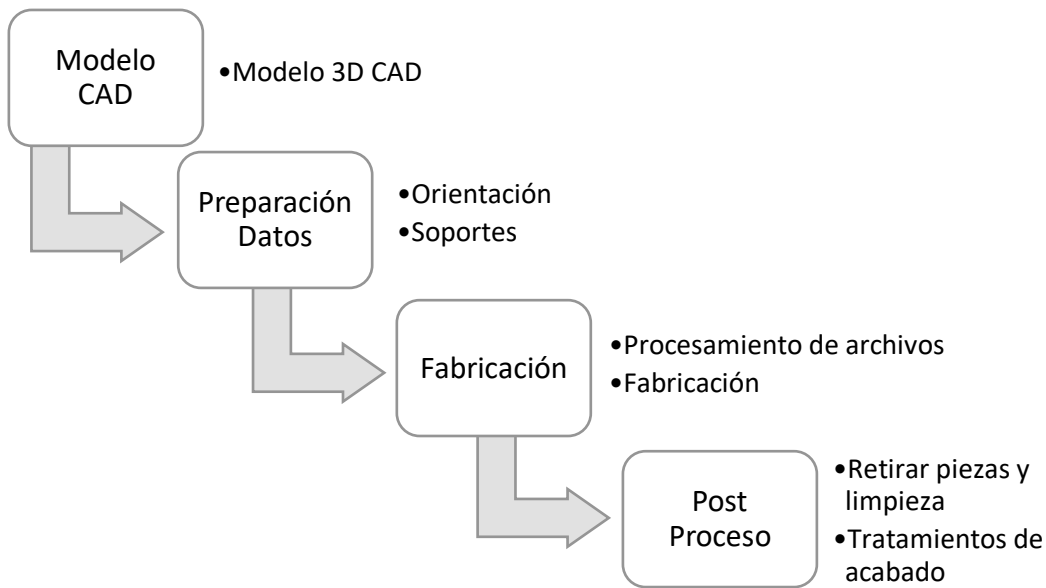


Ilustración 11. Esquema etapas procesos de fabricación aditiva

## 1. Modelo CAD

Esta es la primera etapa. Hoy en día gracias a la tecnología y a los ordenadores se pueden realizar un modelo de cualquier pieza con cualquier geometría. Como mencioné, una gran ventaja de la fabricación por adición es que puede realizar cualquier tipo de geometría por tanto no tiene limitaciones en este aspecto como ocurre con otros procesos de fabricación. Directamente en el modelo CAD se diseña la pieza que se va a fabricar.

Otro aspecto importante es que con los modelos CAD se pueden realizar análisis y estudios para saber el comportamiento que tendrá dicha pieza cuando sea sometida a diferentes cargas. Todo esto se puede obtener mediante análisis por elemento finitos.

## 2. Preparación Datos

Una vez realizados los diferentes modelos de CAD el siguiente paso consiste en diseñar como se realizará la pieza, es decir, se estudiará como será la colocación y la orientación de la pieza en la plataforma. En este punto, debido a que se



estudiará la posición que tendrá la pieza, también se añadirán los diferentes soportes que sean necesarios. Los soportes son necesarios para la correcta fabricación. Éstos suelen ser una especie de columnas o entramados que soportan voladizas, zonas muy pesadas y superficies con ángulos muy bajos. Hoy en día los diferentes softwares son capaces de generar estos soportes de forma automática. Finalmente, el modelo se divide en las sucesivas capas que se necesitarán para su fabricación. Como mencioné, los espesores de las capas varían entre 20 y 100  $\mu\text{m}$ . En cuanto a la elección del espesor depende de la técnica que se vaya a realizar y de la resolución. A mayor resolución el espesor de la capa será inferior otorgando un mayor detalle a la pieza reduciendo el efecto de escalonado.

### **3. Fabricación**

En esta etapa se envían los archivos de los modelos con los soportes y las capas a la máquina encargada de la fabricación aditiva. En primer lugar, se depositará la capa de polvo metálico, sobre la plataforma, de espesor en función del archivo cargado en la máquina. Una vez está dispuesta la capa, la máquina de fabricación aditiva, ya sea por haz de electrones, laser o cualquier otro método, comienza a generar la geometría cargada en el fichero. Finalizada esta capa se vuelve a distribuir una nueva capa sobre la plataforma y se vuelve a aplicar energía para seguir con la geometría. Se seguirá este proceso hasta la finalización.

### **4. Post-Proceso**

Por último, cuando se ha terminado el proceso de fabricación, se remueve el polvo sobrante y se extrae la pieza y los soportes de la plataforma. Además, gran parte del polvo sobrante se puede reutilizar. La pieza también se limpia de los posibles restos que se hayan quedado en ella, en el caso de polvos metálicos con una herramienta de aire presión sería suficiente.

Es común, después de extraer y limpiar la pieza, realizar operaciones complementarias a la pieza como planeados o roscados para mejorar la calidad

y reducir tolerancias. También se pueden aplicar tratamientos térmicos como presión isostática en caliente (HIP).

### 2.1.2 Polvos Metálicos para Fabricación Aditiva

Queda claro que el polvo metálico es algo esencial en este tipo de fabricación por ello hay un gran estudio y es muy importante la calidad y sus propiedades. También es importante considerar los defectos de fabricación en la superficie.

Las aleaciones más utilizadas son:

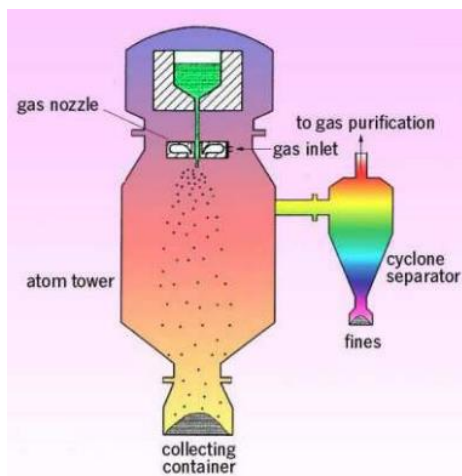
- Aceros 316L, 17-4PH
- Aleaciones de titanio como Ti6Al4V
- Aleaciones de aluminio como AlSi10Mg

### FABRICACIÓN DE POLVOS

El proceso más común para la fabricación de polvos metálicos es la atomización de gas ya que es considerada la óptima. Los gases que se emplean en esta técnica son el argón y el nitrógeno.

Las principales ventajas de esta técnica son las siguientes:

- El grano resultante tiene una buena forma esférica.
- Se obtiene un polvo con una buena densidad.
- Esta técnica es válida para un gran número de aleaciones.



**Ilustración 12.** Proceso de atomización con gas [11]

Como se puede apreciar en la ilustración 12, la atomización comienza vertiendo el metal fundido a través de una boquilla desde la parte superior. La corriente de metal desciende en régimen laminar hasta la boquilla de gas donde es golpeada por un chorro de gas neutro (argón o nitrógeno) inyectado a alta presión. Debido a este chorro de gas, el flujo metálico pasa de régimen laminar a turbulento y dicho flujo se convierte en un conjunto de

gotas muy pequeñas. Estas gotas siguen descendiendo por gravedad y en el trayecto se enfrían, solidificándose de esta manera. Se solidifican antes de entrar en contacto con cualquier tipo de superficie sólida. Todo el polvo resultante es recogido en la parte inferior.

También existe la atomización líquida. El proceso es similar al método de gas, pero el medio atomizador es agua. La diferencia con el gas es que los granos obtenidos no presentan una forma tan esférica.

Para superaleaciones se recomienda la atomización de gas VIM. En este caso la atomización tiene lugar en una cámara de vacío y evita la captación de oxígeno ya que el Ti y el Al son elementos reactivos.

A parte de la atomización de gas y líquido hay más métodos de fabricación de polvo, pero no son óptimos. Algunos de estos procesos son los siguientes:

- Atomización centrífuga: existen dos métodos. El método por disco y el electrodo giratorio.

Disco giratorio: este proceso consiste en un disco girando, como bien indica su nombre, a gran velocidad. Sobre la parte central del disco se inyecta el metal fundido en forma de chorro y por la fuerza centrípeta el metal se atomiza y se precipita por los bordes del disco. Además, se solidifica en el trayecto hacia el borde.

Electrodo giratorio: por otro lado, en este método tenemos la aleación en forma de barra que será utilizada como un electrodo consumible. Esta barra con la ayuda de un electrodo, normalmente de tungsteno, se somete a una diferencia de potencial. Esta descarga eléctrica hace que la barra se fusione. La barra se encuentra rotando lo que provoca que el líquido de la superficie forme gotas que son expulsadas. Para solidificar estas gotas se utiliza un flujo de gas inerte.

- Molienda: materiales frágiles como ferroaleaciones se introducen en molinos de bolas. En estos molinos se muele por impacto y fricción contra las bolas.

### CARACTERÍSTICAS DE LOS POLVOS

En la fabricación de los polvos metálicos se busca que tengan una serie de propiedades. Una propiedad muy importante es el tamaño del polvo, así como su morfología. También es muy importante su composición química. Otros aspectos a tener en cuenta pueden ser su almacenamiento, así como la facilidad de la reutilización del polvo después de varios ciclos de producción.

En cuanto a la composición química, se sabe que es bastante regular, pero en el mismo lote de partículas de polvo sí que puede existir una ligera diferencia en granos con diferencias de tamaño importantes al resto.

El tamaño del grano también varía considerablemente. Se considera un tamaño entre 50 a 150  $\mu\text{m}$  más apropiado para su uso en láser de fusión y fusión por haz de electrones mientras que valores inferiores sí que se utilizan en la mayoría de las tecnologías con lecho de polvo. Se evita usar polvo muy fino de unos 15  $\mu\text{m}$  porque puede perjudicar la fluidez.

La geometría del grano es muy importante también y se busca siempre que sea lo más esférico posible ya que esto ayuda a su fluidez y a formar capas más uniformes.

### **2.2. Prensado Isostático en Caliente (HIP)**

El prensado isostático en caliente (HIP) es un proceso de fabricación que se utiliza para densificar polvos y reducir de esta manera los defectos internos relacionados con porosidades que presente la pieza. Este método se utiliza en piezas metálicas, aceros y superaleaciones. Esto permite obtener piezas con mejores propiedades. Además, lo coloca en un proceso complementario a otros procesos de fabricación, como FA, siendo una solución rentable de alta calidad. En ocasiones, el HIP es sustituto de otros procesos de fabricación como la forja

o fundición.

## **PROCESO**

El proceso de fabricación mediante HIP sigue una serie de etapas.



**Ilustración 13.** Etapas del proceso de fabricación HIP

En primer lugar, se tienen que fabricar los polvos que serán sometidos a presión para formar la pieza. Para obtener estos polvos, se utilizan los sistemas explicados anteriormente como es el caso de atomización de gas.

El siguiente aspecto importante es el recipiente o contenedor donde se llevará a cabo el proceso. Tiene que soportar elevadas temperaturas y presiones. Además, es muy importante, una vez construido el contenedor, revisar y realizar una prueba de fugas introduciendo helio o argón. Es muy importante este punto porque en el caso de que hubiese alguna pequeña fuga, el gas podría entrar en el contenedor y afectar al polvo metálico ya que se formarían poros llenos de gas.

Seguidamente, una vez asegurado el recipiente, se pasa a su llenado. Para llenarlo, el polvo se introduce con ayuda de un tubo y se utiliza una tabla de vibración para que el polvo se distribuya bien y ocupe las zonas más estrechas. En el caso de que sea una pieza con una geometría compleja y/o se necesita para una aplicación crítica, el llenado se realiza con la ayuda de un gas inerte o en vacío para evitar una gran contaminación del material. Por último, es necesario eliminar los gases y el agua absorbida por los polvos y se sella el tubo de llenado con el contenedor.

Una vez preparado el contenedor, llenado y sellado se pasa al propio proceso de presión isostática en caliente. El proceso presenta diferentes variables que dependen del tipo de material y resultado que se busque. Las variables son la temperatura, la presión del gas y el tiempo que dure el proceso además del enfriamiento.

Antes de nada, se retira el aire que puede quedar en el recipiente. A continuación, se introduce el gas mientras se calienta el recipiente. Una vez alcanzada la presión deseada, el aumento de la presión se produce por expansión del gas a causa del aumento de la temperatura.

En cuanto a la temperatura, siempre se evita llegar a temperaturas demasiado elevadas que provoquen que el metal pase a estado líquido, por ello no aplican una temperatura superior a 0,8 la temperatura de solidus.

Cuando se finaliza la pieza, la velocidad de enfriamiento es muy importante ya que afecta a las propiedades finales. Un sistema de enfriamiento consiste en hacer circular gas a baja temperatura controlando la velocidad. Este método permite enfriamientos de hasta 100 °C/min.

Después de finalizar el proceso de HIP si no se va a reutilizar el contenedor se puede retirar. Para retirarlo se puede utilizar mecanizado, pero se necesita maquinaria, es lento y costoso o también un baño de decapado que no necesita mecanizar, pero las piezas tienen que ser inoxidable.

También es común someter a las piezas obtenidas por HIP a diferentes procesos



adicionales para mejorar sus propiedades, así como su superficie. Entre las operaciones más comunes tenemos mecanizados, tratamientos térmicos y de superficie. Además, cuando se termina el proceso es necesario el montaje de las piezas fabricadas.

### 3. MATERIALES

En este apartado voy a comentar los materiales que se utilizan en fabricación aditiva, así como las aleaciones más comunes. También describiré las principales aleaciones de Titanio.

#### 3.1. Estructura de los Materiales

Como es conocido, los materiales están compuestos por átomos unidos y organizados de cierta manera otorgan la apariencia de sólido. El tipo de átomo y de qué manera esté enlazado con los átomos colindantes produce una estructura. Si esta estructura tiene un orden cristalino es conocido como cristalinidad y la falta de este orden es llamado amorfidad.

Del tipo de estructura derivan las diferentes propiedades mecánicas de los materiales.

Los enlaces presentes en los materiales son los siguientes:

Iónico → En el enlace los átomos no comparten electrones.

Materiales: cerámicos ( Zn-S, Ti-O, Na-O, K-O, Al-O, Cr-O, Fe-C...)

Covalente → En este caso, en el enlace si se comparten electrones.

Materiales: cerámicos (Diamante, grafito); polímeros

Metálico → Este enlace se caracteriza por que los átomos comparten electrones al existir menor cantidad.

Materiales: metales ( Cu, Al, Fe, Ti...); aleaciones (bronce, acero...)

Secundario → puente de H, Van der Waals

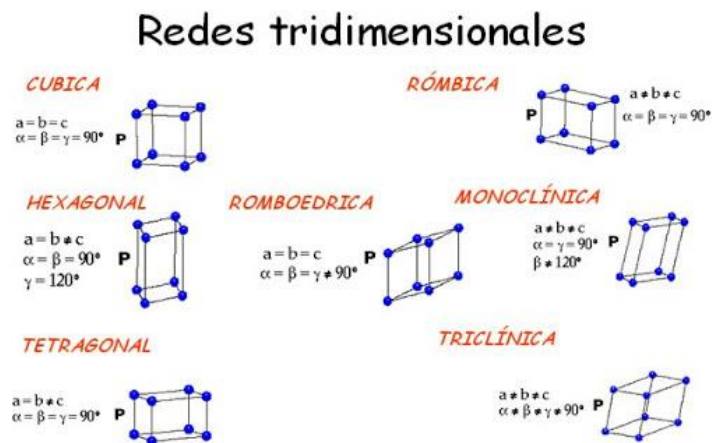


## CRISTALINIDAD

En el orden cristalino encontramos formas microestructurales diferentes en función de la disposición de los átomos.

El orden más sencillo es la red cúbica simple (C.S). En esta estructura los átomos están situados en cada nodo. Por ello se consigue el mejor aprovechamiento del espacio. La unidad estructural más simple es nombrada celda unidad mientras que la unión de varias de estas celdas unidades forman un monocristal y la unión de monocristales forma la estructura policristalina

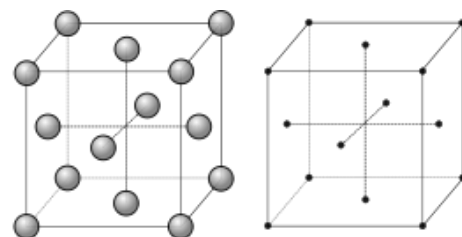
En función de los ángulos y la longitud de los ejes existen 7 sistemas básico de cristalización como podemos ver en la siguiente figura (ilustración 14).



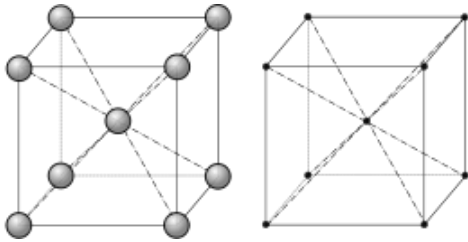
**Ilustración 14.** Representación de los 7 sistemas básicos de cristalización [12]

En cuanto a las estructuras cristalinas en metales podemos encontrar 3 disposiciones diferentes.

En primer lugar, encontramos la estructura Cúbica Centrada en las Caras (CCC o FCC) representada en la ilustración 15. Aquí encontramos 4 átomos por cada celda unidad con un factor de empaquetamiento atómico de 0.74.



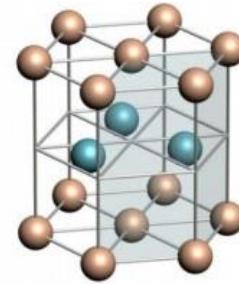
**Ilustración 15.** Representación de la estructura FCC [13]



**Ilustración 16.** Representación de la estructura BCC [13]

La siguiente estructura es la Cúbica Centrada en el Cuerpo (CC o BCC) representada en la ilustración 16. Esta vez, la celda unitaria está formada por 2 átomos y un factor de empaquetamiento atómico de 0.68.

Por último, existe la estructura Hexagonal Compacta (HCP) representada en la ilustración 17. Este tipo de estructura presenta una celda unidad conformada por 6 átomos y un factor de empaquetamiento atómico de 0.74.



**Ilustración 17.** Representación de la estructura HD [14]

El titanio, igual que el hierro y el cobalto, es un metal alotrópico. Un metal alotrópico es aquel que puede formar varias estructuras atómicas diferentes. En el caso del titanio podemos encontrarlo con una estructura Hexagonal Compacta y también como Cúbica Centrada en el Cuerpo. En función de la temperatura a la que se encuentre presentará una de ellas. A temperatura ambiente el Titanio forma la estructura HCP conocida como  $\alpha$  y a temperatura mayor de 880 °C sufre una transformación alotrópica pasando a la estructura CC. También hay que tener en cuenta que esto corresponde con el titanio puro y cuando se encuentra en una aleación estos valores varían en función de los aleantes.

### 3.2. Aleación

Una aleación es una mezcla sólida homogénea de dos o más elementos en el que al menos uno de ellos, el mayoritario, es un metal. Como consecuencia, el material resultante presenta unas características y propiedades distintas a las que presentan los elementos que conforman la aleación por separado. Además, en muchas ocasiones solo es necesario añadir una reducida cantidad de un elemento para beneficiarse de nuevas propiedades.

Como comenté anteriormente, cualquier aleación está compuesta como mínimo por dos elementos. Se encuentra el material base al que se le añaden los materiales aleantes, uno o varios. Las propiedades obtenidas dependerán, entre otras cosas, de los elementos empleados, así como de sus proporciones.

Los metales y aleaciones más importantes en la industria son las siguientes:

- Acero: es una aleación formada por hierro y carbono. El carbono en una cantidad entre 0,08% y 2%. Algunos de los aleantes más empleados son: Mn, Si, Cr, Ni, Co. El acero es muy utilizado en la industria en general, lo podemos encontrar en la mayoría de maquinaria.
- Cobre: con el cobre los principales aleantes que podemos encontrar son el Zn para formar latón o el Sn para obtener bronce. Su principal aplicación es en la industria eléctrica también en equipos térmicos.
- Aluminio: es uno de los metales más empleados después del acero. Los aleantes más empleados son Mn, Mg, Si, Si-Mg, Zn-Mg, Cu. El aluminio es muy utilizado en estructuras ligeras, pero también se utiliza en la industria eléctrica.
- Titanio: los aleantes más empleados son Al, V, como corresponde a la aleación que se va a estudiar en este proyecto, así como Sn, Mo, Fe y Cr. Como mencioné, el titanio debido a sus propiedades es empleado en elementos estructurales ligeros, en la industria aeronáutica, medicina y química.

