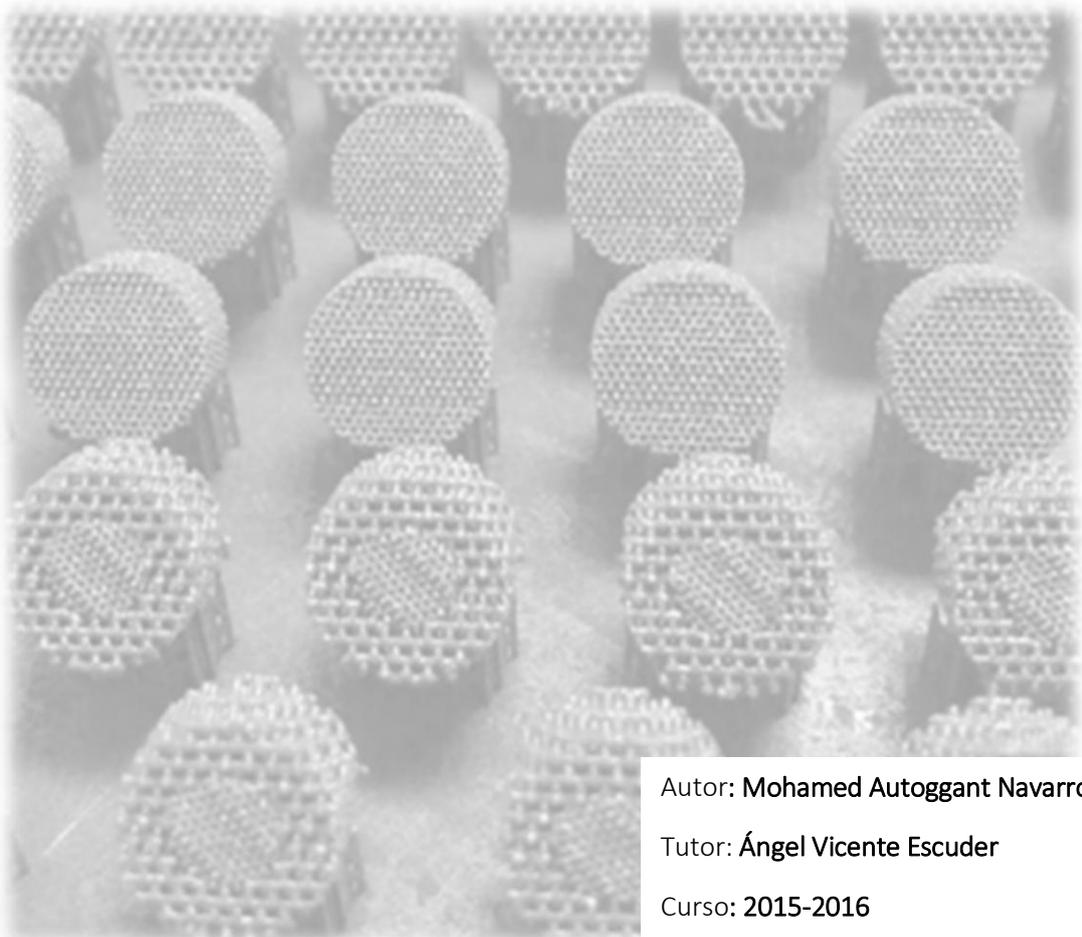




TRABAJO FIN DE GRADO

Ingeniería Mecánica

“Desarrollo de estructuras porosas de aleaciones de titanio mediante técnicas aditivas”



Autor: Mohamed Autoggant Navarro

Tutor: Ángel Vicente Escuder

Curso: 2015-2016



DEFINICIÓN DE ACRÓNIMOS

3D: 3 Dimensiones

ABF: Formato de fichero de capeado para tecnología EBM.

AM: Additive Manufacturing

ASTM: American Society for Testing and Materials.

CAD: Computer-Aided Design, (Diseño Asistido por Computador).

DLP: Digital Proces Light (Procesamiento por Luz Digital)

E: Modulo de Young o módulo de elasticidad.

EBM: Electron Beam Melting (Fusión por Haz de Electrones).

FA: Fabricación Aditiva.

FDM: Fused Deposition Modeling.

HB: HARDNESS BRINELL (Dureza Brinell)

HV :Hardness Vickers

L.e: Limite Elástico.

MEF: Método de los Elementos Finitos.