### 3.2.1 Aleaciones de Titanio

Las propiedades de las aleaciones de titanio dependen de las componentes aleantes, así como la pureza y los tratamientos térmicos a los que se somete la aleación. Dentro de las aleaciones de titanio podemos encontrar 3 grupos clasificados en función de sus fases que conforman una microestructura

policristalina.

Estas aleaciones son:

- Aleaciones  $\alpha$
- Aleaciones  $\beta$
- Aleaciones  $\alpha$ - $\beta$

**Aleaciones  $\alpha$ .** El aluminio es un elemento importante en este sector porque permite obtener soluciones sólidas de sustitución y aumenta la temperatura de la transformación  $\alpha$ - $\beta$ . El uso de aluminio es muy interesante porque se obtienen aleaciones más ligeras y con mejor relación resistencia peso. Además, se suele añadir estaño porque aumenta la resistencia de la aleación. También es posible encontrar aleaciones con circonio, niobio y molibdeno. Lo más común en las aleaciones  $\alpha$  de titanio es encontrarlas con un contenido de 5% de aluminio y de 2,5% de estaño. Tanto el aluminio como el estaño son estabilizadores de la fase  $\alpha$ .

Las principales ventajas de este tipo de aleaciones son que presenta una buena resistencia a la corrosión y oxidación. Además de una ductilidad y conformabilidad adecuadas.

**Aleaciones  $\beta$ .** Estas aleaciones están formadas por combinaciones de varios estabilizados de fase  $\beta$  que enfriándolo rápidamente se consigue una estructura  $\beta$  metaestable. Presentan una elevada capacidad de endurecimiento.

**Aleaciones  $\alpha$ - $\beta$ .** Las aleaciones  $\alpha$ - $\beta$  pueden mejorar su resistencia sometidas a tratamientos térmicos de solubilización. La aleación estudiada en este proyecto, Ti6Al4V es una aleación  $\alpha$ - $\beta$ . Esta aleación por la presencia de ambas estructuras presenta una buena resistencia a temperatura y corrosión, pero una ductilidad baja.

## ALEACIÓN DE TITANIO Ti6Al4V

La aleación de Ti6Al4V es la estudiada en este proyecto y como mencioné anteriormente tiene muchas propiedades y eso la convierte en una de las aleaciones de titanio más utilizadas en diversos sectores industriales como el aeronáutico o el médico. Además, gracias a las nuevas técnicas de fabricación aditiva se puede utilizar esta magnífica aleación para obtener piezas de cualquier tipo de geometría.

### Propiedades de Ti6Al4V

En primer lugar, se va a comentar la composición química de esta aleación. En función de los estándares y normativas podemos encontrar variaciones en el porcentaje de cada compuesto. Los componentes de la aleación son Carbono (C), Hierro (Fe), Nitrógeno (N), Oxígeno (O), Aluminio (Al), Vanadio (V), Hidrógeno (H) y el resto de Titanio (Ti). Según las normas UNE-7301, ISO 5832-3 y ASTM F136 tenemos las siguientes composiciones (tabla 2).

	COMPOSICIÓN EN wt%							
	C	Fe	N	O	Al	V	H	Ti
<b>UNE-7301</b>	0.08	0.25	0.05	0.13	5.5-6.5	3.5-4.5	0.012	Resto
<b>ISO 5832-3</b>	0.08	0.30	0.05	0.20	5.5-6.75	3.5-4.5	0.015	Resto
<b>ASTM F136</b>	0.08	0.25	0.05	0.13	5.5-6.5	3.5-4.5	0.012	Resto

**Tabla 2.** Composición en wt% de la aleación Ti6Al4V en función de varias normas

En cuanto a las principales propiedades mecánicas que presenta esta aleación son las siguientes (tabla 3):

	<b>Resistencia a Tracción [MPa]</b>	<b>Límite Elástico [MPa]</b>	<b>Elongación [%]</b>	<b>Dureza</b>
<b>Ti6Al4V</b>	1172	1034	12	41 HRC

**Tabla 3.** Algunas propiedades mecánicas de la aleación Ti6Al4V

Por otro lado, algunas propiedades mecánicas del Titanio puro comercial son las siguientes (tabla 4):

<b>Titanio Puro Comercial</b>	<b>Resistencia a Tracción [MPa]</b>	<b>Límite Elástico [MPa]</b>	<b>Elongación [%]</b>	<b>Dureza</b>
<b>L-7001 (Ti 99.6)</b>	240-331	170-241	30	120HB
<b>L-7003 (Ti 99.2)</b>	450-517	380-448	25	225 HB
<b>L-7021 (Ti 99.4 Pd)</b>	480-517	380-448	25	200 HB

**Tabla 4.** Propiedades mecánicas de diferentes titanios puro comerciales

Los aleantes mejoran las propiedades con respecto al material puro. Comparando el titanio puro con la aleación Ti6Al4V, se puede observar como mejoran las propiedades de manera significativa. Además, el aumento de los aleantes mejora la resistencia, pero si disminuimos su cantidad aumenta la tenacidad a fractura, la ductilidad y la resistencia a corrosión.

En el apartado “3.1. Estructuras de los Materiales” se explicó que el titanio es un metal alotrópico y por tanto en función de la temperatura y sus aleantes está constituido por un tipo de microestructura diferente. Por tanto, en función del tratamiento térmico al que sea sometido podemos encontrarlo con una microestructura. Las principales microestructuras son las siguientes: equiaxial, martensítica, laminar y bimodal.

### **EQUIAXIAL**

La microestructura equiaxial se obtiene cuando la aleación se somete a las temperaturas  $\alpha+\beta$ . Si después se somete a un recocido con unas temperaturas menores a los 700 °C se forma una microestructura compuesta por granos finos  $\alpha+\beta$  nombrado mil-annealed.

En cambio, si la temperatura en el recocido es superior la fase  $\beta$  pasa a fase  $\alpha$  secundaria con estructura laminar y como resultado da una estructura de granos  $\alpha$  y regiones laminares finas conocidas como  $\beta$ -transformada. La microestructura final es la dúplex.

### **MARTENSÍTICA**

Ese tipo de microestructura se forma como consecuencia de un enfriamiento rápido desde temperaturas superiores a  $\beta$ -transus.

### **LAMINAR**

En este caso, las microestructuras laminares surgen como resultado de someter a un enfriamiento lento desde temperaturas superiores a  $\beta$ -transus hasta una región bifásica. La estructura resultante está formada por placas gruesas  $\alpha$  y placas finas  $\beta$  unidas formando paquetes.

### **BIMODAL**

Por último, esta microestructura está compuesta por granos  $\alpha$  aislados en una matriz  $\beta$ . Para poder obtener esta estructura es necesario someter el material a un recocido de 950 °C, a un temple en agua y finalmente a un envejecimiento a 600 °C



## 4. PLANIFICACIÓN EXPERIMENTAL

En este apartado se va a comentar los pasos seguidos en este proyecto para realizar los diferentes ensayos y la obtención de los datos correspondientes.

En primer lugar, es necesario obtener las muestras que van a ser objeto de estudio. Debido a que se van a estudiar 3 muestras fabricadas mediante tecnología de fabricación aditiva y además dos de ellas son sometidas a un proceso adicional de HIP, es necesario comprar las muestras a una empresa externa.

En segundo lugar, se preparan las muestras iniciales para obtener las probetas que serán sometidas a los ensayos de flexión y tracción.

En tercer lugar, una vez realizados los ensayos de flexión y tracción, se procederá a la preparación de las muestras para su observación al microscopio y realizar una caracterización microestructural. Estas muestras serán observadas tanto en microscopio óptico como electrónico.



## 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este epígrafe se explicará detalladamente todo el proceso experimental llevado a cabo durante la realización del proyecto. Se explicarán los diferentes ensayos realizados y también como se han preparado las muestras de Ti6Al4V para someterlos a dichos ensayos. Además, se explicará cómo se obtuvieron las muestras.

Otro aspecto importante es la maquinaria y equipos utilizados para realizar los ensayos y respectivas preparaciones de muestras.

Los diferentes procesos, ensayos y la maquinaria y equipos empleados en el proceso experimental se utilizaron en función de la capacidad y disponibilidad del departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales de la Universidad Politécnica de Valencia.

### 5.1. Obtención de las muestras

Como ya es sabido, las muestras que se van a estudiar son de la aleación Ti6Al4V. Debido a que están fabricadas mediante EBM y sometidas a HIP dos de ellas, es necesario comprarlas a una empresa externa. Esto se debe a que para ambos procesos se necesitan unas máquinas de un coste elevado y para fabricar pocas piezas para estudio y no para uso comercial no es rentable económicamente.

El estudio se va a hacer con 3 escenarios de fabricación diferentes:

#### Escenario 1

El primero de los escenarios es aleación de Ti6Al4V como los otros escenarios, pero está fabricado mediante EBM y posteriormente sometido a HIP (ilustración 18).

El proceso de HIP se hizo a una presión de 150 MPa y una Temperatura de 1200 °C durante 120 minutos con un enfriamiento de 500 °C/min.



**Ilustración 18.** Muestra escenario 1, Ti6Al4V con EBM e HIP y enfriamiento de 500 °C/min

## Escenario 2

El escenario 2 al igual que el 1 es aleación de Ti6Al4V fabricado por EBM y sometido a HIP posteriormente (ilustración 19). La diferencia con el escenario 1 es la velocidad de enfriamiento, esto provocará la formación de una microestructura diferente y por tanto habrá diferencias en sus propiedades. El proceso HIP también se realiza con una presión de 150 MPa y una temperatura de 1200 °C durante 120 minutos. En este caso la velocidad de enfriamiento es de 100 °C/min.



**Ilustración 19.** Muestra escenario 2, Ti6Al4V con EBM e HIP y enfriamiento de 100 °C/min

### Escenario 3

Por último, en este caso también es la aleación de Ti6Al4V fabricada mediante EBM, pero en esta ocasión no se somete al proceso adicional de HIP (ilustración 20).

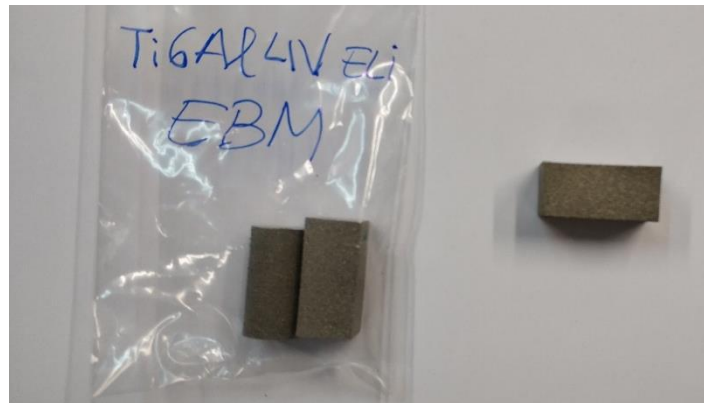


Ilustración 20. Muestra escenario 3, Ti6Al4V con EBM

Las muestras de los escenarios 1 y 2 presentan una forma de prisma rectangular. Las dimensiones son las siguientes:

- Altura (H): 57 mm
- Sección cuadrada de 12 mm de lado

### 5.2. Preparación de las muestras

Para poder realizar los ensayos metalográficos y ensayos mecánicos es necesario seccionar las muestras para más adelante obtener las probetas que serán ensayadas.

En primer lugar, las muestras del escenario 3 ya están seccionadas en 3 piezas.

Las muestras de los escenarios 1 y 2 se cortarán para obtener de cada escenario dos muestras de 27 mm de longitud y una muestra de 2 mm.

Para realizar este proceso se llevará a

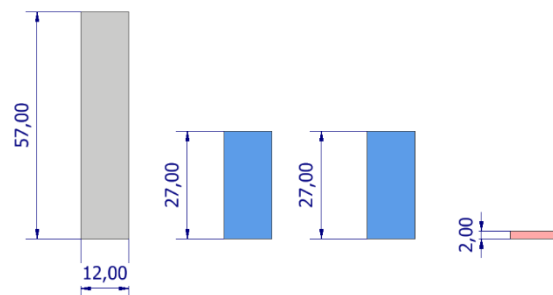
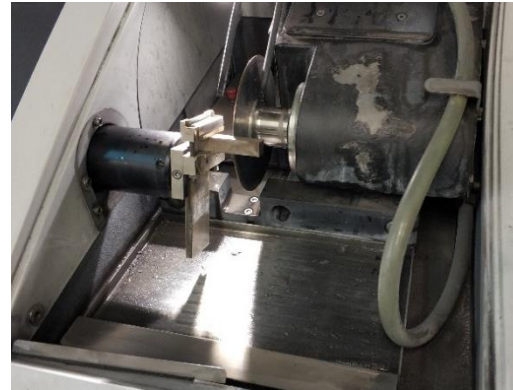


Ilustración 21. Representación de las dimensiones de la muestra y tras los cortes

cabo en una tronzadora más concretamente la Struers Accutom 10 (ilustración 22)



**Ilustración 22.** Tronzadora Struers Accutom 10

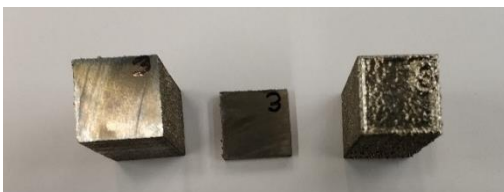
El corte de las piezas debe ser controlado ya que si el tiempo empleado es excesivamente elevado puede afectar a la superficie en contacto con el disco de corte. Las condiciones óptimas para realizar el corte son de una velocidad de giro entre 3000-3500 rpm y un avance de unos 0.015-0.020 mm/s. Además, se inclina la muestra para mejorar el ángulo de ataque. Debido a que el espesor es de 12 mm se opta por una longitud de corte como mínimo de 20 mm.

De esta forma se realizan los cortes uno a uno. Con estas variables, el tiempo total de un corte es de unos 22 minutos.

También hay que tener en cuenta que el propio disco y la tronzadora con cada corte se come 0,5 mm de la pieza.

El resultado final fue el siguiente:

El escenario número 1 fue marcado con el número 3 mientras que el escenario 2 fue marcado con el número 6 (ilustraciones 23 y 24).



**Ilustración 23.** Muestra del escenario 1 cortada

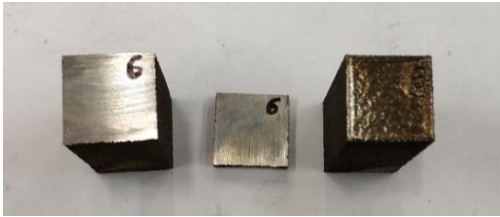


Ilustración 24. Muestra del escenario 2 cortada

### 5.3. Caracterización mecánica

La caracterización mecánica de las muestras de los diferentes escenarios permite estudiar algunas de las propiedades mecánicas del material en función del proceso de fabricación y de su enfriamiento.

A continuación, se van a detallar los dos ensayos realizados para la caracterización mecánica. Consisten en el ensayo a tracción y el ensayo a flexión a 4 puntos.

#### 5.3.1 Ensayo de tracción

En este apartado voy a explicar en que consiste el ensayo de tracción y como se llevó a cabo.

El ensayo de tracción es uno de los ensayos más importantes de caracterización mecánica de los materiales. El objetivo es obtener la resistencia y plasticidad del material sometido.

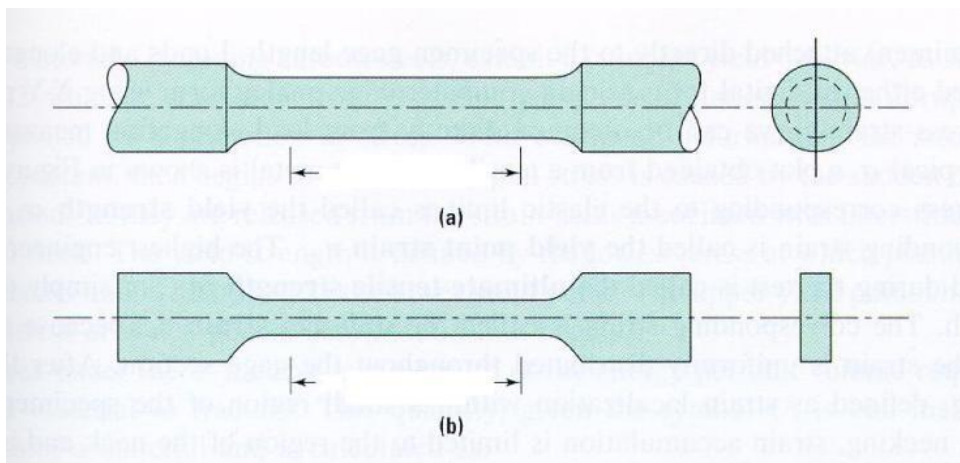
Primeramente, hay que considerar que, si sobre la superficie de una pieza se aplica una carga o bien estática o bien que cambia lentamente con el paso del tiempo, se producirá una deformación. Esta deformación dependerá de las propiedades mecánicas de dicho material.

Las tensiones se representan mediante la letra sigma " $\sigma$ " y las deformaciones mediante la letra épsilon " $\epsilon$ ".

El ensayo de tracción consiste básicamente en someter la muestra de un material a unas fuerzas uniaxiales de tracción hasta la rotura. La muestra del material presenta una geometría y dimensiones controladas.

Se considera un ensayo cuasiestático porque la fuerza aplicada es una fuerza estática o que varía gradualmente.

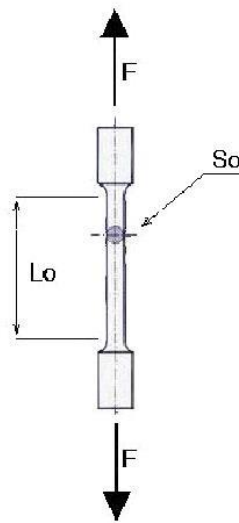
El primer paso para realizar el ensayo es obtener las probetas. Estas probetas están normalizadas o bien presentan unas dimensiones controladas. La geometría de la probeta puede presentar una sección circular o rectangular como se aprecia en la ilustración 25.



**Ilustración 25.** Geometría de las probetas para ensayo a tracción. Probeta de sección circular (a), probeta de sección rectangular (b) [15]

La probeta presenta una sección central rebajada. Esta sección es la zona que va a sufrir las mayores deformaciones y por último la rotura. Además, la sección de la probeta será o circular o bien rectangular en función del material o de la dificultad para obtener una de las probetas.

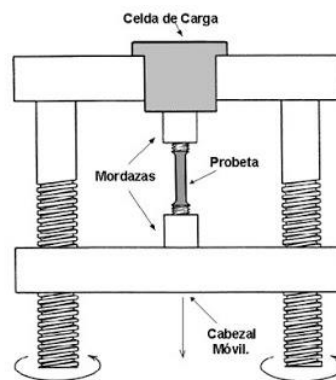
Por otro lado, en la sección rebajada comentada anteriormente, se marcará una zona o distancia de control denominada como longitud calibrada de la probeta. Esta zona se aprecia mejor en la ilustración 26, es la longitud marcada como “Lo”. Este valor y la sección de la probeta son esenciales para calcular las propiedades del material una vez obtenidos los datos del ensayo.



**Ilustración 26.** Probeta de tracción [16]

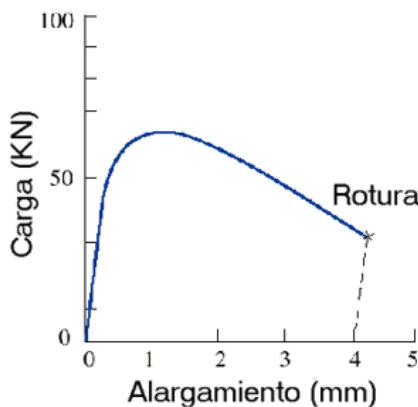
El ensayo de tracción se realiza con el uso de una Máquina Universal de Ensayos. Estas máquinas presentan una estructura bastante sencilla (ilustración 27). En primer lugar, posee una célula de carga que es la encargada de medir los esfuerzos aplicados en todo momento. Para sujetar las probetas y poder aplicarles las cargas, la máquina posee una mordaza superior y otra mordaza inferior. Finalmente, presenta una cruceta que es la encargada de aplicar los esfuerzos ya que es una parte móvil.

El funcionamiento de la máquina debe cumplir unas necesidades. La primera de ellas es que sea capaz de aplicar el alargamiento a la probeta de forma constante. La segunda, es que la máquina sea capaz de medir los datos de la fuerza y el alargamiento de forma simultánea y continua.

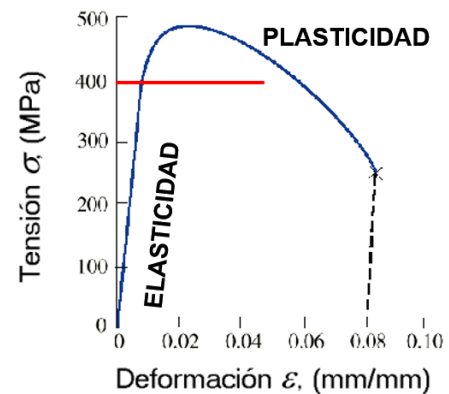


**Ilustración 27.** Esquema de una máquina universal de ensayos [16]

Como mencioné la máquina debe ser capaz de medir tanto la fuerza aplicada como el alargamiento producido. Esto proporciona un gráfico fuerza-alargamiento una vez finalizado el ensayo. El eje de ordenadas corresponderá a la Fuerza en kN mientras que el eje de abscisas será el del alargamiento en mm. Generalmente, para ensayos de materiales metálicos se obtiene gráficos con una forma similar a la siguiente (Gráfico 2):



**Gráfico 3.** Gráfico carga-alargamiento de ensayo a tracción.



**Gráfico 2.** Gráfico tensión-deformación

Una vez obtenida la gráfica de carga-alargamiento (Gráfico 2), con estos valores se calculan los valores de tensión y deformación correspondientes ya que éstos no dependen de las dimensiones del material y permiten obtener las características resistentes intrínsecas del material. Como vemos en el gráfico 3, ese sería el resultado tras pasar a tensión y deformación.

Para poder pasar de unos valores a otros consiste en aplicar las siguientes ecuaciones:

$$\text{Tensión [MPa]} \longrightarrow \sigma = \frac{F}{S_0}$$

$$F = \text{Carga (N)}$$

$$S_0 = \text{Superficie donde se aplica la carga (mm}^2\text{)}$$

$$\sigma = \text{Tensión (MPa)}$$



$$\text{Deformación [-]} \longrightarrow \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$\Delta L = \text{Alargamiento (mm)}$

$L_0 = \text{Longitud de referencia o calibrada (mm)}$

$\varepsilon = \text{Deformación (-)}$

Por otro lado, en este ensayo se calculará el módulo elástico y la resistencia a tracción. Para el módulo elástico se obtendrá la pendiente en la zona elástica y la resistencia corresponde con el mayor valor de tensión al que se somete la probeta.

En el gráfico 3 se observan dos zonas:

- ❖ La primera de ellas es la zona elástica. Esta zona se caracteriza por presentar una correlación lineal entre las tensiones y las deformaciones. Esto significa que, para las tensiones dentro de esta zona, el material presenta un comportamiento elástico y por tanto cuando se deja de aplicar la carga el material recupera su forma inicial sin sufrir ninguna deformación permanente.

El límite de esta zona es conocido como límite elástico. Este punto se corresponde con la tensión máxima que soporta el material en condiciones elásticas.

También existe el límite elástico aparente. Este límite representa la tensión máxima que soporta el material tras aplicarle una deformación plástica equivalente a 0,2%.

- ❖ La segunda zona es la denominada zona plástica. Las tensiones aplicadas en esta zona provocan una deformación permanente en el material una vez se dejen de aplicar. El límite es el punto de rotura que como bien indica su nombre, se da cuando la probeta alcanza una deformación que no puede soportar y acaba rompiéndose.

En este proyecto se optó por utilizar probetas de sección rectangular. De cada escenario se obtuvieron 6 probetas para ensayar de una longitud de 12 mm y un espesor de entre 1,3 y 1,5. Además en cada escenario existe una probeta de un espesor mayor, de alrededor de 2 mm. Como vemos en la ilustración 28 y debido a las medidas comentadas, son unas probetas pequeñas. Para poder agarrarlas a la máquina de ensayos fue necesario hacer una mordaza especial.



**Ilustración 28.** Probeta de sección rectangular preparada para ser ensayada.

La máquina universal de ensayos empleada es de la compañía Shimadzu de la gama AG-Xplus capaz de aplicar hasta 100kN (ilustración 29). Se puede ajustar tanto manualmente con un mando de control que incorpora la propia máquina o también a través de un ordenador conectado. Además, en el ordenador se registra de forma simultánea los datos del ensayo.



**Ilustración 29.** Maquina universal de ensayos Shimadzu



**Ilustración 30.** Montaje del ensayo de tracción.

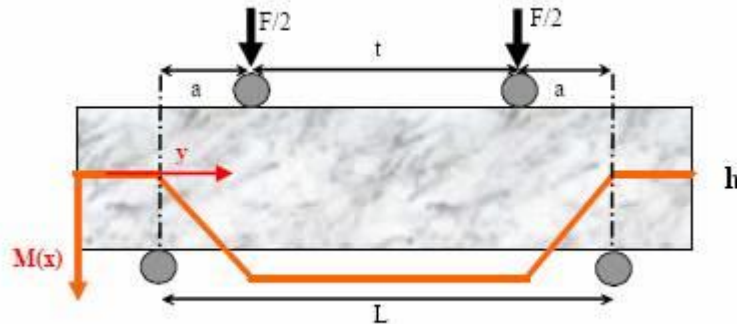
Por último, es necesario marcar las probetas. Como se aprecia en la ilustración 28, la probeta se marca de negro y a la distancia de control se marca de blanco para hacer contraste. Esto se debe a que la máquina de ensayos mide el alargamiento de dos formas distintas. Uno de ellos es con la cruceta móvil, pero esto puede inducir a error debido a pequeños ajustes de la probeta cuando empieza el ensayo. El otro método para medir el alargamiento es a través de una cámara que reconoce el contraste marcado anteriormente, video extensometría. Una vez marcadas las probetas, se colocan en las mordazas específicas y se aproximan manualmente para tensar la probeta, pero sin aplicar un esfuerzo. Esto ahorra tiempo en el ensayo. Este ensayo es rápido y se pueden ensayar las probetas de un escenario en poco tiempo.

### 5.3.2 Ensayo de flexión

El siguiente ensayo que se realizó para caracterizar las propiedades mecánicas de los diferentes escenarios de fabricación, fue el ensayo de flexión.

En este proyecto se optó por un ensayo de flexión a 4 puntos (ilustración 31). La ventaja del ensayo a 4 puntos respecto al de 3 puntos es que la zona central de

la probeta se somete a una tensión uniforme y además el momento flector en la zona central es constante.



**Ilustración 31.** Esquema de un ensayo de flexión 4 puntos y representación de la distribución de momentos [17]

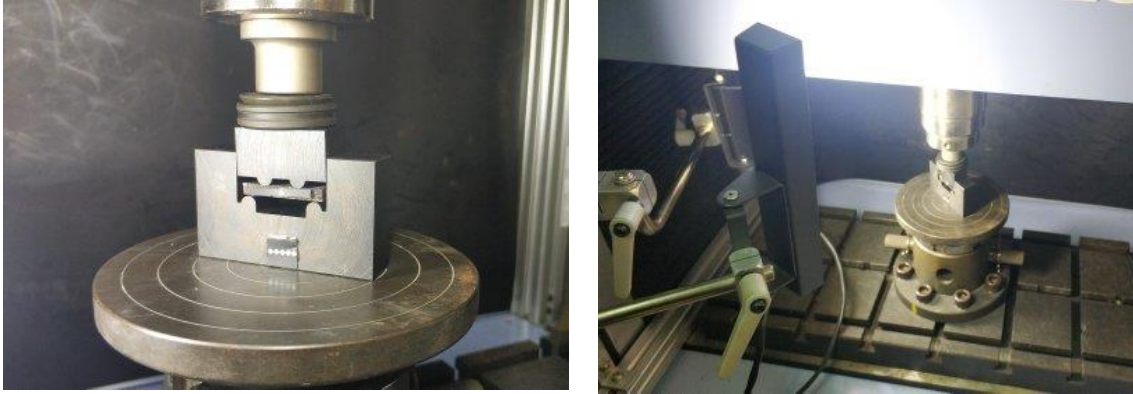
La flexión es una deformación provocada en elementos estructurales alargados en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. El ensayo de flexión se utiliza para evaluar el comportamiento del esfuerzo de deformación de un material, así como la resistencia a flexión de este. Con este ensayo se obtiene una curva carga-desplazamiento.

Para realizar el ensayo se utilizó la misma máquina universal de ensayos que para el ensayo de tracción (ilustración 29). En este caso se cambiará el utillaje para poder realizar el ensayo. Como se aprecia en la ilustración 31, la probeta se coloca sobre una base fija en forma de “U” con dos apoyos cilíndricos. La carga se aplica sobre la parte superior a través de una pieza rectangular con otros dos apoyos cilíndricos.

En este caso es necesario conocer la longitud entre los dos apoyos y las dimensiones del espesor y el ancho de las probetas. La geometría de la pieza es básicamente un prisma rectangular. Los espesores de las muestras de los 3 escenarios varían de 3,00 a 4,00 mm mientras que el ancho entre 12,00 y 12,30 mm. La longitud entre apoyos es de 22 mm.

Para medir la flecha, igual que ocurría con el ensayo de tracción, se obtienen dos mediciones. La primera de ellas es por la cruceta móvil y la otra flecha que es la que consideraremos en los datos, es la captada por la cámara. Para ello,

el lateral de la probeta se pintará de negro para que exista mayor contraste. En la zona central se colocará un pequeño rombo de color blanco y en la base fija de los apoyos se colocará otra fila de rombos blancos que se tomarán de referencia en el ordenador para medir la flecha (ilustración 32).



**Ilustración 32.** Montaje del ensayo de flexión a 4 puntos

Las ecuaciones empleadas son las correspondientes al ensayo de flexión a 4 puntos y con relación a medios. La relación a medios hace referencia a la distancia entre apoyos. La distancia entre apoyos superiores (11 mm) y la mitad de la distancia entre apoyos inferiores (22 mm).

$$\text{Esfuerzo de flexión rectangular, tensión [MPa]} \longrightarrow \sigma = \frac{0,75 \cdot F \cdot L}{b \cdot h^2}$$

$\sigma$  = Tensión (MPa)

$F$  = Fuerza (N)

$L$  = Distancia entre apoyos inferiores (mm)

$b$  = Ancho (mm)

$h$  = Espesor (mm)

$$\text{Deformación de flexión rectangular} \longrightarrow \varepsilon = \frac{4,36 \cdot D \cdot h}{L^2}$$

$\varepsilon$  = Deformación (—)

$D$  = Deflexión (mm)

$h$  = Espesor (mm)

$L$  = Distancia entre apoyos (mm)

Módulo de flexión rectangular  $\longrightarrow E = \frac{0,17 \cdot pendiente \cdot L^3}{b \cdot h^3}$

$E = \text{Módulo (MPa)}$

$$pendiente = \frac{\Delta F}{\Delta D}$$

$L = \text{Distancia entre apoyos (mm)}$

$b = \text{Ancho (mm)}$

$h = \text{Espesor (mm)}$

## 5.4. Caracterización Microestructural

Para realizar la caracterización microestructural se ha procedido a una preparación metalográfica, de esta forma poder identificar las fases presentes en cada muestra. Esto permitirá apreciar los cambios microestructurales en la misma aleación a causa de las diferencias en el proceso de fabricación. Además, este ensayo es fundamental ya que las estructuras cristalinas de los metales definen su comportamiento.

### 5.4.1 Obtención de las muestras

Para poder llevar a cabo este estudio, es necesario una previa preparación de las muestras para poder observarlas en el microscopio de forma óptima.

En primer lugar, como sabemos las muestras se cortaron en 3 piezas más pequeñas. Dos de 27 mm y otra de 2 mm. Para la caracterización microestructural se empleará la muestra de 2 mm para microscopía electrónica de barrido (SEM). También se elegirán de las muestras ensayadas a flexión 3 piezas de cada escenario para la preparación metalográfica.

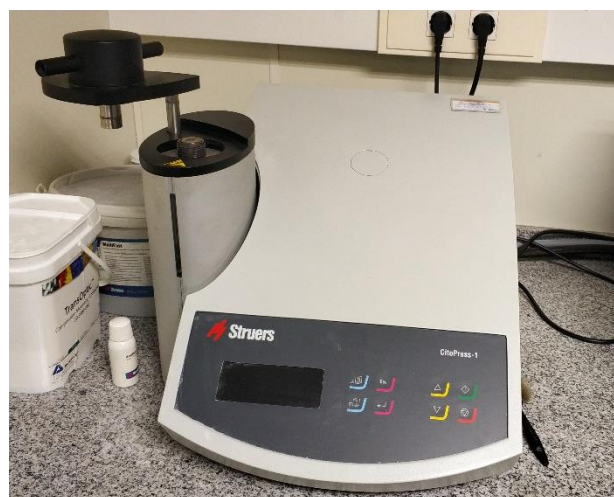
#### 5.4.2 Embutición de las muestras

Como vemos, son muestras muy pequeñas, para manipularlas correctamente es necesario su embutición en resinas. La resina que se utilizará es la resina ClaroFast (tabla 5) de la empresa Struers. Es una resina acrílica transparente de embutición en caliente, es termoplástica.

COMPOSICIÓN CLAROFEST	
Componentes	Proporción en %
Polímero de metacrilato	60-100
Metacrilato de metilo	0.1-<1
Peróxido de dibenzoílo	0.1-<1

**Tabla 5.** Composición de la resina ClaroFast

Para aplicar la resina ClaroFast se utiliza una prensa hidráulica en caliente del fabricante Struers, más concretamente el modelo CitoPress-1 (ilustración 33). La prensa CitoPress-1 cuenta una pantalla LCD donde muestra los parámetros introducidos mediante el panel táctil para el correcto proceso.



**Ilustración 33.** Prensa CitoPress-1

En cuanto a los parámetros óptimos para la resina ClaroFast según el fabricante

son los siguientes (tabla 6):

Resina		Calentamiento			Enfriamiento		Tiempo
Tipo	Cantidad	Tiempo	Temp.	Presión	Tiempo	Velocidad	Total
	[ml]	[min]	[°C]	[bar]	[min]		[min]
ClaroFast	15	3.5	180	350	6	Low	9.5

**Tabla 6.** Parámetros para un cilindro de 25 mm de diámetro de ClaroFast

El proceso para embutir las muestras es sencillo y rápido:

- ❖ Primero, la muestra que queramos embutir se limpia para evitar que se embuta con algún elemento de suciedad.
- ❖ Seguidamente, se abre el cilindro de la prensa desenroscándolo y se limpia bien las partes móviles para que una vez finalizado el proceso sea más fácil extraer la pieza.
- ❖ Una vez esté todo limpio, se sube el pistón y la superficie de la muestra que se desee analizar se coloca hacia abajo en el interior y centrado.
- ❖ Después, con la ayuda de una cuchara se echa la resina ClaroFast, en forma de polvo, que sea necesaria, pero se deja una pequeña porción. A continuación, se coloca una etiqueta para identificar la muestra y saber a qué escenario pertenece y se termina de cubrir con la resina restante.
- ❖ Finalmente, se hace descender el pistón hasta su posición más baja. Se cierra y se introducen en la prensa los parámetros de la tabla 6. Pasados 9,5 minutos se habrá embutido la muestra.

Finalizado el proceso se extrae la muestra y este proceso se repite con el resto de los escenarios y muestras que sean necesarias.



### 5.4.3 Desbaste

Una vez obtenidas las muestras embutidas es necesario someterlas a unos procesos para prepararlas para su estudio. En este apartado se explicarà el primero de esos procesos que consiste en un desbaste.

El desbaste consiste en eliminar una capa de material para conseguir exponer una superficie del metal sin impurezas que no permitan realizar su posterior examen y ademàs se le confiere una configuraci3n plana.

El proceso de desbaste està conformado por 3 etapas principales: desbaste grueso, intermedio y desbaste final. En ese orden, se va consiguiendo una superficie màs plana y con menos impurezas conforme se avanza hasta llegar el desbaste final.

El desbaste lo voy a realizar en unas cintas de desbaste del fabricante Struers y el modelo es Labopol-25 (ilustraci3n 34).



**Ilustraci3n 34.** Cintas de desbaste Labopol-25 del fabricante Struers

#### 5.4.3.1 Desbaste grueso, intermedio y final

El primer paso consiste en el desbaste grueso. Se realiza nada más extraer la probeta de la prensa. El objetivo de este desbaste es eliminar las grandes impurezas que existan por el proceso de embutición. Además, también se eliminan rebabas y se desbastan los bordes para agarrar mejor la probeta.

Para desbastar se utilizan unos discos abrasivos. Los discos abrasivos son unas piezas circulares compuestas por granos abrasivos triturados. Para unir estos granos se utiliza un aglutinante y se fijan a un material de soporte. En cuanto al material de este grano, puede de ser sintético, cerámicos, diamante, etc. En función del material que se desee desbastar se empleará un disco u otro.

Debido a que se utilizan discos abrasivos es necesario tener control de la presión que se ejerce para evitar una gran distorsión y un aumento de la temperatura de la superficie que pueda alterar los futuros resultados morfológicos de la muestra.

El procedimiento consiste en desbastar cada una de las muestras embutidas ejerciendo presión sobre los discos. Se empieza con el disco con el grano más abrasivo y cuando se cambia de disco, la posición de la pieza se cambia girándola 90°. Esto se debe a que cuando se desbasta, la superficie se raya en la dirección del disco abrasivo. Para eliminar este rayado con el siguiente disco se gira 90° y así se consigue eliminar el anterior rayado.

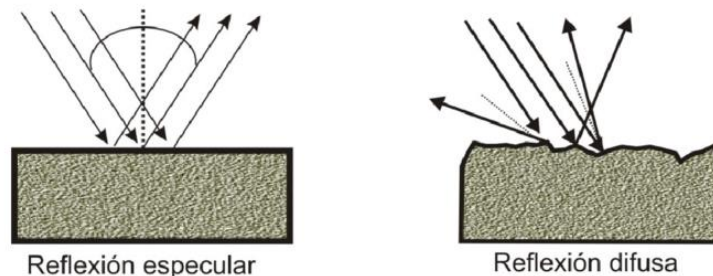
El primer disco utilizado es de un tamaño de grano de 220. Posteriormente se empleará un paño de 500.

Los sucesivos desbastes son el intermedio y final. El objetivo de estos desbastes es ir utilizando paños menos agresivos para ir reduciendo las huellas anteriores y conseguir un rayado muy pequeño que se puede eliminar con el posterior pulido. Los paños empleados son los de 1000 y 2000.

#### 5.4.4 Pulido

La etapa de pulido consiste en eliminar las huellas o rayado dejado por el último disco de desbaste abrasivo y así obtener una superficie especular.

Una superficie especular es aquella superficie ideal en la que se cumple la ley de la reflexión. Esto significa que los rayos que se incidan sobre esta superficie se reflejarán con el mismo ángulo de incidencia. Como se observa en la ilustración 35, que a diferencia de la reflexión especular la reflexión difusa es la que tienen las muestras antes de pulirlas y por tanto no se puede saber como se reflejará la luz.



**Ilustración 35.** Comparación entre la reflexión especular y la difusa [18]

Es necesario que la superficie cumpla con la reflexión especular para cuando sea atacada, refleje los rayos de luz para poder observar la estructura en el microscopio.

El proceso de pulido se consigue con una máquina pulidora mecánica. Para ello se realiza sobre un paño y con un abrasivo. Estos abrasivos son compuestos de finas partículas con aristas y vértices cortantes que se encuentran sobre un líquido. Los abrasivos más empleados, suelen ser los de diamante y alúmina.

Para comenzar, el paño se impregna con el líquido abrasivo y las muestras desbastadas se mantiene sobre el paño girando y el paño también gira. Una vez finalizado el pulido, se limpia la muestra con agua. Después se impregna de alcohol y con aire se evapora. Así ya estaría preparada la muestra para someterla al ataque.