SCAFFOLF :Esponja metálica

SLA: Stereolithography (Estereolitografía).

SLM: Selective Laser Melting (Fusión Selectiva por Laser).

SLS: Selective Laser Sintering (Sinterizado Selectivo Laser)

STL: Standard Tessellation Language. Formato del fichero utilizado para representar geometrías 3D para tecnologías de FA.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo la caracterización mecánica de un tipo de estructura porosa llamada “scaffold”. Dicha estructura se procesará a través de un nuevo concepto de fabricación llamada fabricación aditiva y el cual se utilizará, en este caso, aleaciones de titanio para su conformado.

Se darán a conocer las principales tecnologías de fabricación 3D metálicas y que son utilizadas en la fabricación de componentes biomédicos. Entre ellas destacan la tecnología EBM (Electron Beam Melting) procesando el material mediante un haz de electrón y SLM (Selective Laser Melting) utilizando un láser.

Se reflejará también en este trabajo, cómo es procesado la aleación de titanio desde su estado en bruto hasta el conformado de la pieza. Todo ello pasando por las etapas de diseño, orientación de los modelos y soportes, capeado, fabricación y finalmente post-poceso. Se comentará además las restricciones tanto en fabricación como en diseño.

Se dará a conocer los principales materiales tratados como son el titanio, el cobalto y una última como el bronce. En cada una de ellas se prestará atención en las aleaciones utilizadas en la AM como Ti6Al4V Eli para el caso del titanio, la aleación Cromo-Cobalto y se añade el bronce sin ningún tipo de aleante a modo de ampliar los conocimientos de usos de esta tecnología.

Se centrará este estudio en la aleación Ti-6Al-4V Eli dadas las excelentes características de biocompatibilidad, propiedades mecánicas, baja densidad, resistencia a la corrosión, así como propiedades de oseointegración

Finalmente y siendo el punto clave de este TFG “Desarrollo de estructuras porosas de aleaciones de titanio mediante técnicas aditivas”, se caracterizará una muestra real de aleación de titanio. Dicha caracterización se realiza a través de un desarrollo experimental que va desde la preparación de las muestras para los ensayos metalográficos hasta los diversos ensayos mecánicos como los de dureza y de compresión. Una vez determinadas las propiedades mecánicas así como su morfología interna se extraerán las conclusiones en base a los resultados.

Se añade también un presupuesto del coste real de este tipo de estructuras fabricadas por EBM considerando el material empleado, el tiempo total de fabricación, la preparación de la máquina y el coste de la operación.



INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	8
2.	TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN ADITIVA	11
2.1.	CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACION ADITIVAS	11
2.2.	VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA FABRICACION ADITIVA	12
2.3.	TIPOS DE TECNOLOGÍA ADITIVA	15
2.4.	EBM (Fusión por haz de electrones)	18
2.4.1.	VENTAJAS DESTACABLES	18
2.4.2.	COMPONENTES	19
2.5.	SLM (FUSIÓN SELECTIVA POR LÁSER).....	22
2.5.1.	VENTAJAS DESTACABLES	22
2.5.2.	COMPONENTES.....	23
2.6.	COMPARACION SLM & EBM	25
3.	PROCESO	27
3.1.	ETAPA 1-DISEÑO DEL MODELO EN CAD A FORMATO STL	27
3.2.	ETAPA 2-ORIENTACIÓN DE LOS MODELOS Y ADICIÓN DE SOPORTES-	30
3.3.	ETAPA 3 -CAPEADO: DIVISIÓN VIRTUAL DEL FICHERO EN CAPAS-	31
3.4.	ETAPA 4-FABRICACIÓN POR CAPAS-	32
3.5.	POST-PROCESOS FA: LIMPIEZA Y ELIMINACIÓN DE SOPORTES	33
3.6.	RESTRICCIONES DE FABRICACIÓN	35
3.6.1.	AGUJEROS HORIZONTALES.....	36
3.6.2.	SUPERFICIES INCLINADAS	36
3.6.3.	VOLADIZOS MONO-APOYADOS Y BI-APOYADOS.....	38
3.6.4.	DETALLES	38
3.6.5.	MECANIZADO: ESPESOR A MECANIZAR PARA ELIMINAR LA RUGOSIDAD.....	39
3.7.	RESTRICCIONES DE DISEÑO	39
3.7.1.	REGLAS DE DISEÑO PARA AGUJEROS.....	40
3.7.2.	REGLAS DE DISEÑO PARA PLANOS INCLINADOS	41
3.7.3.	REGLAS DE DISEÑO PARA SOPORTES.....	41
3.7.4.	REGLAS DE DISEÑO PARA VOLADOS	41
3.7.5.	REGLAS DE DISEÑO PARA DETALLES	41
3.7.6.	ESPESOR A MECANIZAR PARA ELIMINAR LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL	42
4.	MATERIALES.....	44
4.1.	TITÁNIO Y SUS ALEACIONES.....	44
4.1.1.	PROPIEDADES GENERALES DEL TITANIO	45