Para nuestro estudio, la máquina pulidora que se empleará es del fabricante Struers el modelo LaboPol-5 (ilustración 36). En cuanto al abrasivo, se utilizará una pasta de diamante.



Ilustración 36. Máquina pulidora Struers LaboPol-5

El proceso de pulido es el siguiente:

- Se coloca el recipiente con el abrasivo en el dispensador automático. Este dispensador irá rociando gota a gota de abrasivo sobre el paño.
- Seguidamente, se coloca el paño sobre la base. La base y el paño se unen por atracción magnética. Se aplicará un poco del líquido abrasivo de diamante para comenzar el pulido con el disco húmedo.
- Las muestras se colocan en el cilindro metálico. Como se aprecia en la ilustración 37, este cilindro dispone de 3 orificios que permiten sujetar 3 muestras de forma simultánea. Este cilindro también hace rotar las muestras. Para sujetar las muestras, éstas se colocan sobre el disco y se baja el cabezal



Ilustración 37. Soporte cilíndrico de la pulidora Struers LaboPol-5

cilíndrico para que se queden dentro de estos orificios. Después mediante un muelle y una rosca se hace fuerza sobre la superficie superior de cada muestra contra el disco.

- A continuación, se introducen los parámetros, en la pulidora, de velocidad y tiempo. Ya estaría preparada para su funcionamiento.
- Finalmente, cuando se termina de pulir se retiran las 3 muestras y se limpian con agua. Por último, se humedece en alcohol y se secan con aire.

En este momento las muestras estarían preparadas para atacarlas.

#### 5.4.5 Ataque Químico

El ataque químico se realiza justo después del pulido. Cuanto antes se realice mejor ya que se evita que se raye la superficie pulida. El objetivo del ataque es poder observar la estructura de la muestra como los bordes de granos y todos los constituyentes estructurales. Para hacer esto posible, se utiliza un reactivo sobre la superficie deseada. Como resultado, con la ayuda de un microscopio se pueden observar los diferentes elementos estructurales ya que las fases y los planos orientados presentan diferencias al ataque químico.

Normalmente, los reactivos que se utilizan son ácidos (orgánicos o inorgánicos) y sustancias complejas disueltas en agua o alcohol. Es importante la elección del reactivo de ataque, así como la temperatura y el tiempo que se aplica. Para ello es importante hacer un estudio previo para elegir lo óptimo para obtener los resultados deseados.

El tiempo de ataque es muy importante ya que un ataque escaso no provocaría un contraste óptimo entre las diferentes fases y bordes de grano. Por otro lado, un ataque demasiado largo también dificultaría la distinción de las fases y los granos serían muy anchos.

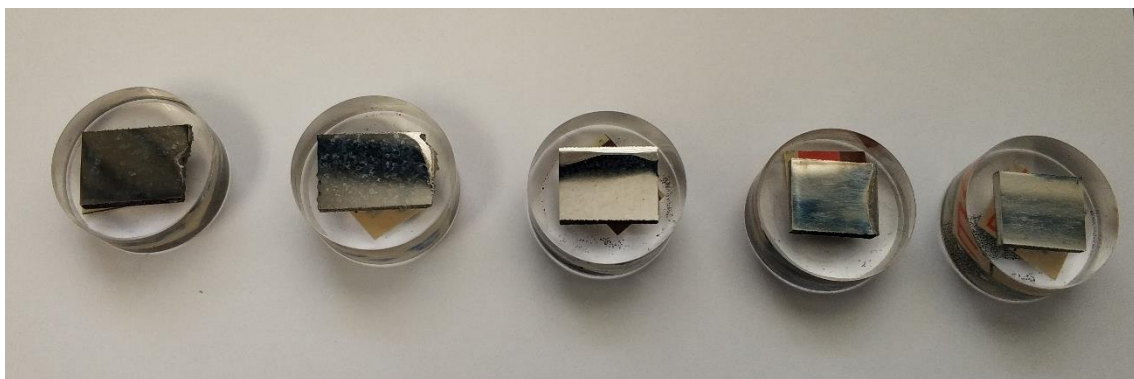
Finalizado el ataque, igual que en etapas anteriores, se procede a limpiar la probeta. Se lava con agua y se humedece con alcohol. Por último, se seca con aire. En este punto, las muestras están preparadas para observarlas al microscopio.

En nuestro estudio se utilizará para el ataque químico el reactivo Kroll. El compuesto Kroll (tabla 7) es una solución química ácida.

Composición Kroll		
3 ml HF	6 ml HNO <sub>3</sub>	100 ml H <sub>2</sub> O

**Tabla 7.** Composición del ácido denominado Kroll

Para aplicar el ácido se introduce la superficie interesada en el reactivo. Pasado el tiempo necesario, no más de unos pocos segundos, se limpia la superficie con agua destilada y se seca con aire. Una vez finalizado este proceso, la superficie perfecta y con aspecto de espejo queda de un color más oscuro y a simple vista se pueden apreciar ciertas estructuras (ilustración 38).



**Ilustración 38.** Ejemplo de las muestras tras someterlas al ataque químico

#### 5.4.6 Errores en la preparación

Durante la preparación de las muestras para metalografía se pueden producir una serie de defectos que se tienen que evitar ya que éstos dificultan la observación de la estructura del material.

El primero de estos defectos es el rayado. Es un error bastante común durante el desbaste de las probetas si no se elimina correctamente el rayado anterior. Si no se soluciona, el rayado puede verse tras el pulido.

El siguiente de estos defectos es la deformación plástica que no se puede apreciar hasta que se realiza el ataque. La deformación plástica provoca defectos superficiales.

Otro defecto provocado en el pulido debido a la abrasión son arranques de material. Eso provoca una serie de cavidades en la muestra que se producen por utilizar una fuerza excesiva y también por selección de un paño inadecuado.

Por último, un defecto relacionado con el paño, así como el abrasivo y lubricante es que queden restos de partículas de abrasivos incrustadas en las muestras.

#### 5.4.7 Microscopia óptica

La microscopia óptica es el primer paso para evaluar la microestructura de las diferentes muestras. Esta técnica consiste en observar las muestras con lentes de aumento con el uso de luz visible. Este es el método convencional de microscopia, inventado siglos atrás pero que se sigue utilizando hoy en día.

En cuanto a tipos de microscopios podemos encontrar una gran variedad en función de la resolución y contraste que se desee. En primer lugar, está el microscopio simple, este tipo de microscopio solamente utiliza una lente para

ampliar la imagen. El siguiente microscopio es el compuesto, este está formado por varias lentes para conseguir una mayor resolución. Este es el microscopio óptico más empleado en la investigación. También existen los microscopios digitales, que consisten en microscopio o bien simples o compuestos, pero se visualiza la imagen a través de un ordenador.

Otro tipo de microscopios son el de comparación que permite observar dos muestras al mismo tiempo y el microscopio invertido que permite ver la muestra desde abajo.

En este caso se empleará un microscopio óptico digital compuesto del fabricante Nikon, de la serie Eclipse LV-N (ilustración 39). Este microscopio lleva un software propio para tratar las imágenes y el cambio de las lentes se hace de manera automática, así como el control de la platina, enfoques, brazo y condensador. Además, posee objetivos de aumento de 50,100,200,500 y 1000 aumentos.



**Ilustración 39.** Microscopio óptico Nikon Eclipse LV-N



#### 5.4.8 Microscopia electrónica de barrido

En este apartado se va a explicar el segundo método de microscopia empleado para caracterizar la microestructura de cada una de las muestras. En este caso se utilizará la Microscopia electrónica de barrido (SEM).

La principal diferencia entre el microscopio electrónico de barrido y la microscopia óptica es que no se utiliza la luz para visualizar las muestras. En este caso se emplean electrones para formar la imagen. Esto permite obtener una mayor resolución y profundidad, por tanto, se puede realizar un mejor estudio y obtener más información que con el microscopio óptico.

##### 5.4.8.1 Funcionamiento SEM

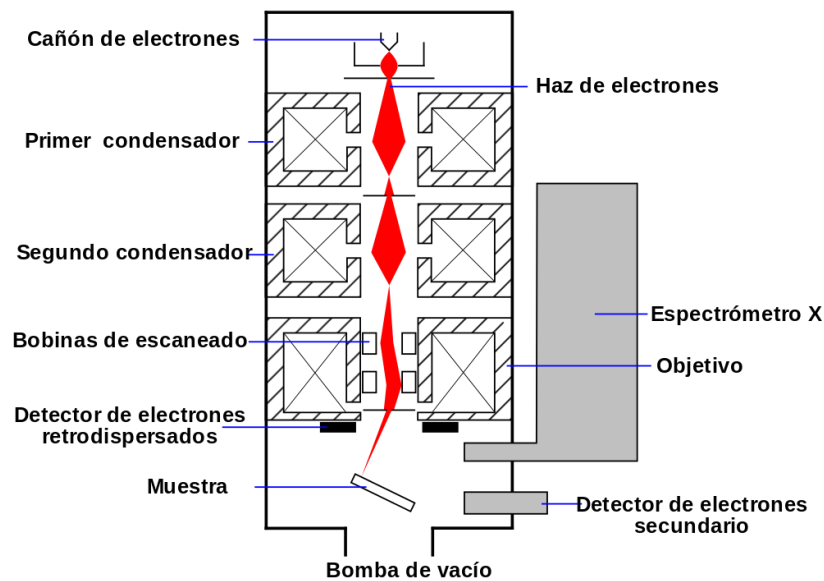
Primero de todo, la muestra tiene que ser conductora. Normalmente para ello se suele colocar una lámina de un metal conductor sobre la superficie de la muestra para otorgarle esa propiedad.

Una vez que se prepara las muestras, el microscopio consigue acelerar electrones en un campo eléctrico. Para hacer esto posible, se utiliza un filamento que genera los electrones y mediante diferencial de potencial se aceleran. Esta diferencia de potencial puede variar desde los 50 V hasta los 30000 V. Los electrones acelerados mediante altos voltajes se suelen utilizar para el estudio de muestras metálicas y los voltajes menores se emplean para muestras biológicas. Esto es debido, a que las muestras biológicas y otras muestras sensibles pueden resultar dañadas a elevados voltajes. En cambio, las probetas metálicas no son dañadas y los altos voltajes permiten una mejor visualización.

Seguidamente, estos electrones emitidos por el filamento se hacen pasar por una serie de lentes condensadoras y por último por un lente objetivo. La función de estas lentes es conseguir reducir la imagen del filamento para que de esta

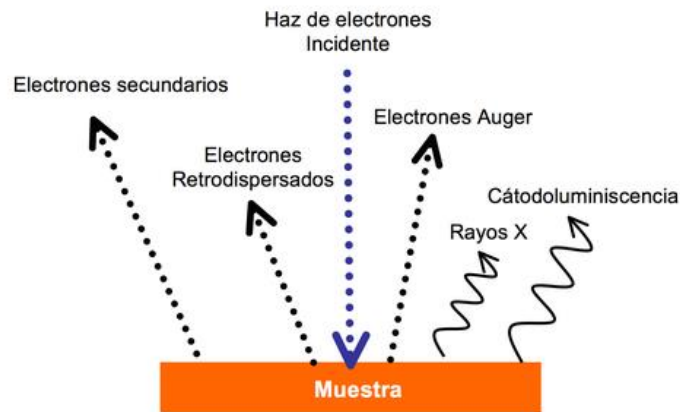
forma se aplique sobre la muestra un haz de electrones más pequeño y así conseguir una mejor imagen.

Como se observa en la ilustración 40, en la etapa final del cañón, en el objetivo se encuentran unas bobinas de escaneado o bobinas deflectoras. Estas bobinas se encargan de realizar el barrido de haz de electrones sobre la superficie de las probetas.



**Ilustración 40.** Representación de un SEM con detector de rayos X [19]

Cuando el haz de electrones incide sobre la muestra, se produce una interacción entre los electrones y los átomos del material. En esa interacción, en función de como reboten los electrones o si pierden energía, se producen diversos efectos (ilustración 41). Estos procesos se pueden captar y observar en función del equipo que se utilice.



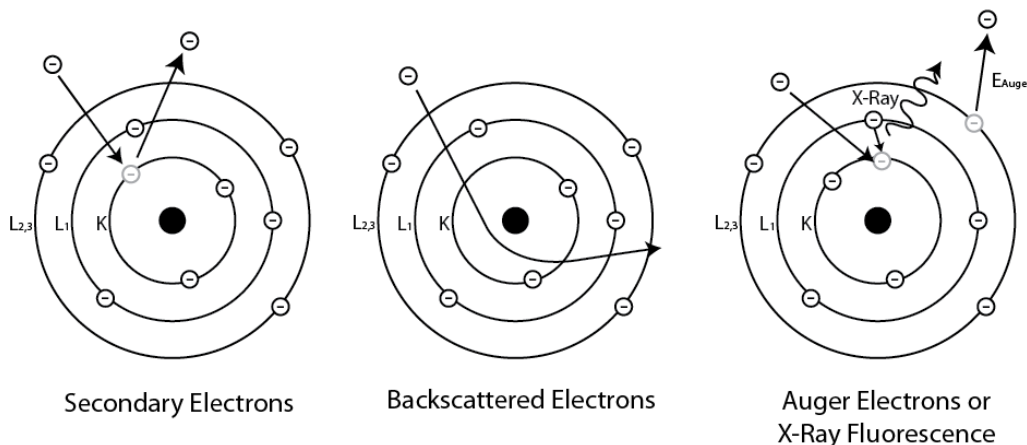
**Ilustración 41.** Esquema de las señales producidas tras hacer incidir el haz de electrones contra la muestra. [20]

Como se observa en la ilustración 41, se producen cinco efectos. A continuación, se va a realizar una pequeña explicación de los 4 más empleados en microscopía electrónica de barrido:

- **Electrones secundarios (SE):** los electrones secundarios son electrones que saltan del átomo. Esto se produce cuando se incide una cantidad de energía suficiente sobre el átomo y es absorbida por un electrón. Además, estos electrones se encuentran cerca de la superficie porque son de baja energía.  
En la microscopía electrónica de barrido, estos electrones son los más empleados para obtener las imágenes. Se obtienen imágenes en blanco y negro y de la mayor resolución posible.
- **Electrones Auger:** el fenómeno de electrones Auger está relacionado con los electrones secundarios. Este fenómeno consiste en que cuando un electrón es expulsado del átomo, ese hueco es ocupado por otro electrón más externo. Debido a este proceso, el átomo presenta un exceso de energía y en ocasiones se compensa emitiendo otro electrón de la capa más externa del átomo. Este último electrón es el electrón Auger.  
Este fenómeno se utiliza para obtener información de los elementos de la

zona superficial de la muestra.

- Rayos X: igual que con el caso de los electrones Auger, el exceso de energía puede producir los rayos X. Los rayos X son radiaciones electromagnéticas con longitud de onda entre 10 nm y 0,01 nm. En función de la longitud de onda es su energía. A mayor longitud de onda menor energía. También proporcionan información de los compuestos de la superficie del material, pero de una mayor zona que los electrones Auger.
- Electrones retrodispersados (BSE): en este caso, cuando se hace incidir el haz de electrones de forma frontal con el núcleo de un átomo, el haz es repelido en sentido contrario. Este efecto es sensible a las variaciones del número atómico que presenten los diversos elementos de la superficie de la muestra.  
En este caso, las imágenes obtenidas son de menor resolución que SE pero es muy útil para obtener la información sobre la composición superficial de la muestra.



**Ilustración 42.** Representación gráfica de los electrones secundarios, electrones retrodispersados, electrones Auger y rayos X. [20]

#### 5.4.8.2 Equipos empleados

En este estudio se emplearán los siguientes equipos para la obtención de datos e imágenes para la caracterización microestructural.

En primer lugar, se utilizará el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) de la marca ZEISS el modelo AURIGA Compact. Este microscopio es capaz de realizar la siguiente función: microscopía combinada de electrones e iones focalizados. Además, incluye detector de rayos X y de electrones retrodispersados difractado del fabricante Oxford Instruments.



**Ilustración 43.** Microscopio Electrónico de Barrido del fabricante ZEISS [21]

Seguidamente, se utilizó el Microscopio Electrónico de Barrido de Emisión de Campo (HRFESEM) de la compañía ZEISS y modelo Gemini SEM 500 (ilustración 44).



**Ilustración 44.** Microscopio Electrónico de Barrido de Emisión de Campo del fabricante Zeiss [21]

## 6. RESULTADOS

En el siguiente apartado se expondrán los resultados obtenidos tras la realización de los diferentes ensayos explicados anteriormente para cada uno de los 3 escenarios de fabricación. Los resultados corresponden a los obtenidos mediante los ensayos de tracción y flexión, así como los ensayos metalográficos.

Además, se mostrarán las diferentes tablas y gráficos obtenidos en los ensayos y tras utilizar las ecuaciones comentadas anteriormente.

A continuación, se muestra una tabla 8 resumen de los tres escenarios que se han sometido a los diferentes ensayos para recordar las diferencias entre cada uno de los escenarios de fabricación.

<b>Escenario</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Material</b>	Ti6Al4V	Ti6Al4V	Ti6Al4V
<b>Fabricación</b>	EBM	EBM	EBM
<b>Post-proceso</b>	HIP enfriamiento 500 °C/min	HIP enfriamiento 100 °C/min	-

**Tabla 8.** Resumen de los 3 escenarios ensayados en el proyecto

### 6.1. Resultados caracterización mecánica

Como se explicó en el epígrafe número 5 “Desarrollo Experimental”, para la caracterización mecánica se han sometido las muestras a dos ensayos: ensayo de tracción y ensayo de flexión.

Con ambos ensayos se pueden obtener las principales propiedades mecánicas de cada uno de los escenarios.

### 6.1.1 Resultados Ensayo a Tracción

En el apartado “5.3.1 Ensayo de tracción” se explicó el proceso del ensayo de tracción. Desde los tipos de probetas, el ensayo y las ecuaciones necesarias para la obtención de las diferentes propiedades del material.

De cada escenario se han ensayado 6 muestras diferentes. En primer lugar, se van a comentar los resultados obtenidos en el escenario 1.

#### 6.1.1.1 Resultados Tracción Escenario 1

Este primer escenario, cada una de las muestras han sido marcadas como 1 del escenario 1 y una letra desde la a hasta la f, tabla 9.

Las medidas de las muestras, como se explicó, corresponden con el espesor de la probeta y el ancho de la sección central que es por donde se produce la rotura. También se mide la longitud calibrada.

Muestras	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Longitud Calibrada(mm)
1A	1,506	2,110	9,666
1B	1,380	2,210	8,940
1C	1,427	2,130	9,060
1D	2,401	2,200	9,388
1E	1,318	2,080	8,796
1F	1,533	2,220	9,710

**Tabla 9.** Dimensiones de las probetas de tracción del escenario 1

Tras someter a ensayo cada una de las probetas se obtuvieron los valores de la fuerza y el desplazamiento. Mediante las ecuaciones explicadas en el apartado “5.3.1 Ensayo de tracción” se obtendrá la gráfica Tensión-Deformación. Con estos datos se obtiene la pendiente para conocer el módulo elástico y la tensión máxima o resistencia.



Muestras	Módulo Elástico (GPa)	Resistencia (MPa)	Deformación en rotura
1A	85	1067	0,04
1B	75	773	0,01
1C	95	1075	0,04
1E	84	1080	0,03
1F	146	1054	0,02
<b>MEDIA</b>	97	999	0,03
<b>DESVIACIÓN</b>	28	151	0,01
<b>MEDIA SIN MUESTRA F</b>	85	999	0,03
<b>DESVIACIÓN SIN MUESTRA F</b>	9	151	0,01

**Tabla 10.** Resultados obtenidos para muestra del escenario 1 para el ensayo de tracción

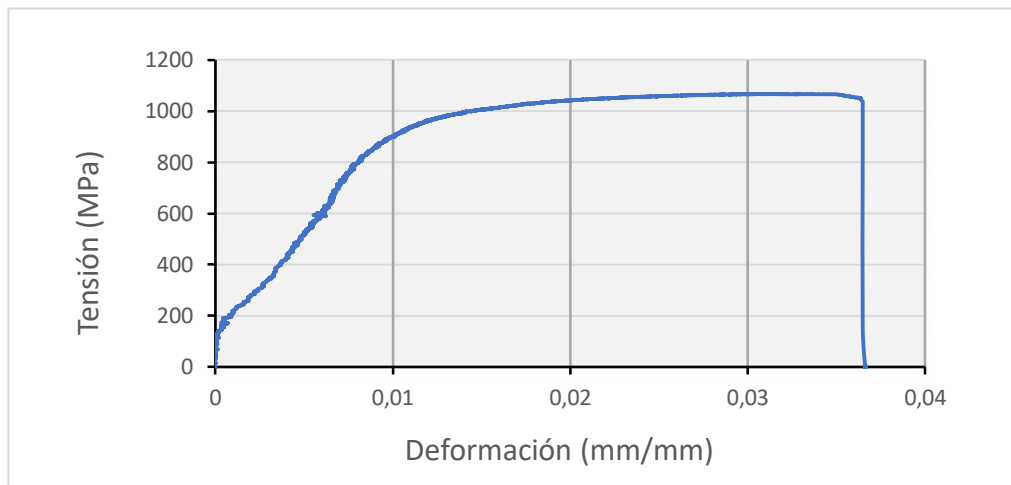
Se aprecia en la tabla 10, que no se muestran los datos para la muestra 1D, esto es debido a que no tenían coherencia los datos obtenidos de deformación. Eran valores negativos la gran mayor parte del ensayo. Este error puede ser debido a una mala colocación de la probeta, mecanizado deficiente, sobre acumulación de tensiones en alguna zona crítica.

En cuanto al módulo elástico vemos que se obtiene un valor entre 75 y 146 GPa. La media sería de  $97 \pm 28$  GPa si no se cuenta la muestra 1F, debido a que su valor es muy alejado del resto, se obtiene una media de  $85 \pm 9$  GPa. Como se observa, la desviación se reduce en gran medida para el módulo elástico cuando se obtiene la media sin la muestra F.

Por otro lado, la resistencia vemos que varía entre 772 MPa en el caso más inferior pero el resto de las muestras presentan una resistencia en torno a 1055-1080 MPa.

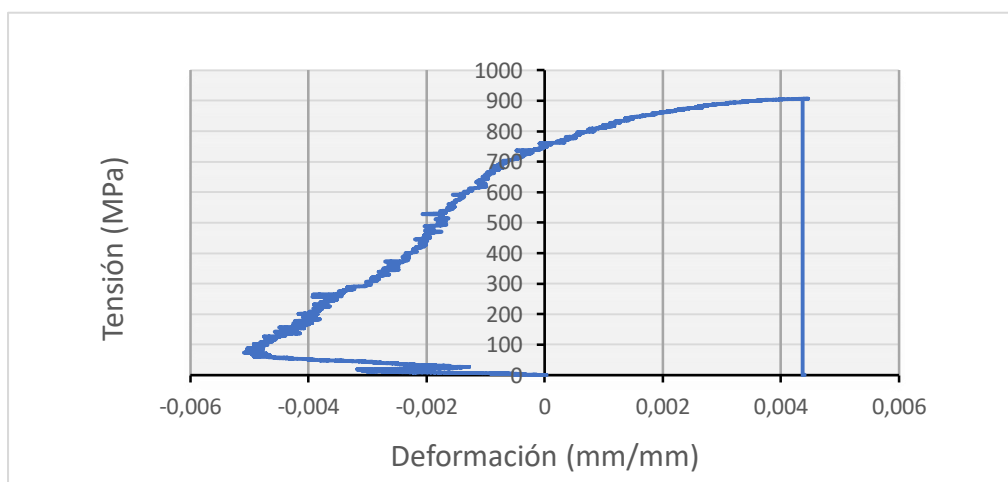
A continuación, se adjunta la gráfica tensión-deformación obtenida para la

muestra 1 como ejemplo del resto de gráficas obtenidas con este ensayo.



**Gráfico 4.** Gráfica Tensión-Deformación ensayo a tracción de la muestra 1A

Como se observa en el gráfico 4, hasta algo menos de 0,01 de deformación presenta un comportamiento elástico y después aparece el comportamiento plástico. Por último, se produce la rotura antes de una deformación de 0,037. Como se mencionó, los resultados de la muestra 1D no se tuvieron en cuenta debido a la incongruencia de éstos de acuerdo a lo que se muestra en el gráfico 5. Se obtuvieron valores muy extraños de deformación



**Gráfico 5.** Gráfica Tensión-Deformación ensayo a tracción de la muestra 1D

### 6.1.1.2 Resultados Tracción Escenario 2

Igual que con el escenario 1, se han ensayado 6 muestras. Estas muestras se han marcado con el número 2, por el escenario 2, y con una letra de la A a la F. Las dimensiones de las muestras figuran en la tabla 11.

Muestras	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Longitud Calibrada(mm)
<b>2A</b>	1,453	2,160	9,510
<b>2B</b>	1,394	2,190	9,007
<b>2C</b>	1,722	2,160	9,619
<b>2D</b>	1,505	2,230	9,456
<b>2E</b>	1,473	2,200	9,585
<b>2F</b>	1,909	2,240	9,275

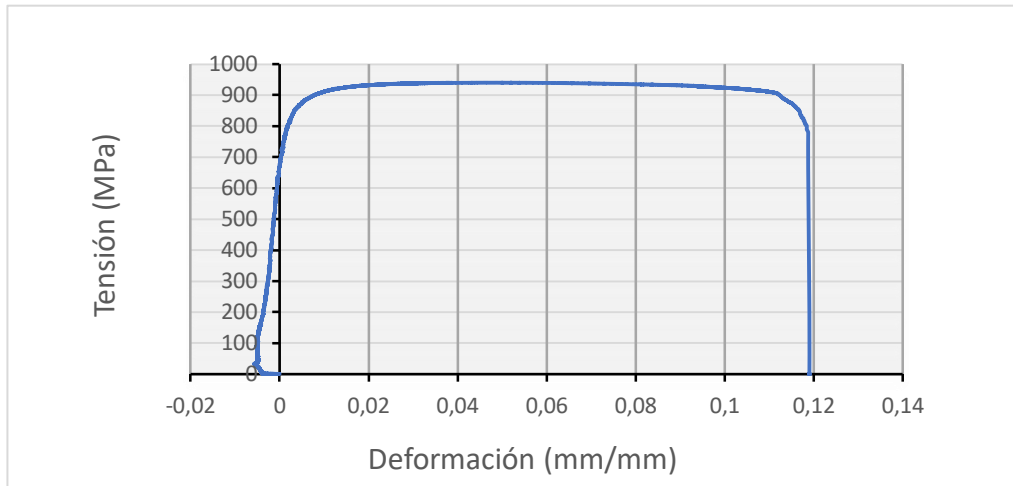
**Tabla 11.** Dimensiones de las probetas de tracción del escenario 2

Tras realizar el ensayo se obtuvieron los resultados de la tabla 12:

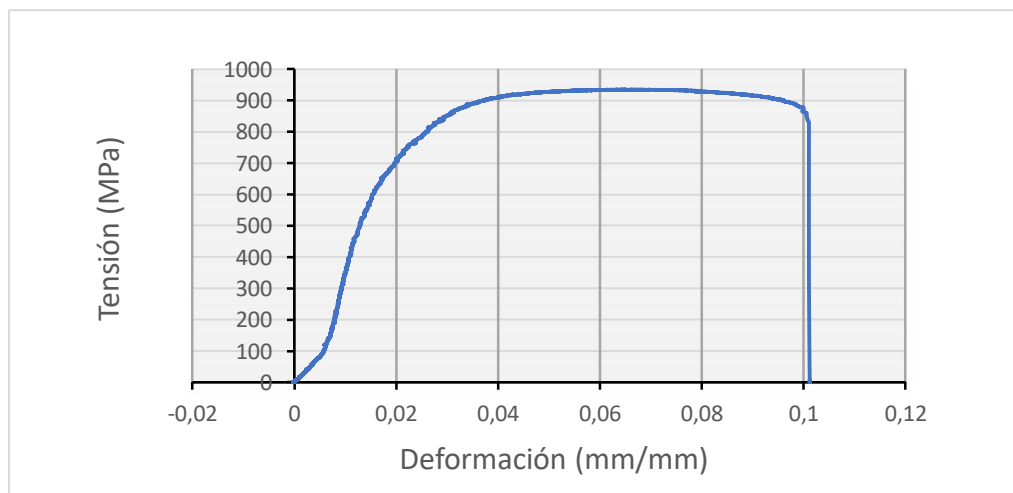
Muestras	Módulo Elástico (GPa)	Resistencia (MPa)	Deformación en rotura
<b>2A</b>	143	940	0,12
<b>2B</b>	90	919	0,08
<b>2C</b>	95	799	0,04
<b>2D</b>	66	951	0,08
<b>2E</b>	68	935	0,10
<b>2F</b>	58	817	0,07
<b>MEDIA</b>	87	894	0,08
<b>DESVIACIÓN</b>	31	67	0,03
<b>MEDIA SIN MUESTRA A</b>	75	884	0,07
<b>DESVIACIÓN SIN MUESTRA A</b>	16	71	0,02

**Tabla 12.** Resultados obtenidos para muestra del escenario 2 para el ensayo de tracción

En este caso se han dado por válido todos los resultados, pero se puede apreciar una gran variedad en cuanto al módulo elástico se refiere. Aunque los resultados son coherentes, sí que se puede apreciar una diferencia entre los 3 primeros ensayos (2A, 2B, 2C) con los otros tres ensayos (2D, 2E, 2F).



**Gráfico 6.** Gráfica Tensión-Deformación ensayo a tracción de la muestra 2A



**Gráfico 7.** Gráfica Tensión-Deformación ensayo a tracción de la muestra 2E

El gráfico 6, es el resultado obtenido para la probeta 2A y presenta una forma similar para el caso de las probetas 2B y 2C. Mientras que el gráfico 7 corresponde con la probeta 2E similar a la 2D y 2F. Existe una gran diferencia entre los ensayos y en la pendiente, por eso obtenemos una diferencia tan significativa en los módulos. Es importante remarcar que la resistencia a tracción

sí que presenta un valor concentrado en el rango 800-900 MPa. Además, se tomará como referencia del módulo elástico la media obtenida de las muestras excepto de la muestra 2A ya que da un valor demasiado alejado de los demás, se reduce la desviación a casi la mitad. Por tanto, se obtiene un valor de módulo elástico de  $75 \pm 16$  GPa.

### 6.1.1.3 Resultados Tracción Escenario 3

Al igual que con el resto de los casos se empleó la misma nomenclatura en el ensayo de tracción para identificar las muestras del escenario 3 y se realizaron las mediciones referidas a espesor, ancho y longitud calibrada, ver tabla 13.

Muestras	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Longitud Calibrada(mm)
3A	1,343	2,080	9,124
3B	2,257	2,190	9,600
3C	1,498	1,970	8,960
3D	1,476	2,100	9,189
3E	1,443	2,140	9,320
3F	1,509	2,190	9,525

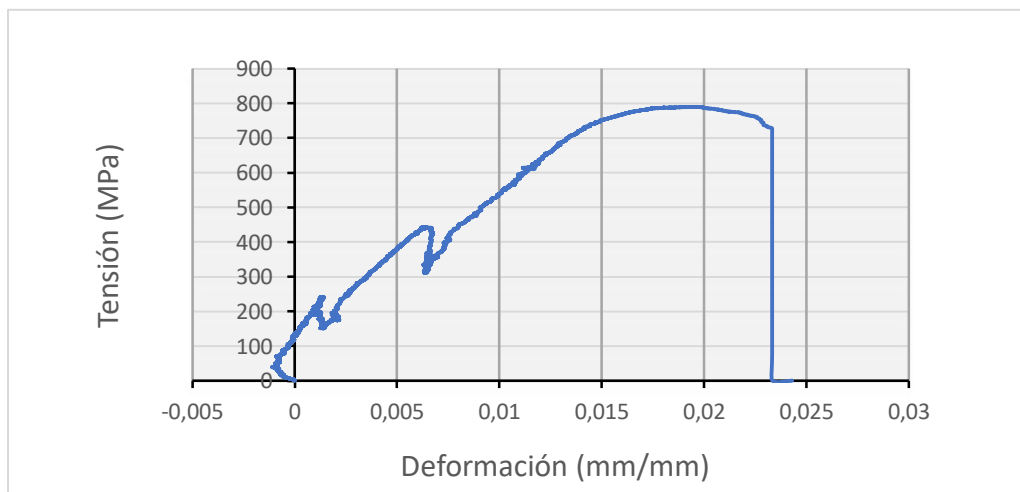
**Tabla 13.** Dimensiones de las probetas de tracción del escenario 3

Una vez sometidas las probetas a ensayo y realizados los cálculos necesarios se obtuvieron los datos proporcionados por la tabla 14.

Muestras	Módulo Elástico (GPa)	Resistencia (MPa)	Deformación en rotura
3A	51	790	0,02
3C	114	985	0,02
3D	122	1026	0,10
3E	74	1057	0,06
3F	94	1024	0,09
<b>MEDIA</b>	91	976	0,06
<b>DESVIACIÓN</b>	29	107	0,04
<b>MEDIA SIN MUESTRA A</b>	101	1023	0,07
<b>DESVIACIÓN SIN MUESTRA A</b>	22	30	0,04

**Tabla 14.** Resultados obtenidos para muestra del escenario 3 para el ensayo de tracción

Se desestiman los resultados de la muestra 3B por falta de coherencia. De los resultados de la Tabla 14, no se va a tener en cuenta la muestra 3A ya que difiere exageradamente con el resto de los resultados. Por tanto, el módulo elástico medio es de  $101 \pm 22$  GPa y la resistencia de  $1023 \pm 30$  MPa



**Gráfico 8.** Gráfica Tensión-Deformación ensayo a tracción de la muestra 3A

La diferencia en los valores del ensayo de la probeta 3A puede ser a causa de los acoples cuyos efectos vemos en el gráfico 8. Como se ve en la gráfica, hay saltos en la zona elástica del material, esto es debido a que la probeta no está

bien sujeta en las mordazas. Al cargarla se mueve y se recoloca en las mordazas.

A modo de resumen presentamos en la tabla 15 los valores promedio del módulo elástico y resistencia de cada escenario.

Escenario	Módulo Elástico (GPa)	Resistencia (MPa)	Deformación en rotura
1	85 ± 9	999 ± 151	0,03 ± 0,01
2	75 ± 16	884 ± 71	0,07 ± 0,02
3	101 ± 22	1023 ± 30	0,07 ± 0,04

**Tabla 15.** Resultados obtenidos para cada escenario

Tras comparar los escenarios de fabricación, se puede observar como la aleación de Ti6Al4V sometida a HIP (escenarios 1 y 2) presentan un módulo elástico inferior al escenario 3, el cual representa a una aleación no procesada mediante HIP. Además, tanto el módulo como la resistencia a tracción es inferior para el caso del escenario 2, proceso HIP con la menor velocidad de enfriamiento (100 °C/min), mientras que la resistencia es prácticamente la misma para las aleaciones del escenario 1 y 3. También para las muestras de Ti6Al4V y escenario 2 se presenta la mayor deformación en rotura. Lo que implica un mejor comportamiento dúctil-tenaz. En este sentido, la aleación del escenario 1 es la de menor deformación en la rotura. A pesar de un módulo intermedio y una gran resistencia, es la de peor ductilidad y tenacidad a tracción.

#### 6.1.2 Resultados Ensayo a Flexión

En el apartado “5.3.2 Ensayo de flexión” se explicó el proceso del ensayo de flexión, así como las diferentes ecuaciones que se van a emplear para obtener las diferentes propiedades. También se explicó las probetas y las dimensiones características.

De cada escenario se han ensayado 5 muestras diferentes. En primer lugar, se van a comentar los resultados obtenidos para la aleación de Ti6Al4V del escenario 1

#### 6.1.2.1 Resultados Flexión Escenario 1

Como se explicó, es necesario conocer las dimensiones del espesor y anchura de las probetas. Además de la distancia entre los soportes inferiores que siempre es la misma, 22 mm.

Para este ensayo se tienen 5 muestras de cada escenario. Para nombrarlas se optó por emplear números. El primero de ellos corresponde con el escenario, el siguiente número es la nomenclatura de la muestra inicial antes de realizar los diferentes cortes para obtener las probetas. El último número es para identificar cada una de las 5 probetas de cada escenario. Las dimensiones de las muestras vienen dadas en la tabla 16.

Muestras	Espesor (mm)	Ancho (mm)
1-3-1	3,960	12,080
1-3-2	4,040	12,030
1-3-3	3,430	12,050
1-3-4	3,780	12,140
1-3-5	3,040	12,220

**Tabla 16.** Dimensiones de las probetas de flexión del escenario 1

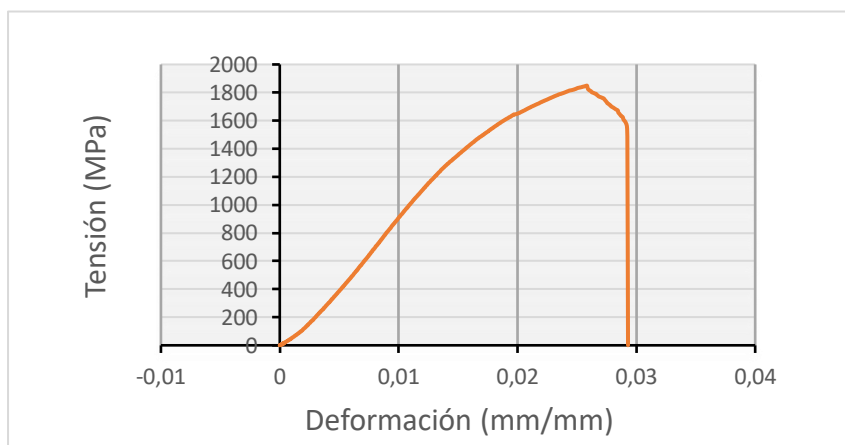
Tras someter a ensayo cada una de las probetas se obtuvieron los valores de la fuerza y el desplazamiento. Aplicando las ecuaciones mencionadas en el apartado “5.3.2 Ensayo de flexión” se obtendrá la gráfica Tensión-Deformación, como la que aparece en el gráfico 9. Con esos datos se obtiene la pendiente para conocer el módulo elástico y la tensión máxima o resistencia, tabla 17.



Muestras	Módulo Elástico (GPa)	Resistencia	Deformación
1-3-1	83	1689	0,028
1-3-2	104	1820	0,025
1-3-3	105	1849	0,025
1-3-4	71	1766	0,039
1-3-5	127	2065	0,027
<b>MEDIA</b>	98	1838	0,029
<b>DESVIACIÓN</b>	21	141	0,006

**Tabla 17.** Resultados obtenidos para muestra del escenario 1 para el ensayo de flexión

Tras analizar los datos se obtiene un módulo elástico medio de  $98 \pm 21$  GPa. En cuanto a la resistencia a flexión se puede observar una distribución más homogénea de valores exceptuando la muestra 1-3-5. Se obtiene un promedio de  $1838 \pm 141$  MPa, y una deformación de  $0,029 \pm 0,006$ .



**Gráfico 9.** Gráfica Tensión-Deformación ensayo a flexión de la muestra 1-3-3

#### 6.1.2.2 Resultados Flexión Escenario 2

Como en el escenario 1, se tomaron medidas del espesor y anchura de las probetas, y distancia entre apoyos de los soportes inferiores es la misma de 22 mm. Las dimensiones de las muestras son las siguientes (tabla 18):

Muestras	Espesor (mm)	Ancho (mm)
2-6-6	3,610	12,050
2-6-7	3,190	12,080
2-6-8	3,350	12,040
2-6-9	3,600	12,200
2-6-10	3,900	12,100

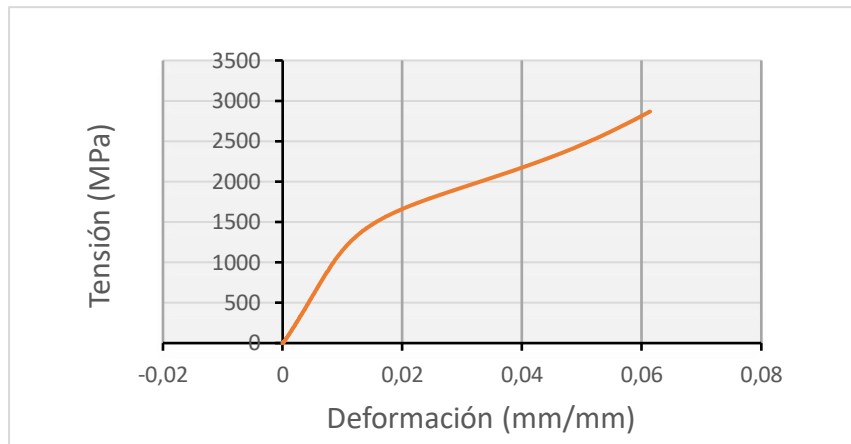
**Tabla 18.** Dimensiones de las probetas de flexión del escenario 2

A partir de los datos obtenibles de registros como los del gráfico 10, se obtienen los resultados correspondientes a la aleación fabricada bajo el escenario 2 se exponen en la tabla 19.