4.1.2.	ESTRUCTURAS CRISTALINAS DEL TITANIO	47
4.1.3.	EFEECTO DE LOS ALEANTES.....	47
4.1.4.	ALEACIONES TITANIO.....	49
4.2.	LA ALEACIÓN TI6AL4V	50
4.2.1.	PROPIEDADES (TI6AL4V).....	51
4.2.2.	COMPORTAMIENTO ALOTRÓPICO TI6AL4V	53
4.2.3.	ETAPAS DE TRANSFORMACIÓN TI6AL4V POR EBM	55
4.3.	COBALTO Y SUS ALEACIONES	58
4.4.	CROMO	58
4.5.	COBALTO.....	59
4.5.1.	EFEECTO DE LOS ALEANTES Y ALEACION.....	60
4.5.2.	DIAGRAMAS DE FASE.....	61
4.6.	ALEACIÓN CR-CO-MO	63
4.6.1.	PROPIEDADES GENERALES	63
4.6.2.	COMPORTAMIENTO ALOTRÓPICO CR-CO	65
4.6.3.	ETAPAS DE TRANSFORMACIÓN CR-CO POR EBM	66
4.7.	COBRE Y SUS ALEACIONES	67
4.7.1.	PROPIEDADES GENERALES COBRE	67
4.7.2.	EFEECTO ALEANTES	71
4.8.	COMPORTAMIENTO ALOTRÓPICO DEL BRONCE PURO	73
5.	PLANIFICACION EXPERIMENTAL	78
6.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	83
6.1.	PRESENTACIÓN DE LOS 8 CUBOS POR EBM.....	83
6.2.	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	87
6.2.1.	FASE DE CORTE DE LAS MUESTRAS:	88
6.2.2.	FASE DE EMBUTICIÓN DE LAS MUESTRAS:.....	90
6.3.	ENSAYO METALOGRÁFICO.....	91
6.3.1.	DESBASTE GROSERO	92
6.3.2.	DESBASTE FINAL.....	92
6.3.3.	ATAQUE QUÍMICO:	94
6.3.4.	-CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LAS MUESTRAS MEDIANTE UNA LUPA. 95	
6.3.5.	CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LAS MUESTRAS MEDIANTE MICROSCOPIO ÓPTICO.....	100
6.4.	ENSAYO DE DUREZA.....	104
7.	RESULTADOS.....	109



7.1.	RESULTADOS ENSAYOS METALGRÁFICOS:	109
7.2.	RESULTADOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN:.....	111
7.3.	RESULTADOS ENSAYOS DE DUREZA	115
8.	CONCLUSIONES.....	117
9.	ANEJOS	118
9.1.	ANEJO 1: IMÁGENES LUPA.....	118
9.2.	ANEJO 2 :IMÁGENES MICROSCÓPIO ÓPTICO	123
9.3.	ANEJO 3:GRÁFICAS ENSAYO DE COMPRESIÓN.....	134
10.	PRESUPUESTO	142

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la fabricación aditiva o más comúnmente conocida como impresión 3D está despertando la curiosidad de sectores convencionales de fabricación como el aeronáutico, el de automoción o el sector biomédico.

Como consecuencia de un progresivo éxodo de la fabricación extensiva de piezas a terceros países, la industria europea y por ende la española se ve obligada a adaptarse rápidamente a las condiciones económicas del mercado. Este hecho implica una reducción de los volúmenes de producción a tan solo unas pocas unidades de alto valor añadido (ej. piezas aeronáuticas), cuando no, productos unitarios totalmente personalizados, como es el caso de los productos sanitarios (implantes, ortesis, etc.).