Muestras	Módulo Elástico (GPa)	Resistencia (MPa)	Deformación
2-6-6	131	2998	0,065
2-6-7	89	2280	0,058
2-6-8	125	2867	0,061
2-6-9	88	2572	0,066
2-6-10	100	2599	0,063
<b>MEDIA</b>	106	2663	0,063
<b>DESVIACIÓN</b>	20	280	0,003

**Tabla 19.** Resultados obtenidos para muestra del escenario 2 para el ensayo de flexión

En el ensayo de las muestras del escenario 2 ninguna probeta llegó a rotura por lo que finalizó el ensayo de cada muestra en instantes similares. Como vemos en los resultados de la tabla 19, el módulo elástico medio obtenido es de  $106 \pm 20$  GPa, con una resistencia a flexión de  $2663 \pm 280$  MPa y una deformación  $0,063 \pm 0,003$ .



**Gráfico 10.** Gráfica Tensión-Deformación ensayo a flexión de la muestra 2-6-8

### 6.1.2.3 Resultados Flexión Escenario 3

Por último, las muestras del escenario 3, cuyas dimensiones aparecen en la tabla 20, se ensayaron en las mismas condiciones comentadas anteriormente. El gráfico 11 muestra un registro de flexión representativo para ese lote de muestras.

Muestras	Espesor (mm)	Ancho (mm)
3-1-11	3,470	12,280
3-2-12	3,600	12,120
3-1-13	3,480	12,230
3-1-14	4,190	12,080
3-2-15	3,550	12,180

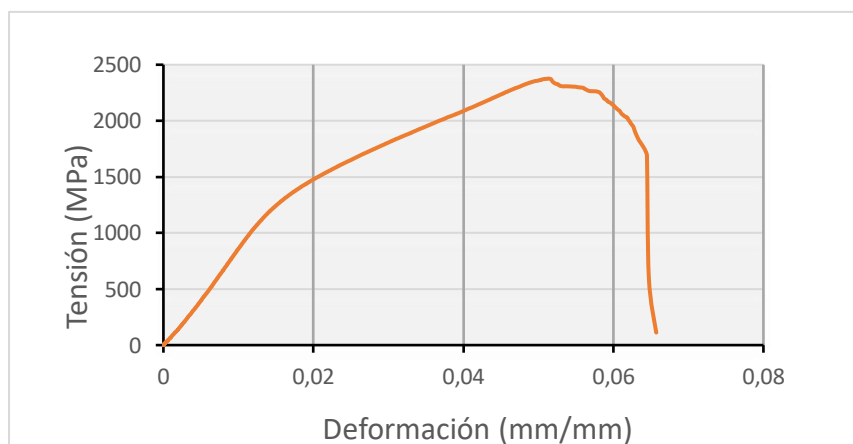
**Tabla 20.** Dimensiones de las probetas de flexión del escenario 3

Los resultados obtenidos fueron los siguientes (tabla 21).

Muestras	Módulo Elástico (GPa)	Resistencia (MPa)	Deformación
3-1-11	94	2376	0,051
3-2-12	94	2215	0,050
3-1-13	113	2674	0,061
3-1-14	93	2582	0,057
3-2-15	84	2444	0,055
<b>MEDIA</b>	96	2458	0,055
<b>DESVIACIÓN</b>	10	179	0,004

**Tabla 21.** Resultados obtenidos para muestra del escenario 3 para el ensayo de flexión

Como refleja la tabla 21, el valor promedio del módulo elástico obtenido es de  $96 \pm 10$  GPa. El de la resistencia a flexión es  $2458 \pm 179$  MPa, siendo la deformación  $0,055 \pm 0,004$ .



**Gráfico 11.** Gráfica Tensión-Deformación ensayo a flexión de la muestra 3-2-11

A continuación, muestro una tabla 22 resumen de las propiedades obtenidas para cada uno de los escenarios sometidos al ensayo de flexión.

Escenario	Módulo Elástico (GPa)	Resistencia (MPa)	Deformación
1	98 ± 21	1838 ± 141	0,029 ± 0,006
2	106 ± 20	2663 ± 280	0,063 ± 0,003
3	96 ± 10	2458 ± 179	0,055 ± 0,004

**Tabla 22.** Resultados promedios obtenidos para cada escenario

Las propiedades obtenidas del ensayo de flexión para cada aleación Ti6Al4V fabricada en los 3 escenarios distintos figuran en la tabla 22. Comparando los escenarios de fabricación, se puede observar como las aleaciones de Ti6Al4V presentan un módulo elástico próximos, 96 – 106 GPa. Estas diferencias no son determinadamente significativas. Aunque los valores de resistencia son altos, si se aprecia un comportamiento resistente dispar. La resistencia con el escenario 1 es la más baja, al igual que su deformación en rotura. Por tanto, el postprocesado HIP con una alta velocidad de enfriamiento proporciona una aleación con un comportamiento dúctil-resistente inferior a flexión. Todo lo contrario, para la aleación del escenario 2. El proceso HIP con la menor velocidad de enfriamiento (100 °C/min), proporciona máximas resistencia, ductilidad y módulo. En ese sentido, es más tenaz a flexión. La aleación de Ti sin procesamiento HIP (escenario 3) muestra propiedades algo inferiores a las del escenario 2. Por tanto, respecto del comportamiento tenaz y resistente a flexión, de ambas aleaciones Ti6Al4V estaría en la misma línea, muy superior al de la aleación del escenario 1.

## 6.2. Resultados caracterización microestructural

En este apartado se van a mostrar los resultados obtenidos durante la utilización de las diferentes técnicas de caracterización microestructural explicadas con anterioridad en el apartado “5.4. Caracterización Microestructural”. En él se explicó todo el proceso desde la obtención de las muestras a la preparación metalográfica para poder realizar el estudio de las fases y granos presentes en la microestructura.

### 6.2.1 Resultados Microscopia óptica

Las muestras fueron atacadas químicamente con el reactivo Kroll para provocar un contraste en la microestructura de las aleaciones y poder diferenciar sus componentes. El microscopio óptico los aumentos vienen del objetivo y del ocular, este suele ser de 10X. por lo que los aumentos a vista mínimo son 50x, y con el mayor de 500x. La resolución viene dada por el detalle más pequeño que se puede observar con nitidez.

Las imágenes tomadas para cada escenario son 5x, 10x y 50x.

En primer lugar, se van a mostrar las imágenes de la aleación para el escenario 1.

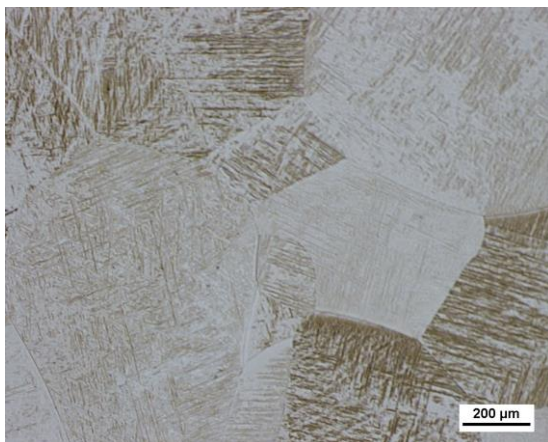
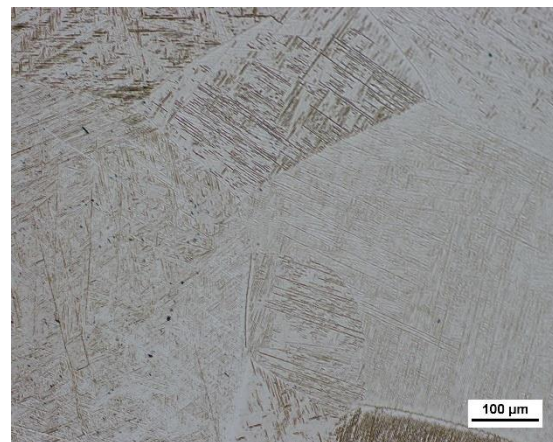
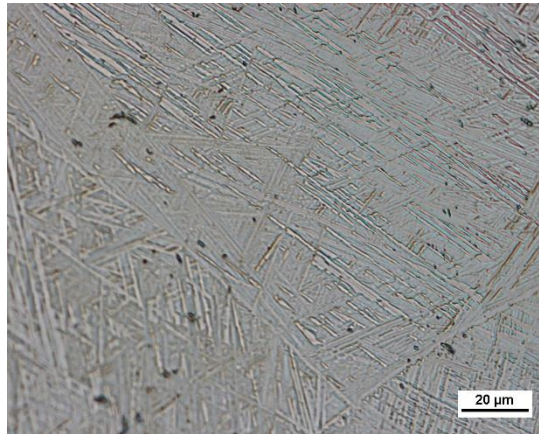


Ilustración 45. A) Imagen escenario 1 5x.



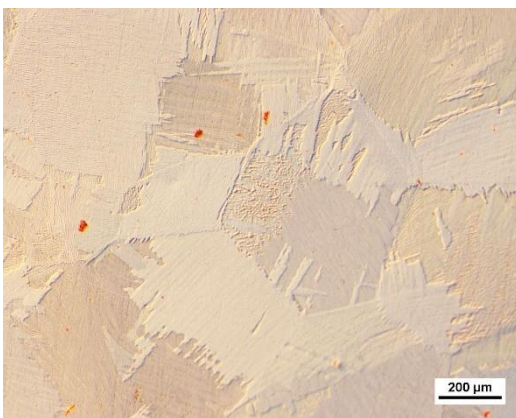
B) Imagen escenario 1 10x



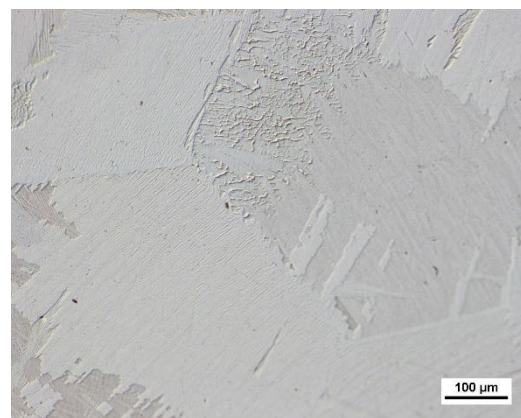
**Ilustración 46.** Imagen escenario 1 50x

En la ilustración 45 se puede apreciar con claridad los granos y sus bordes. En la imagen a 10x, ilustración 45 b, y la ilustración 46 se aprecian unos puntos negros, posiblemente pequeña porosidad o incluso restos de suciedad ocluida. Este escenario se enfrió a 500 °C/min tras ser sometido a HIP. Podemos observar, por tanto, una microestructura martensítica característica de un enfriamiento rápido desde temperaturas superiores a  $\beta$ -transus; además, de un gran tamaño de grano. También, como permite ver la ilustración 46, es una estructura acicular es decir presenta una estructura martensítica muy fina.

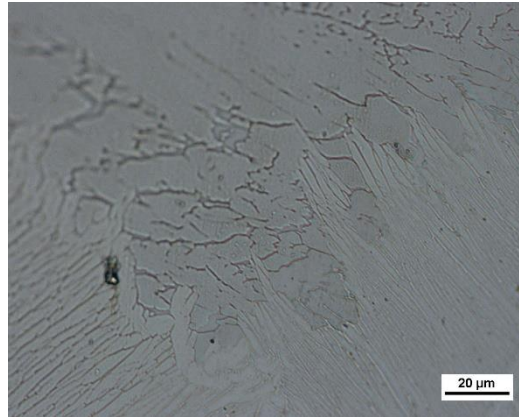
A continuación, se muestran las imágenes obtenidas para el escenario 2 a diferentes aumentos de la misma zona de una muestra.



**Ilustración 47. A)** Imagen escenario 2 5x.



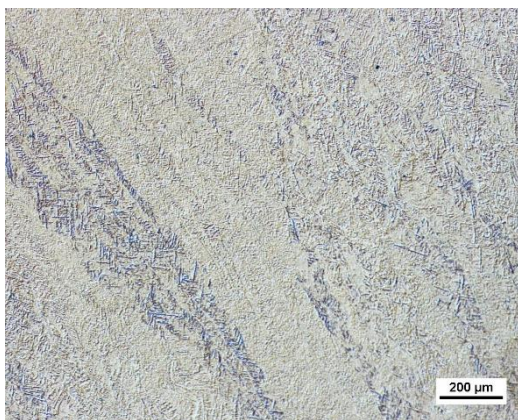
**B)** Imagen escenario 2 10x



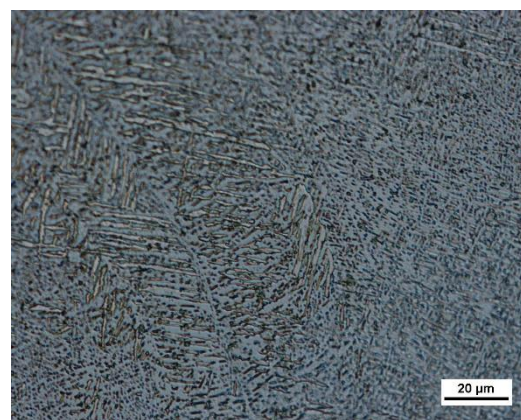
**Ilustración 48.** Imagen escenario 2 50x

A diferencia del escenario 1, las muestras de Ti6Al4V se sometieron a un enfriamiento más lento, exactamente de 100 °C/min tras el procesamiento HIP. La microestructura es distinta, aunque el tamaño de grano sigue siendo grande (ilustración 47). Ya no se aprecia la formación martensítica, se atenúa la forma abrupta de las formas aciculares (ilustración 48), y el contorno de fases aparece más redondeado en una amplia zona. Como es observa en las ilustraciones 47 y 48 es una estructura mucho más gruesa que en el caso anterior. Está conformada por un crecimiento de la fase alfa desde el borde hacia el propio interior del grano.

Por último, se muestran las imágenes del escenario 3, que se corresponden con la aleación sometida exclusivamente al proceso de fabricación EBM.



**Ilustración 49.** A) imagen escenario 3 10x.



B) Imagen escenario 3 50x

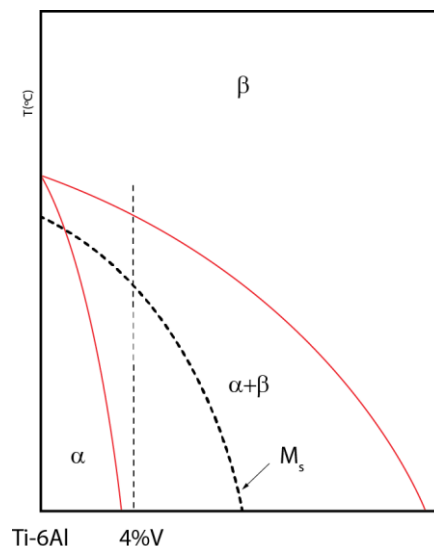


La ilustración 49 manifiesta una microestructura de grano columnar también de gran tamaño, formada en su interior por dos fases distribuidas en láminas. La fase más oscura corresponde con la fase  $\beta$  mientras que la zona clara corresponde con la fase  $\alpha$ , la que se manifiesta unas veces como finas acículas y otras como matriz donde se dispersa la fase  $\beta$ .

### 6.2.2 Resultados Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

A continuación, se van a presentar los datos obtenidos por microscopia electrónica de barrido. Como se comentó, esta tecnología permite una mayor resolución que la microscopia óptica.

En este estudio se emplearon dos microscopios: HRFEM y FIB. Las características de la microscopia electrónica de barrido y los diferentes microscopios se explicaron en el apartado “5.4.8 Microscopia electrónica de barrido”.



**Ilustración 50.** Diagrama Ti6Al4V

La aleación de Ti6Al4V, es una aleación bifásica donde el Aluminio en 6% estabiliza la fase  $\alpha$  (HCP) mientras que el vanadio en 4% se encarga de estabilizar la fase  $\beta$  (CC).

Esta aleación presenta diferentes microestructuras en función de los elementos intersticiales, así como de los diferentes tratamientos térmicos a los que es sometido. Esas estructuras son: martensítica, laminar, bimodal y equiaxial.

En primer lugar, se mostrarán las imágenes obtenidas en el HRFEM para la aleación del escenario 1, post procesada por HIP y enfiada a alta velocidad.

Las imágenes obtenidas para el escenario 1 en la ilustración 51, a 10k x y 25k x; muestran una estructura martensítica acicular ultra fina, de dimensiones nanométricas. En la ilustración 52, se obtuvo una imagen de 1000x en el microscopio FIB. Los espectros asociados a las líneas 2 y 3 marcadas en la imagen dio lugar al análisis químico por EDS de la tabla 23.

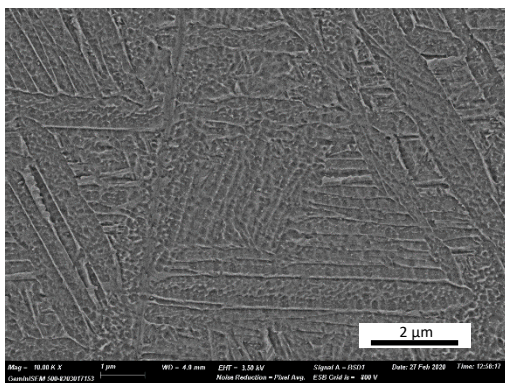
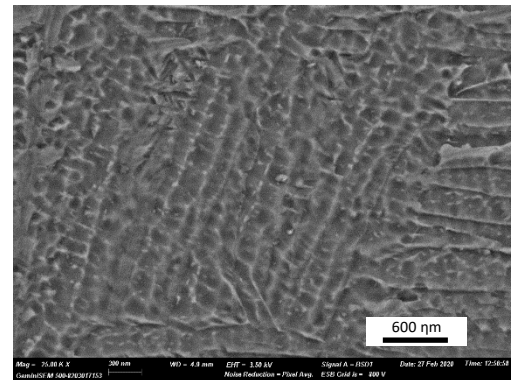


Ilustración 51. A) Imagen escenario 1 10.0k x.



B) Imagen escenario 1 25.0k x

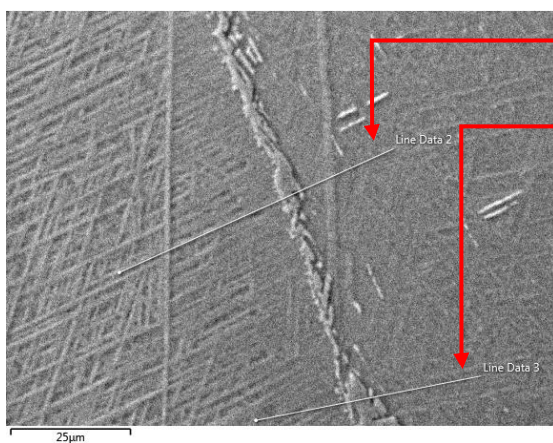


Ilustración 52. Imagen escenario 1 1000x

Line Data 2

Line Data 3

Element	Line Data 2		Line Data 3	
	Weight %	Atomic %	Weight %	Atomic %
Ti	91,1	87,9	91,1	87,8
Al	4,9	8,5	5,2	8,8
V	4,0	3,6	3,8	3,4

Tabla 23. Espectros de la línea 2 y la línea 3 de ilustración 52

Se confirma la composición de la aleación Ti6Al4V, aunque el valor del aluminio es algo inferior. Además, en las imágenes se pueden apreciar las muy finas agujas que conforman la estructura martensítica como se comentó en el apartado “6.2.1 Resultados Microscopia óptica”.