Ante este desafío, ha surgido un nuevo concepto de fabricación que se está posicionando en el mercado como pieza clave a la hora de dar respuesta a estos requerimientos, gracias a su gran libertad de diseño, la ausencia de utillaje y su rápida capacidad de respuesta. Estas son las denominadas “tecnologías de fabricación aditiva”:

La fabricación aditiva, o Additive Manufacturing (AM), se entiende como una fabricación en la cual se hace uso de una serie de tecnologías que, en un proceso automático, producen objetos tridimensionales directamente desde un modelo digital mediante la deposición de material de una forma muy precisa.

Este nuevo tipo de concepto de manufacturación no se puede entender como una nueva Revolución Industrial ya que no varía las fuentes de sustracción de energía. No obstante, sí se trata de una revolución tecnológica, ya que se tiene la posibilidad de realizar piezas de geometrías con altísimo grado de dificultad prescindiendo de utillajes; idólicamente, esta manera de entender la fabricación se podría ver como una tecnología que reproduce cualquier objeto que se desee siempre que éste se pueda dibujar.

Este nuevo concepto de fabricación es completamente distinto a los modelos anteriores de diseño de productos en el que ha ido variando desde varios siglos atrás.

Con la llegada de la Revolución Industrial a finales del siglo XVIII se cambió por completo la forma de ver la manufacturación, se pasó a dejar la artesanía apartada para poder utilizar procesos de mecanización y fabricación en serie gracias, por ejemplo, a la aplicación de la máquina de vapor en la producción.

Se considera además que ésta es la primera revolución industrial, basada en la adquisición de energía a través del carbón, una Segunda a finales del siglo XIX con la utilización del petróleo y la electricidad, e incluso una Tercera cuando se habla del uso de energía nuclear combinada con las anteriores (mediados siglo XX). El resto de innovaciones se podrían considerar como una revolución tecnológica (robotización, energías renovables,...).

Existen hoy en día gran cantidad de medios mecánicos diferentes que trabajan de formas completamente distintas entre ellos. Básicamente se podrían clasificar en tres grandes grupos, a saber: por mecanizado de material, por conformación de material y por adición de material (objeto este último del estudio llevado a cabo).

Se entienden los dos primeros como los procesos de fabricación convencionales ya que son los que más tiempo llevan instaurados en nuestra sociedad.

- **Fabricación Sustractiva:** se parte de un bloque de material de dimensiones mayores que la geometría final a obtener. Mediante sucesivas operaciones de arranque de material se elimina selectivamente el material creando la pieza deseada. Algunos ejemplos de esta tipología serían los procesos de fabricación siguientes:
 - **Mecanizado:** proceso de fabricación que comprende un conjunto de operaciones de conformación de piezas mediante la eliminación de material, ya sea por arranque de viruta o por abrasión (corte por agua, laser, etc).
 - **Electroerosión.** consiste en la generación de un arco eléctrico entre una pieza y un electrodo en un medio dieléctrico para arrancar partículas de la pieza hasta conseguir reproducir en ella las formas del electrodo. Ambos, pieza y electrodo, deben ser conductores, para que pueda establecerse el arco eléctrico que provoque el arranque de material.
- **Fabricación Conformativa:** el material se introduce en una matriz con la cavidad de la pieza que se desea obtener. El material de partida se adapta a la forma de la matriz, donde finalmente la pieza es extraída de la matriz.
 - **Moldeo por Inyección:** El material fundido es inyectado en la cavidad del molde, la cavidad es el negativo de la pieza, el material solidifica con la forma de la pieza.
 - **Forja, embutición:** El material se deforma plásticamente para que se adapte a la cavidad de la matriz.
 - **Termo-conformado:** una plancha o lámina de semielaborado termoplástico se calienta de forma que al reblandecerse puede adaptarse a la forma de un molde por acción de presión vacío o mediante un contramolde.
 - **Pulvimetalurgia convencional:** La cavidad del molde es rellena con material en formato polvo, tras un proceso de compactación y sinterización se extrae la pieza.
- **Fabricación Aditiva:** la pieza se fabrica, directamente a partir de un fichero 3D, añadiendo el material por capas.

Esta tipología de fabricación es como hemos comentado anteriormente el objeto de nuestro estudio y el campo de aplicación que nos atañe es el del sector biomédico

Este sector biomédico de gran impacto en la sociedad, imponen no solo requerimientos geométricos o de forma, sino también mecánicos y microestructurales, lo que hace necesario profundizar de forma exhaustiva en la determinación de las propiedades mecánicas y características metalográficas de los productos obtenidos mediante procesos aditivos.

Estos requerimientos de geometría se deben a que el sector biomédico precisa de elementos de poco tamaño, con poca densidad y con morfologías muy complejas que puedan simular con exactitud la forma del elemento biológico. A su vez, necesitan de materiales ligeros y rígidos capaces de aguantar las cargas a las cuales serán sometidas.

Otro aspecto de gran relevancia para el sector biomédico y por el cual se utiliza la AM son las menores impurezas que se generan en los procesos de fabricación aditiva frente a los convencionales. Esto es posible gracias a que durante el proceso de fabricación se conforma la pieza dentro de una cámara al vacío reduciendo las impurezas de O₂.

Asumiendo dicha necesidad, el presente TFG pretende analizar la influencia del procesado del material Ti6Al4V (material de gran aplicación en sectores altamente exigentes como son el de aeronáutico o el biomédico) mediante la tecnología aditiva “ElectronBeamMelting” sobre sus propiedades mecánicas y microestructurales.

De forma más concreta, se afrontará el Trabajo de fin de grado en el desarrollo de un tipo de estructura porosa llamada “scaffold” centrándose en el proceso de fabricación, en la morfología final y como consecuencia sobre las propiedades mecánicas finales.

2. TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN ADITIVA

En este apartado del TFG desarrollo de estructuras porosas mediante técnicas aditivas, nos centraremos en las tecnologías de fabricación aditiva que existen en la actualidad.

Se hará una clasificación sobre las máquinas más utilizadas en este campo y su evolución hasta el día de hoy. Se puntualizará dentro de la tecnología de fabricación en dos máquinas sobre la que versará el trabajo de fin de grado

- Laser Melting (SLM), Fusión selectiva por láser.
- Electron beam melting (EBM), Fusión por haz de electrones.

Estas dos alternativas son las más empleadas en el campo de la biomedicina para la fabricación de las prótesis debido especialmente a la rugosidad que tienen en el proceso los materiales, así como las dimensiones medianas de fabricación.

2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACION ADITIVAS

Para clasificar las tecnologías utilizadas en Additive Manufacturing no deben ser en función de su aplicación puesto que con la misma tecnología podemos fabricar prototipos, productos y utillajes.

Estas tecnologías sin embargo pueden ser clasificadas de muchas maneras, en función del tipo de energía que procesa el material: haz laser, haz de electrones, mascara de luz, etc. También pueden clasificarse en función del espesor de la capa y su resolución. No obstante la mejor manera de clasificarla es en función del material a procesar (Figura 1):

- Metales
- Cerámica
- Polímeros

En la siguiente figura, se presenta una clasificación en función del tipo de material que procesan polímero o metal, con algunas de las tecnologías más representativas.



Figura 1: Clasificación Fabricación Aditiva

2.2. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA FABRICACION ADITIVA

Las principales **ventajas** de las tecnologías de FA son:

1) Reducción del tiempo necesario de puesta en el mercado para productos personalizados (Time-to-market reduction).

Debido a que se tratan de procesos de fabricación directos desde el fichero CAD 3D, sin la necesidad de fabricar utillajes específicos previamente al producto personalizado como ocurre en los procesos convencionales de fabricación.

2) Completa libertad y flexibilidad en el diseño de producto.

Adiferencia de otros procesos de fabricación, la FA puede producir piezas con casi cualquier forma y complejidad, ya que no tiene ninguna de las limitaciones geométricas de los procesos de fabricación convencionales. Algunos ejemplos: ángulos de salida en moldeo o limitaciones de acceso de herramienta en mecanizado, etc.

3) Máximo ahorro de material.

El material es añadido selectivamente y no sustraído desde un bloque. Para algunas aplicaciones, especialmente en el sector del metal, existen casos de estudio donde se demuestra que los residuos producidos a partir de material en bruto se reducen hasta un 40% cuando se utilizan tecnologías de fabricación aditiva en vez de tecnologías sustractivas (mecanizado). Además entre el 95% y el 98% del material no utilizado puede ser reciclado.

4) Sin necesidad de inversión en moldes o utillaje.

La pieza se produce directamente a partir del fichero CAD 3D. Para obtener las primeras unidades se reducen tanto el coste de inversión como el tiempo necesario para la producción del utillaje que repercuten finalmente en las piezas fabricadas, como ocurre en procesos convencionales. Todo esto permite que las tecnologías de FA sean competitivas en la producción de series cortas y medias, el tamaño de la producción dependerá generalmente de la tecnología de FA, tipo de material, complejidad de la geometría de la pieza y de la competitividad de los procesos convencionales para este caso.