A continuación, se muestran los resultados del material para el escenario 2. Igual que en el caso anterior se obtuvieron imágenes con el HRFSEM y con el FIB, así como un análisis espectral por EDS. Ya no se aprecia la formación martensítica en la ilustración 53. Se atenúa la forma abrupta de las formas aciculares (derecha), y tiende a aparecer finas láminas (color blanco) intercaladas en placas de mayor espesor (color oscuro).

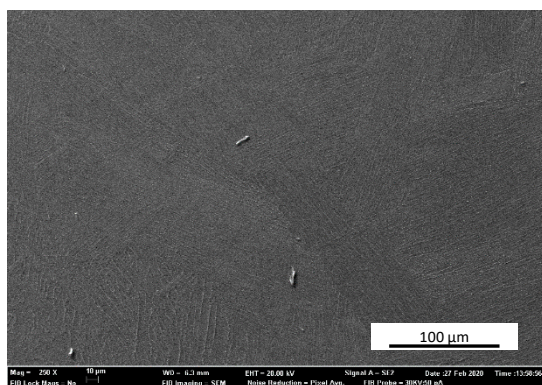
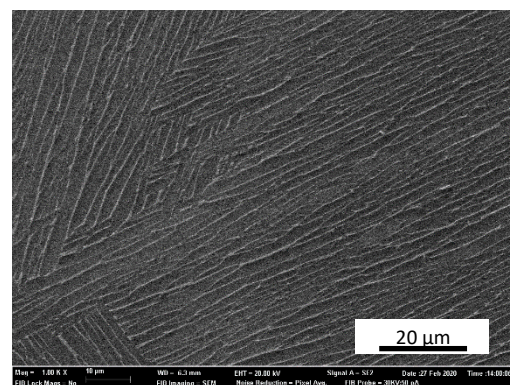
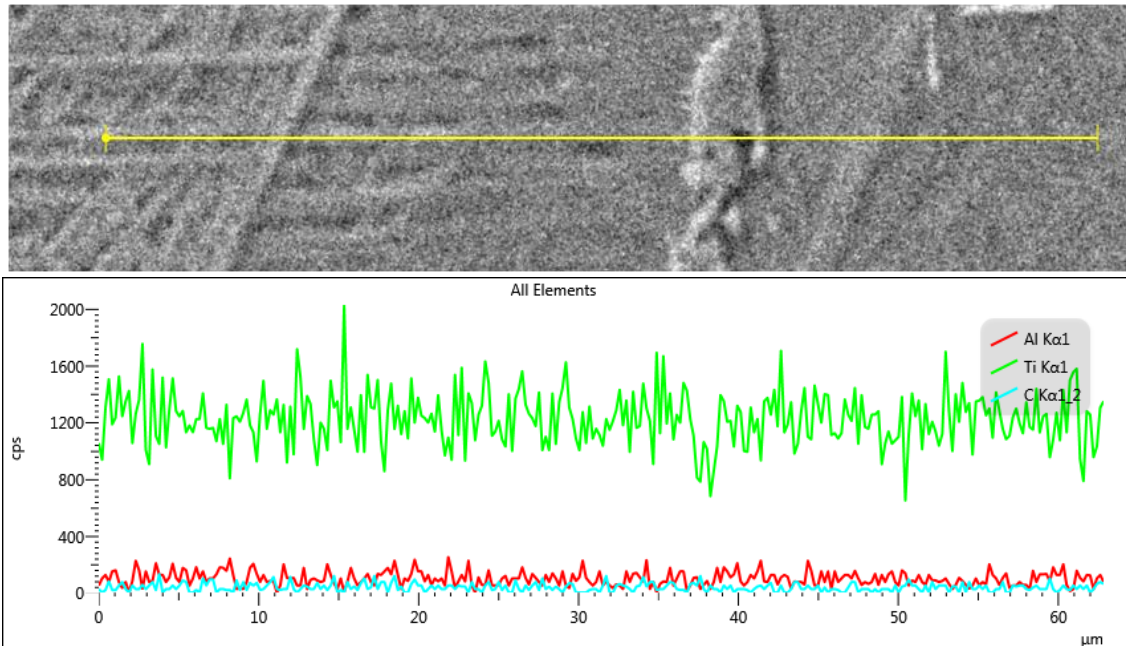


Ilustración 53. A) Imagen escenario 2 250 x.

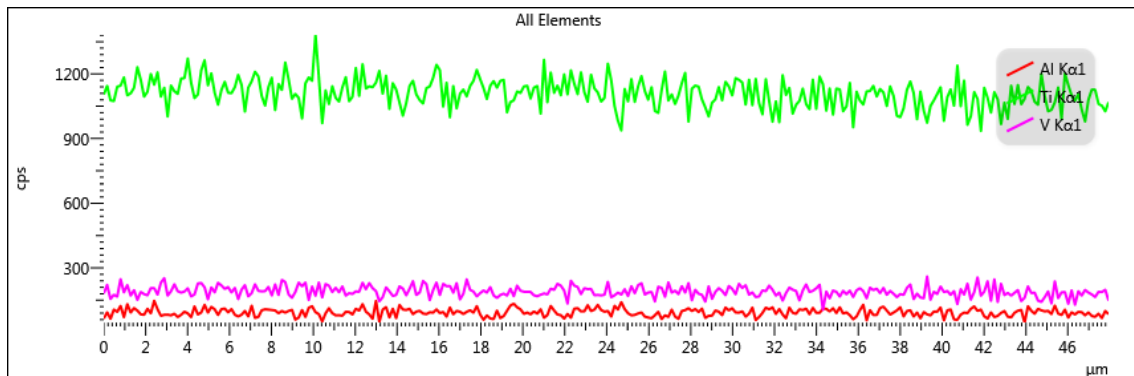
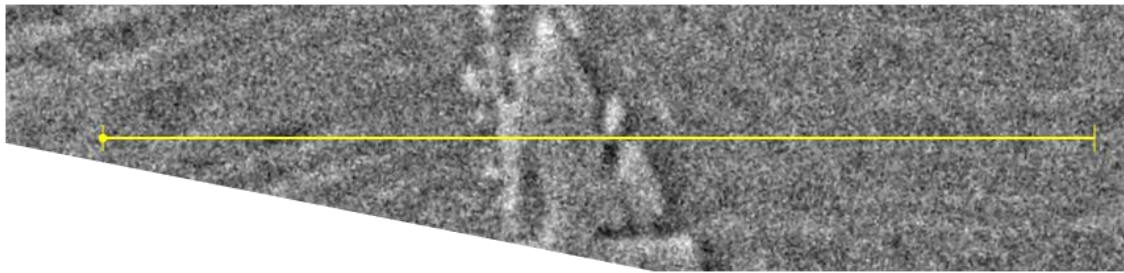


B) Imagen escenario 2 1.0k x



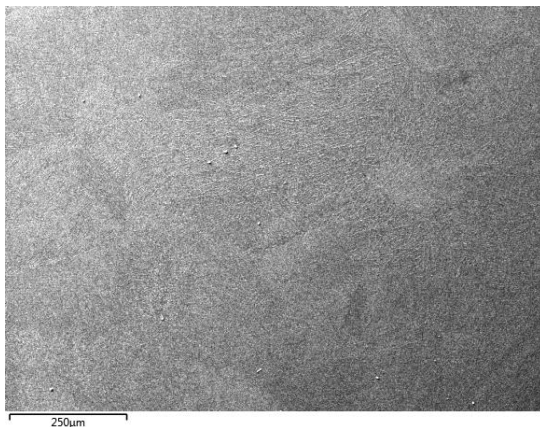
**Ilustración 54.** Análisis de la muestra del escenario 2 de la zona marcada por la línea.

Como se mostró en el apartado de Propiedades de Ti6Al4V, la composición de esta aleación puede contener un máximo de carbono de 0,08%. Por este motivo, en la ilustración 54 se aprecia como detecta una intensa señal para el Titanio, una inferior en el Aluminio, y otra muy reducida de Carbono.



**Ilustración 55.** Análisis de la muestra del escenario 2 de la zona marcada por la línea

La zona de análisis, figuras 55 y 56, indica la ausencia de carbono, y la presencia de los 3 elementos principales constitutivos de la aleación: Ti, Al y V; como recoge la tabla 24.



**Ilustración 56.** Imagen escenario 2 100x

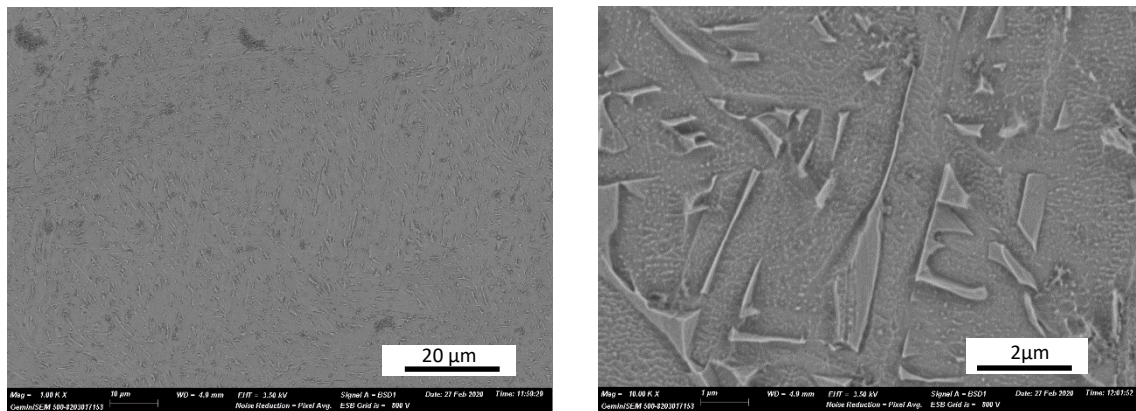
E2 100x		
Espectro		
Element	Weight %	Atomic %
Ti	90,3	87,0
Al	5,2	9,0
V	4,0	3,6
Fe	0,3	0,3

**Tabla 24.** Espectros de la línea 2 y la línea 3 de ilustración 53

Ahondando en la ilustración 53, la microestructura laminar o Widmastätten es propia de un enfriamiento más lento del postprocesado HIP (100 °C/min). Un enfriamiento bastante más lento comparado con el escenario 1. El enfriamiento lento permite una difusión controlada de los elementos para formar las fases  $\alpha$  y

$\beta$  cuando la temperatura es inferior a la temperatura  $\beta$ -transus. En ese instante, la fase  $\alpha$  se nuclea en los bordes de grano  $\beta$  y la fase  $\alpha$  crece en forma de láminas. Vemos como las zonas más planas y gruesas corresponden a la fase  $\alpha$  (color oscuro) mientras que las láminas más finas son la fase  $\beta$  (color claro).

Por último, se tomaron imágenes de las muestras de Ti6Al4V elaboradas exclusivamente por EBM (escenario 3).

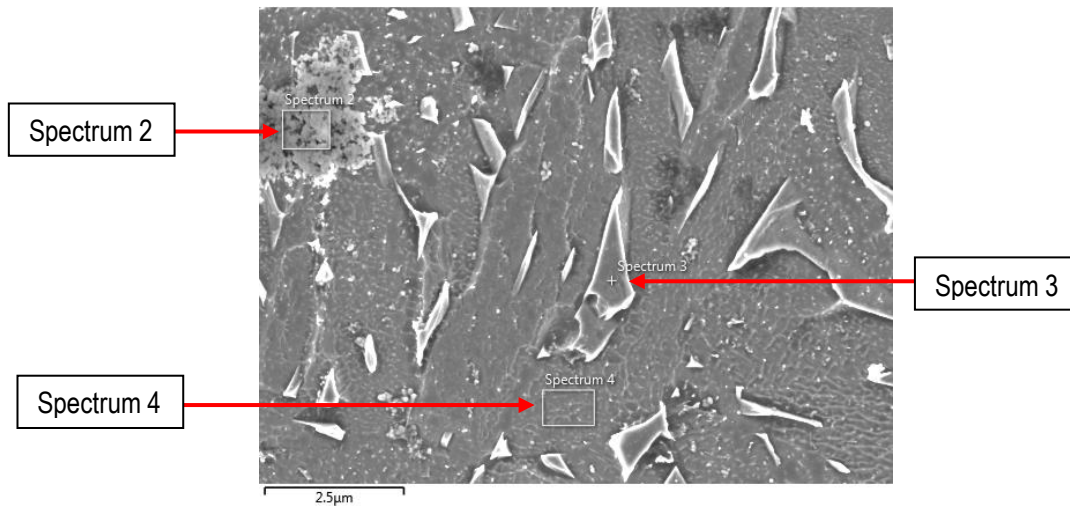


**Ilustración 57.** A) Imagen escenario 3 (EBM) 1.0k x. B) Imagen escenario 3 (EBM) 10.0k x

Las imágenes de la Ilustración 57 indican como el aluminio se acumula en la zona plana de mucha mayor extensión y color más oscuro, correspondiente a la fase  $\alpha$  mientras que las elevaciones de aspecto más claro corresponden con la fase  $\beta$  debida al efecto del vanadio. Esta diferencia se debe a que el aluminio es de menor masa atómica que el vanadio.

Seguidamente se presentan los resultados del análisis químico por EDS del espectro de la imagen que se muestra en la ilustración 58. Se analizaron 4 zonas. La tabla 25 indica que la composición de la zona 2 obedece a una acumulación de suciedad no removida formada por partículas de sílice y otras sales. El espectro 3 hace referencia a un grano de fase  $\alpha$  constituido fundamentalmente por Ti y Al (tabla 26). El espectro de la zona 4 confirma la presencia de Ti y V,

por lo que se trata de un área rica en fase  $\beta$ . El espectro 5 corresponde a toda el área de la imagen. Los resultados de la tabla 26 apuntan a una zona de alta concentración de V, muy superior a la de Al; por tanto, mayoritariamente de fase  $\beta$  (CC).



**Ilustración 58.** Imagen escenario 3 (EBM) 10.0k x

Element	Spectrum 2	
	Atomic %	Weight %
O	59,0	42,6
Si	24,9	31,6
Ti	8,9	19,3
F	5,3	4,5
Na	0,7	0,7
Mg	0,6	0,7
Al	0,6	0,7

**Tabla 25.** Espectros del recuadro 2 de la ilustración 58

Element	Spectrum 3		Spectrum 4		Spectrum 5	
	Weight %	Atomic %	Weight %	Atomic %	Atomic %	Weight %
Ti	87,2	73,7	76,9	74,6	65,7	67,5
V	-	-	17,8	16,3	24,6	26,9
Al	5,4	8,1	5,3	9,1	9,7	5,6
F	1,3	2,8	-	-	-	-
O	6,1	15,4	-	-	-	-

**Tabla 26.** Espectros de los recuadros 3,4 y de toda la zona de la ilustración 58

## 7. CONCLUSIONES

En este apartado se recogen las conclusiones obtenidas después de realizar los diferentes ensayos a cada uno de los escenarios para poder realizar las comparaciones pertinentes.

La fabricación aditiva EBM permite obtener piezas con cualquier tipo de geometría y con una fuerte disminución de defectología interna. A pesar de ello, hemos observado que la calidad de la superficie suele ser bastante rugosa.

Comportamiento a tracción. Las aleaciones de Ti6Al4V elaboradas por EBM y EBM/HIP desarrollan características mecánicas en torno a 80 – 100 GPa de módulo, resistencia entre 900 y 1000 MPa, y ductilidades entre 3 y 8%

La aleación de Ti fabricada por EBM muestra mayor módulo, alta resistencia y ductilidad-tenacidad intermedia.

El procesado HIP posterior disminuye el módulo elástico (rigidez) de la aleación (escenarios 1 y 2) respecto de las muestras EBM (escenario 3).

El proceso HIP con la menor velocidad de enfriamiento (100 °C/min) confiere al material menor resistencia y módulo, pero a cambio mayor deformabilidad plástica (ductilidad); por tanto, mejor comportamiento dúctil-tenaz. Mayor velocidad de enfriamiento (500 °C/min) implica fragilización: empeora la ductilidad y tenacidad asociada, aunque sus propiedades resistentes hayan aumentado.

La aleación con mejor balance de propiedades dúctil-resistentes para aplicaciones biomédicas es la post-procesada por HIP con baja velocidad de enfriamiento.

A continuación, adjunto una tabla (tabla 27) de la resistencia mínima del Ti6Al4V de forjado y colado según la normativa y una tabla 28 con los resultados promedios obtenidos para cada escenario de fabricación.



	<b>Resistencia a Tracción [MPa]</b>
<b>FORJADO</b>	
ASTM F136	860
ASTM F1472	930
BS7252	860
ISO 5832-3	860
<b>COLADO</b>	
ASTM F1108	860

**Tabla 27.** A)Tabla con la resistencia a tracción del Ti64 según normativa

<b>Escenario</b>	<b>Módulo Elástico (GPa)</b>	<b>Resistencia (MPa)</b>	<b>Deformación en rotura</b>
<b>1</b>	85 ± 9	999 ± 151	0,03 ± 0,01
<b>2</b>	75 ± 16	884 ± 71	0,07 ± 0,02
<b>3</b>	101 ± 22	1023 ± 30	0,07 ± 0,04

**Tabla 28.** Resultados promedios del ensayo de tracción

Comparando los resultados de la tabla 27, se observa como en general se obtiene una resistencia ligeramente superior con el proceso de fabricación de EBM que con los métodos convencionales.

Comportamiento a flexión. Las aleaciones de Ti6AlV4 elaboradas por EBM y EBM/HIP desarrollan características mecánicas en torno a 95 – 106 GPa de módulo, resistencia entre 1800 y 2700 MPa, y ductilidades entre 3 y 7% (tabla 29).

La aleación de Ti fabricada por EBM muestra módulo elástico similar a las otras elaboraciones, alta resistencia, y un comportamiento dúctil intermedio.

El proceso HIP con la menor velocidad de enfriamiento:100 °C/min (escenario 2) confiere al material alta resistencia y módulo, y también mayor deformabilidad

plástica (ductilidad). Manifiesta el mejor comportamiento dúctil-tenaz. Mayor velocidad de enfriamiento: 500 °C/min (escenario 1) implica una fuerte fragilización: empeora la ductilidad y tenacidad agravada por una menor resistencia.

La aleación con mejor balance de propiedades dúctil-resistentes para aplicaciones biomédicas es la post-procesada por HIP de baja velocidad de enfriamiento, a la que está muy cercana la EBM.

Visto en conjunto, no se aprecia un extraordinario cambio que permita asegurar que la etapa HIP aporta grandes beneficios como post proceso a una pieza de Ti6Al4V fabricada por EBM, si bien se mejora el comportamiento dúctil-tenaz.

Escenario	Módulo Elástico (GPa)	Resistencia (MPa)	Deformación
1	98 ± 21	1838 ± 141	0,029 ± 0,006
2	106 ± 20	2663 ± 280	0,063 ± 0,003
3	96 ± 10	2458 ± 179	0,055 ± 0,004

**Tabla 29.** Resultados obtenidos en ensayo a flexión

Microestructura. Existen diferencias marcadas en la microestructura de las aleaciones Ti6Al4V elaboradas por EBM y EBM/HIP. Las aleaciones EBM (escenario 3) presentan una estructura de grano columnar de gran tamaño, en el que la fase  $\beta$  aparece finamente dispersa en una matriz de fase  $\alpha$ , lo que explicaría un comportamiento de alta resistencia y ductilidad-tenacidad apreciable.

La aplicación de la tecnología HIP con una alta velocidad de enfriamiento (escenario 1) produce microestructuras aciculares, martensíticas, de gran tamaño de grano. Ello justificaría su mayor fragilidad y menores características mecánicas.

La reducción de la velocidad de enfriamiento en la etapa HIP (escenario 2) produce estructuras Widmstätten de láminas de fase  $\beta$  intercaladas entre las placas de fase  $\alpha$ , con amplias zonas de mucho menor tamaño de grano y

contorno más redondeado. Se impide así la formación de estructuras aciculares. Esta microestructura reflejaría el mejor balance entre propiedades resistentes y comportamiento dúctil-tenaz.

Los microanálisis por EDS indican una cierta pérdida de Al (nominal 6%) en muestras EBM, ligeramente acentuada por HIP. Esto puede ser debido a la volatilización por ser el Aluminio un metal de bajo punto de fusión. La pérdida entorno al 1% de Al puede producir una ligera disminución en la resistencia de la pieza. La fase  $\beta$  tiende a sobresaturarse de V en las muestras EBM, hecho que no ocurre en las procesadas posteriormente por HIP.