5) Fabricación automática de producto.

Las tecnologías de FA construyen de forma automática siguiendo la geometría CAD 3D del producto, sin la intervención de operarios y por tanto evitando errores humanos en la producción.

6) Piezas finales con densidad 100% (en el caso de las tecnologías de metal).

Se fabrican piezas con ninguna o prácticamente ninguna porosidad residual con excelente propiedades mecánicas, a diferencia de los procesos pulvimetalúrgicos convencionales.

7) Fabricación de geometrías imposibles para los procesos convencionales.

Las tecnologías de FA pueden producir piezas y moldes con canales de circulación de fluidos con cualquier forma y ramificación, también pueden fabricar productos huecos o cavidades internas o estructuras porosas diseñadas por CAD junto con el implante para favorecer el crecimiento óseo y la fijación del implante.

8) Fabricación de piezas Near Net Shape.

Existen aleaciones complejas o costosas de procesar por otros métodos de fabricación, ejemplo de esto son las superaleaciones base Níquel (Inconel) o cobalto-cromo. La FA permite fabricar con geometría muy cercana a la final, que pueden ser acabadas por mecanizado.

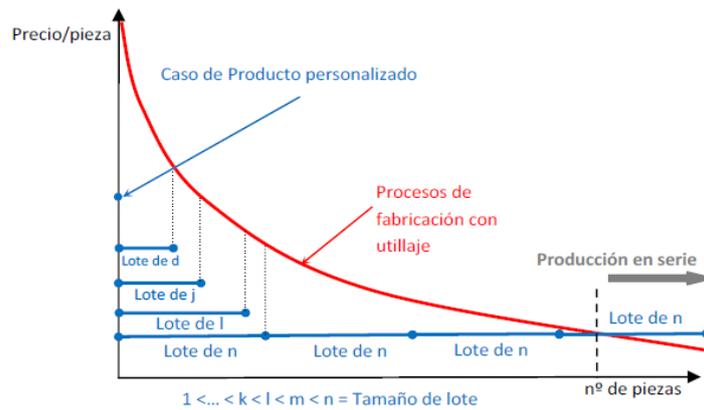


Figura 2: Relación coste-lote

Los principales **inconvenientes** de las tecnologías de Fabricación Aditiva son:

1) Alto coste de la materia prima.

Las materias primas deben transformarse al formato necesario (polvo del micraje necesario, hilo polimérico, resina líquida, etc.) para ser utilizado por cada tecnología de FA, los costes de transformación se repercuten en el material.

Aunque la creciente utilización de las tecnologías de FA ha permitido la aparición de un mayor número de proveedores y escalar la producción de los materiales, lo que ha producido un descenso del precio de la materia prima para FA.

2) Caracterización de las propiedades de los materiales procesados por FA.

Al tratarse de un proceso aditivo discontinuo las propiedades de los materiales son distintas en función de la dirección de fabricación, generalmente se comportan como materiales ortótropos con diferentes propiedades si se ensayan en dirección de la capa o en dirección perpendicular a la capa. Además según el material, el espesor de la capa, la tecnología y los parámetros de proceso esta diferencia puede ser mayor o menor.

3) Ausencia de software específico de diseño para tecnologías de FA.

La mayoría de los programas de diseño CAD 3D utilizan las operaciones básicas de mecanizado para modelar el producto, lo cual dificulta el modelado de productos muy complejos con curvas, splines, etc. que aprovechen las posibilidades de fabricación de las tecnologías aditivas.

4) Desarrollo de nuevos materiales.

Aunque ya se dispone de un número considerable de materiales para ser procesados por FA, estas tecnologías y sus capacidades podrían introducir ventajas competitivas en nuevas

aplicaciones, para ello es necesario el desarrollo de nuevos materiales, tanto los parámetros de proceso adecuados como el formato requerido.

5) Aumento de la velocidad de producción.

En el caso de las más recientes existe mucho margen de mejora para incrementar la velocidad del proceso para reducir el tiempo de proceso y su coste, se están realizando algunas investigaciones con láseres más potentes o un mayor número de láseres.

6) Mejora de la calidad superficial y la precisión dimensional.

Dependiendo de la aplicación y el acabado obtenido por la tecnología aditiva puede ser necesario realizar un mayor número de post-procesos y acabados superficiales, que incrementan el coste del producto.