Todo ello nos está indicando que no se puede suponer la etapa HIP para la fabricación aditiva funciona de la misma forma que para los métodos de fabricación convencionales.

Debido a esto, es necesario realizar un estudio más adecuado sobre las 3 variables del proceso HIP: presión, temperatura y velocidad de enfriamiento para considerar interesante emplear HIP en Ti6Al4V.

En nuestro caso, la tecnología EBM se ha mostrado competitiva por su muy reducido nivel de porosidad inicial.

Para obtener una pieza de mayor calidad será necesario obtener una materia prima de partida de granos de polvo esféricos, regulares, del tamaño adecuado además de un desplazamiento del haz de electrones más fino. Pero también será obligatorio un tratamiento superficial que elimine el acabado muy rugoso típico.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Amigó, V.; Vicente, A. *Materials per a disseny industrial. Aliatges metàl·lics*. Valencia: UPV.

EPMA. (2018). *Introduction to Hot Isostatic Pressing Technology*. Recuperado de: <https://www.epma.com/epma-free-publications/product/introduction-to-hot-isostatic-pressing-brochure>

EPMA. *Introduction to Press & Sinter Technology*. Recuperado de: <https://www.epma.com/epma-free-publications/product/introduction-to-press-and-sinter-technology-brochure>

Ozols, A. (1998). *Producción y caracterización de polvos metálicos obtenidos por atomización y enfriado rápido*. (Tesis de Posgrado). Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.

Leyens, C.; Peters, M. (2003). *Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications*. Weinheim: Wiley-VCH.

Askeland, D.R.; Fulay, P.P; Wright, W.J. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Cengage.

Lancaster, R.; Illsley, H.; Davies, G.; Jeffs, S.P. (2016). *Structural Integrity of an Electron Beam Melted Titanium Alloy*. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/303980465\\_Structural\\_Integrity\\_of\\_an\\_Electron\\_Beam\\_Melted\\_Titanium\\_Alloy](https://www.researchgate.net/publication/303980465_Structural_Integrity_of_an_Electron_Beam_Melted_Titanium_Alloy)

Vicente, Á. (2014). *Análisis del efecto de los aleantes en titanio pulvimetalúrgico*. (Tesis de Máster). Valencia.

[1] Gene L. Dodaro; Timothy M. Persons (2015). *3D Printing: Opportunities, Challenges, and Policy Implications of Additive Manufacturing*. Recuperado de: <https://www.semanticscholar.org/paper/GAO-15-505SP%2C-3D-Printing%3A-Opportunities%2C-and-of-Dodaro-Persons/35bef69b28abde253c5da040290e12c5e2c37365>

[2] CCEA (2016). *FACTFILE: GCE TECHNOLOGY & DESIGN 1.6 METHODS OF PROCESSING MATERIALS PART 2*. Recuperado de: <https://ceea.org.uk/downloads/docs/Support/Factfile/2020/1.6%20Methods%20of%20Processing%20Materials%20Part%202.pdf>

[3] Fundación COTEC (2011). *Fabricación aditiva*. Madrid.

- [4][8] EPMA. (2019). *Introduction to Additive Manufacturing Technology*. Recuperado de: <https://www.epma.com/epma-free-publications/product/introduction-to-additive-manufacturing-brochure>
- [5] Zureks. (2008). Recuperado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Modelado\\_por\\_deposición\\_fundida#/media/Archivo:FDM\\_by\\_Zureks.png](https://es.wikipedia.org/wiki/Modelado_por_deposición_fundida#/media/Archivo:FDM_by_Zureks.png)
- [6] Pardo, L. (2014). *LIX: Dibuja objetos físicos a mano alzada*. Recuperado de: <https://www.neoteo.com/lix-dibuja-objetos-fisicos-mano-alzada/>
- [9] IGAPE. (2017). *Oportunidades Industria 4.0 en Galicia*. Recuperado de: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjLm5G71JrqAhURkhQKHZkMB7oQFjAZegQIBBAB&url=http%3A%2F%2Fwww.igape.es%2Fes%2Fser-mas-competitivo%2Fgaliciaindustria4-0%2Festudios-e-informes%2Fitem%2Fdownload%2F70\\_c387dd08cb6523a0bd25ae72335fd6ae&usg=AOvVaw1XYStHmmtgH4iOJj48o-MD](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjLm5G71JrqAhURkhQKHZkMB7oQFjAZegQIBBAB&url=http%3A%2F%2Fwww.igape.es%2Fes%2Fser-mas-competitivo%2Fgaliciaindustria4-0%2Festudios-e-informes%2Fitem%2Fdownload%2F70_c387dd08cb6523a0bd25ae72335fd6ae&usg=AOvVaw1XYStHmmtgH4iOJj48o-MD)
- [10] Fraunhofer IFAM. Recuperado de: [https://www.ifam.fraunhofer.de/en/Profile/Locations/Bremen/Shaping\\_Functional\\_Materials/Powder\\_Technology/additive-manufacturing/metal-binder-jetting.html](https://www.ifam.fraunhofer.de/en/Profile/Locations/Bremen/Shaping_Functional_Materials/Powder_Technology/additive-manufacturing/metal-binder-jetting.html)
- [11] Recuperado de: [http://ocw.uc3m.es/cursos-archivados/tecnologia-de-polvos/material-de-clase-1/2.Fabricacion\\_polvosx.pdf](http://ocw.uc3m.es/cursos-archivados/tecnologia-de-polvos/material-de-clase-1/2.Fabricacion_polvosx.pdf)
- [12] Recuperado de: [http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/750/977/html/2\\_el\\_proceso\\_de\\_cristalizacin.html](http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/750/977/html/2_el_proceso_de_cristalizacin.html)
- [13] Recuperado de: [http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1091/html/3\\_composicin\\_de\\_la\\_materia\\_estructuras\\_cristalinas.html](http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1091/html/3_composicin_de_la_materia_estructuras_cristalinas.html)
- [14] Recuperado de: <http://ensayodelasmaticas.blogspot.com/2018/11/la-importancia-de-las-maticas-en.html>
- [15] Recuperado de: <https://lsaratxaga.wordpress.com/ensayo-de-traccion/probetas/>
- [16] Recuperado de: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn100.html>
- [17] Recuperado de: [https://rodas5.us.es/file/202507ce-80cd-de00-adeb-3cfc45af189d/2/practica\\_5\\_scorm.zip/pagina\\_01.htm](https://rodas5.us.es/file/202507ce-80cd-de00-adeb-3cfc45af189d/2/practica_5_scorm.zip/pagina_01.htm)
- [18] Esquivel, G. (2014). *Ablación láser como método para la remoción de contaminantes en los electrodos de capacitores de Tantalio*. Recuperado de:



<https://docplayer.es/66222012-Instituto-politecnico-nacional-centro-de-investigacion-en-ciencia-aplicada-y-tecnologia-avanzada-unidad-altamira.html>

[19] Recuperado de: [https://www.wikiwand.com/en/Scanning\\_electron\\_microscope](https://www.wikiwand.com/en/Scanning_electron_microscope)

[20] Recuperado de: <https://www.pardell.es/el-microscopio-electronico-de-barrido-sem.html>

[21] Recuperado de: <http://www.upv.es/entidades/SME/info/753712normalc.html>



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

---

**DOCUMENTO Nº2:**

## **PLIEGO DE CONDICIONES**

**ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DE LA FABRICACIÓN ADITIVA PARA LA  
ELABORACIÓN DE COMPONENTES INDUSTRIALES EN ALEACIONES DE  
TITANIO**

TRABAJO FINAL DEL

**Grado en Ingeniería Mecánica**

REALIZADO POR

**Ricardo Ruiz Monsalve**

TUTORIZADO POR

**Ángel Vicente Escuder**

**Emilio Francisco Segovia**

**CURSO ACADÉMICO: 2019/2020**



## ÍNDICE

<b>1. OBJETO.....</b>	<b>2</b>
<b>2. MATERIALES.....</b>	<b>3</b>
2.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS .....	3
<b>3. CONDICIONES DE EJECUCIÓN .....</b>	<b>3</b>
3.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS .....	3
3.1.1 Corte .....	3
3.1.2 Probetas Tracción .....	3
3.1.3 Probetas Flexión .....	4
3.1.4 Probetas Metalografía .....	4
<b>4. CONTROLES A REALIZAR .....</b>	<b>4</b>
<b>5. ENSAYOS A REALIZAR .....</b>	<b>5</b>
5.1 GENERALIDADES .....	5
5.2 SECUENCIAS DE ENSAYOS .....	5
5.3 ACONDICIONAMIENTO Y TEMPERATURAS DE ENSAYO.....	5
5.4 ENSAYO DE TRACCIÓN .....	5
5.4.1 Descripción General .....	6
5.4.2 Instrumentación .....	6
5.5 ENSAYO DE FLEXIÓN.....	6
5.5.1 Descripción General .....	6
5.5.2 Instrumentación .....	6
5.6 ENSAYO DE METALOGRAFIA.....	6
5.6.1 Descripción General .....	6
5.6.2 Instrumentación .....	6
<b>6. PLAZOS DE ELABORACIÓN.....</b>	<b>7</b>

### **1. OBJETO**





El presente pliego de condiciones hace referencia a los diferentes requisitos técnicos, materiales, condiciones y ensayos para poder realizar un estudio sobre la viabilidad de la fabricación aditiva para la elaboración de componentes industriales en aleaciones de titanio.

## **2. MATERIALES**

### **2.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS**

El estudio se realizará sobre muestras fabricadas por fabricación aditiva de Ti6Al4V. Además, se realizará una comparación entre 3 escenarios de fabricación de Ti6Al4V diferentes.

- Escenario 1: Muestra de aleación Ti6Al4V con geometría de prisma de 57x12x12 mm fabricado por Electro Beam Melting (EBM) y sometida a un postproceso de prensado isostático en caliente (HIP) y un enfriamiento de 500 °C/min.
- Escenario 2: Muestra de aleación Ti6Al4V con geometría de prisma de 57x12x12 mm fabricado por Electro Beam Melting (EBM) y sometida a un postproceso de prensado isostático en caliente (HIP) y un enfriamiento de 100 °C/min.
- Escenario 3: Muestra de aleación Ti6Al4V con geometría de prisma de 57x12x12 mm fabricado por Electro Beam Melting (EBM).

## **3. CONDICIONES DE EJECUCIÓN**

### **3.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS**

#### 3.1.1 Corte

Se realizará una preparación de las muestras para obtener las diversas probetas. Se cortará la muestra en 3 porciones; dos de 27 mm de largo y una de 2 mm. Estos cortes se realizarán con el uso de una tronzadora y un disco de diamante.

#### 3.1.2 Probetas Tracción



Se obtendrán un total de 6 probetas para tracción de sección rectangular con una longitud total de 12 mm para cada uno de los 3 escenarios de fabricación. Para obtener las probetas que se someterán a ensayo de tracción, se empleará una fresadora de control numérico por computadora (CNC). Esto permite obtener de dimensiones similares.

### 3.1.3 Probetas Flexión

Se obtendrán un total de 5 probetas para flexión de sección rectangular con un ancho de 12 mm para cada uno de los 3 escenarios de fabricación. Para la obtención de estas probetas, se realizarán cortes con la tronzadora con un espesor de 3,5 mm.

### 3.1.4 Probetas Metalografía

Se prepararán 3 probetas de cada escenario de fabricación para la metalografía. Estas probetas estarán embutidas en la resina transparente ClaroFast de Struers. Se embutirán 3 probetas que han sido ensayadas previamente a flexión. Para su obtención, se realizarán los pertinentes procesos de desbaste y pulido para obtener una mejor superficie.

## 4. CONTROLES A REALIZAR

Una vez producidas las probetas se realizarán una serie de controles. En primer lugar, las probetas de tracción se someterán una inspección visual para comprobar que presentan la forma adecuada, así como las dimensiones para poder sujetarlas correctamente a las mordazas. Esto es debido a que las probetas tienen unas dimensiones tan pequeñas que se emplean unas mordazas específicas donde el extremo de la probeta se introduce en el interior de una mordaza con la propia forma del extremo. Por tanto, las dimensiones tienen que ser las correctas porque un milímetro demás puede suponer que no entre en la mordaza.

En cuanto a las probetas de flexión, la muestra de donde se extraen no ofrece problemas de dimensiones con la mordaza. Por tanto, se realizará, exclusivamente, una inspección visual para detectar un posible error en el corte. Finalmente, para las probetas de metalografía se inspeccionará la superficie final obtenido después del pulido para detectar cual quiere rayado que pueda dificultar



la posterior observación en el microscopio. Además, se comprobará si se ha producido alguna deformación durante el desbaste que afecte a la microestructura de la superficie.

## **5. ENSAYOS A REALIZAR**

### **5.1 GENERALIDADES**

Todo ensayo se realizará una vez se hayan preparado cada una de las muestras y se hayan realizado los diversos controles.

### **5.2 SECUENCIAS DE ENSAYOS**

Cada uno de los ensayos se ejecuta de la siguiente forma y siguiendo la secuencia siguiente:

1. Obtención de las probetas (apartado 3).
2. Medición de las dimensiones características de las probetas.
3. Preparación de la máquina donde se realizará el ensayo, mordazas, utillajes, etc.
4. Realización del ensayo.
5. Obtención de los datos del ensayo.
6. Análisis de los datos obtenido.

Esta secuencia se sigue para cada uno de los ensayos y se realizará para todo el lote de probetas de un escenario y seguidamente el siguiente lote de otro de los escenarios.

### **5.3 ACONDICIONAMIENTO Y TEMPERATURAS DE ENSAYO**

Las condiciones de ensayo serán en un ambiente con una temperatura de  $23 \pm 2$  °C y una humedad relativa de  $50 \pm 10$  %.

### **5.4 ENSAYO DE TRACCIÓN**



#### 5.4.1 Descripción General

Este ensayo consiste en someter la probeta a un esfuerzo axial creciente a una velocidad constante hasta que se produce la rotura de la probeta.

#### 5.4.2 Instrumentación

Máquina universal de ensayos Shimadzu AG 100KN con mordazas fabricadas específicamente para probetas de sección rectangular de pequeñas dimensiones.

### 5.5 ENSAYO DE FLEXIÓN

#### 5.5.1 Descripción General

Este ensayo consiste en someter la probeta a un ensayo de flexión a 4 puntos. Este ensayo nos ayuda a conocer el comportamiento de esfuerzo-deformación y la resistencia del material.

#### 5.5.2 Instrumentación

Máquina de universal de ensayos Shimadzu AG 100KN con una base fija con 2 apoyos cilíndricos una pieza superior donde se aplicará la carga a través de 2 apoyos cilíndricos.

### 5.6 ENSAYO DE METALOGRAFIA

#### 5.6.1 Descripción General

En el ensayo de metalografía se ataca químicamente las muestras para observar la microestructura del material.

#### 5.6.2 Instrumentación

Se empleará como reactivo para el ataque químico, el compuesto Kroll. Para la observación de la microestructura se empleará un microscopio óptico y para una mayor resolución se empleará un microscopio de barrio electrónico.



## **6. PLAZOS DE ELABORACIÓN**

Desde la recepción de las muestras, se emplearán 15 días para la realización de los diferentes ensayos.

Comenzaremos con la preparación de las muestras que se estima un periodo de 3 días. Para los ensayos de tracción y flexión un total de 4 días. La preparación metalográfica, así como la observación y obtención de imágenes en el microscopio unos 7 días.

Finalmente, para la elaboración de los informes con los datos obtenidos, así como un estudio de las diferentes propiedades y características de cada uno de los materiales se estiman unos 10 días.

En el caso de necesitar reunirse con el cliente para modificar algún tipo de ensayo o aclarar dudas, se estiman no más de 5 días.

Todo ello hace un total de 30 días de trabajo.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

---

**DOCUMENTO N°3:**

## **PRESUPUESTO**

**ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DE LA FABRICACIÓN ADITIVA PARA LA  
ELABORACIÓN DE COMPONENTES INDUSTRIALES EN ALEACIONES DE  
TITANIO**

TRABAJO FINAL DEL

**Grado en Ingeniería Mecánica**

REALIZADO POR

**Ricardo Ruiz Monsalve**

TUTORIZADO POR

**Ángel Vicente Escuder**

**Emilio Francisco Segovia**

**CURSO ACADÉMICO: 2019/2020**



## ÍNDICE

<b>1. MUESTRAS .....</b>	<b>3</b>
<b>2. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS .....</b>	<b>3</b>
<b>3. PERSONAL .....</b>	<b>4</b>
<b>4. AMORTIZACIÓN Y RECAPITALIZACIÓN.....</b>	<b>4</b>
<b>RESUMEN DE PRESUPUESTO .....</b>	<b>5</b>

## 1. MUESTRAS

MUESTRAS Y MATERIALES					
MUESTRAS					
Referencia	Uds.	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total
MP-1	u	Muestras Ti6Al4V fabricado por EBM 57x12x12 mm	3	47	141,00
ATM-92004492	l	Reactivo Kroll para ataque químico de la superficie pulida	0,05	43,70	2,19
40100055	kg	Resina ClaroFast de la empresa Struers para embutir las muestras	0,20	37,00	7,40
40600371	l	Suspensión de diamante para pulido del fabricante Struers	0,10	2.660,00	266,00
<b>COSTE MUESTRAS Y MATERIALES</b>					<b>416,59</b>

## 2. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

COSTES PREPARACIÓN MUESTRAS Y ENSAYOS					
EQUIPO					
Referencia	Uds.	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total
LP-5	u	Corte y preparación muestras para ensayos mecánicos	33,00	104,00	3.432,00
CP-1	u	Preparación muestras metalografía	9,00	45,33	407,97
SEM	u	Microscopio Electrónico de Barrido	3,00	120,87	362,61
MO	u	Microscopia Óptica	3,00	6,80	20,40
SF	u	Ensayo de Flexión	15,00	36,53	547,95
ST	u	Ensayo de Tracción	18,00	43,10	775,80
<b>COSTE PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS Y ENSAYOS</b>					<b>5.546,73</b>



### 3. PERSONAL

PERSONAL					
Referencia	Uds.	Denominación	Cantidad	Precio (€)	Total
I-1	h	Tutores del proyecto (Ingenieros)	40,00	40,00	1.600,00
I-2	h	Ingenieros que ayudaron a la preparación de las muestras	20,00	40,00	800,00
I-3	h	Titulado Universitario (Ingeniero)	220,00	30,00	6.600,00
<b>COSTE PERSONAL</b>					<b>9.000,00</b>

### 4. AMORTIZACIÓN Y RECAPITALIZACIÓN

COSTES AMORTIZACIÓN Y RECAPITALIZACIÓN		
DATOS		NOTAS
Máquinas	400.000,00	El precio corresponde a la suma total de los equipos empleados tanto para la preparación de las muestras como los equipos de los ensayos.
Periodo Amortización (años)	10,00	Se establece un periodo de 10 años para una amortización constante de todas las máquinas
Tiempo funcionamiento (h/año)	1.650,00	
AMORTIZACIÓN		
Amortización Anual		40.000,00
Amortización por hora		24,24
Días de uso de la maquinaria para el Proyecto		15,00
Horas de uso proyecto		80,00
Amortización tiempo Proyecto		1.939,39
RECAPITALIZACIÓN		
%Recapitalización a 10 años		21,90%
Valor total recompra		487.596,00
Recuperación capitalización anual		8.759,60
Recapitalización por hora		5,31
Recapitalización proyecto		424,71
<b>TOTAL, AMORTIZACIÓN + RECAPITALIZACIÓN PROYECTO</b>		<b>2.364,10</b>



## RESUMEN DE PRESUPUESTO

CAPÍTULOS	IMPORTE
Capítulo 1: Muestras y Materiales	416,59
Capítulo 2: Preparación de las Muestras y Ensayos	5.546,73
Capítulo 3: Personal	9.000,00
<b>PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL</b>	<b>14.963,32</b>
6% gastos generales	897,80
10% Beneficio Industrial	1.496,33
2% Reparación y Mantenimiento	299,27
Amortización y Recapitalización Equipos	2.364,11
<b>PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN FINAL SIN IVA</b>	<b>20.020,82</b>
IVA	21%
<b>PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN FINAL CON IVA</b>	<b>24.225,19</b>