Algunas investigaciones están tratando de reducir el tamaño del foco del láser y del haz de electrones, al mismo tiempo que se empiezan a utilizar polvos esféricos de menor tamaño.

2.3. TIPOS DE TECNOLOGÍA ADITIVA

En la actualidad existen muchos tipos de impresoras 3D de las cuales han ido evolucionando hasta el día de hoy (componentes, materiales, procesado...etc.).

Vamos a mencionar y definir brevemente las diferentes clases de máquinas y haremos hincapié en dos de ellas especialmente, EBM (ElectronBeamMeltin) y SLM (Laser Melting).

-FDM (Modelado por deposición fundida): Deposita plástico fundido capa por capa (Imagen 1).

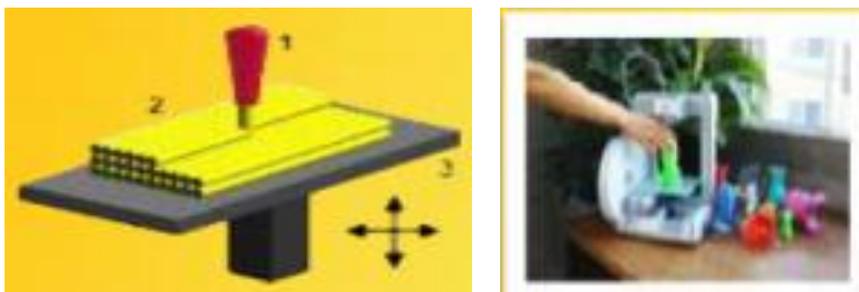


Imagen 1: Tecnología FDM

-DLP(Procesamiento de luz digital): Solidifica la resina proyectando la imagen del objeto capa a capa (Imagen 2).



Imagen 2: Tecnología DLP

-SLA (Estereolitografía): Es considerada la primera técnica de fabricación aditiva (Imagen 3) y fue patentada en 1986 por la empresa 3D. Solidifica una resina de un espesor de capa de 100 μm foto-reactiva con un láser Ultra Violeta. Además este tipo de máquinas es muy precisa.

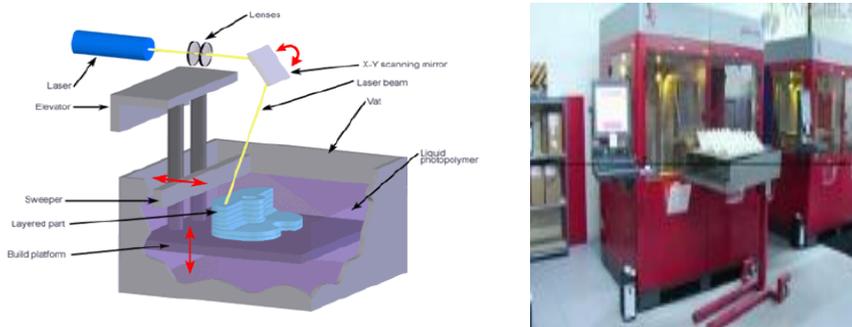


Imagen 3: Tecnología SLA

-ColorjetPrinting: Dibuja capa a capa con un aglutinante (Imagen 4).



Imagen 4: Tecnología ColorjetPrinting

-Bolígrafos 3D: Dibujas en tres dimensiones fundiendo plástico-tinta (Imagen 5).

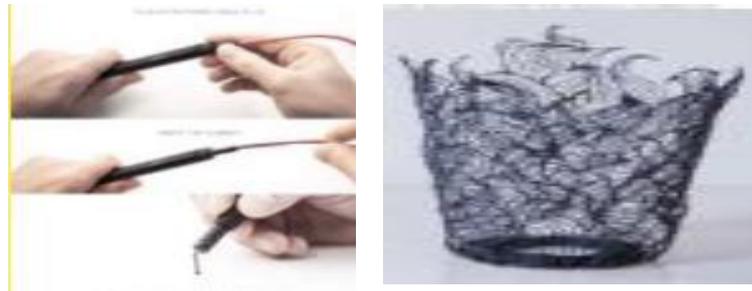


Imagen 5: Tecnología Bolígrafos 3D

Como ya hemos mencionado anteriormente, nos centraremos en el diseño con tecnología EBM (Electron Beam Meltin) y SLM (Selective Laser Melting).

En la siguiente tabla (Tabla 1) podemos observar la evolución de la tecnología aditiva desde sus inicios hasta el día de hoy:

AÑO	TECNOLOGÍA	ESTADO INICIAL DEL MATERIAL	EMPRESA COMERCIAL
1986	Estereolitografía Stereolithography — SL	Resina fotosensible en estado líquido	3DSystems
1987	Manufactura de partículas disparadas Ballistic particle manufacturing — BPM	Material fundido o semifundido	BPM
1988	Fabricación laminada Laminated object manufacturing — LOM	Película de material enrollada	Helisys Cubic Technologies
1988	Fabricación automática diseño controlado Design controlled automatic fabrication — De5CAF	Resina fotosensible en estado líquido	Light sculpting
1988	Forma fundida (método de deposición de soldadura) Shape melting (weld deposition)	Material fundido o semifundido	Babcock & Wilcox
1989	Sinterizado selectivo láser Selective laser sintering — SLS	Material particulado	DTM 3DSystems
1990	Fotopolimerización por UV Solid ground curing — SGC	Resina fotosensible en estado líquido	Cubital (Israel)
1991	Fabricación laminada Laminated object manufacturing — LOM	Película de material enrollada	Kira (Japón) Solidimension 3DSystems
1991	Inyección de fotopolímero Jetted photopolymer	Resina fotosensible en estado líquido	Brother Kogyo Kabushiki Kaisha (Japón)
1992	Deposición de hilo fundido Fused deposition modelling — FDM	Material fundido o semifundido	Stratasys
1992	Partículas disparadas con material soporte Inkjet whit second support material	Material fundido o semifundido	3DSystems Solidscape
1992	Modelado multibocilla Multijet modeling (Thermal SL) — MJM	Resina fotosensible en estado líquido	3DSystems
1993	Proyección aglutinante Direct shell production casting — DSPC	Material particulado	Soligen
1993	Impresión tridimensional 3D printing — 3DP	Material particulado	Zcorp Prometal
1993	Partículas metálicas disparadas Liquid metal jet printing — LMJP	Material fundido o semifundido	Incre
1998	Fusión por rayo de electrones Electron beam melting — EBM	Material particulado	Arcam limited (UK)
2000	Conformado láser de material particulado Laser powder forming — LPF	Material particulado	Optomec
2001	Prototipado rápido congelado Rapid freeze prototyping — RFP	Agua en estado líquido	New Jersey Institute of Technology
2001	Variante de estereolitografía Stereolithography (variant) — SL	Resina fotosensible en estado líquido	University of Connecticut
2003	Variante de sinterizado selectivo láser Selective laser sintering (variant) — SLS	Material particulado	Speed part RP AB (Suecia)
2003	Sinterizado selectivo por inhibición Selective inhibition sintering — SIS	Material particulado	University of Southern California

Tabla 1: Historia de la manufactura por capas.

2.4. EBM (Fusión por haz de electrones)

Este proceso está patentado por la empresa sueca [Arcam](#) (1997) y consiste en fusionar un polvo de metal en vacío (para evitar porosidades y defectos) usando un haz de electrones.



Imagen 6: EBM Arcam Q10

Esta tecnología es capaz de imprimir piezas muy densas y fuertes. Además, apenas produce residuos ya que en el postprocesado se recupera casi todo el material sobrante.

Muy útil para estructuras muy complejas (no se producen termogradientes como en otros procesos de fusión de lecho de polvo). Apto para aplicaciones de transferencia de calor incluso con materiales ligeros.

Útil para piezas producidas en pequeñas series, prototipos de forma y ajuste, prototipos funcionales y producción final de piezas de apoyo.

Gran aplicación en la industria médica para implantes de cirugía u ortopédicos personalizados.

No obstante, las impresoras 3D de EBM son muy caras y además requieren de un personal muy especializado para su manejo, por lo que la inversión inicial es muy alta.

Por otro lado, la superficie final de las piezas es rugosa, haciendo necesario un postprocesado mecánico si la aplicación lo requiere.

2.4.1. VENTAJAS DESTACABLES

- Capacidad de procesar cualquier material conductor eléctrico.
- Tecnología rápida, breve plazo de entrega gracias a la elevada potencia de chorro de 3000W.
- La temperatura de polvo ronda 650-700°C, implicando menor salto térmico respecto a la temperatura de fusión mejoran las propiedades mecánicas y la microestructura de las piezas.
- Las piezas tienen alta pureza debido al procesado en vacío.
- Inversión nula en utillajes: Estas tecnologías fabrican productos directamente del CAD, no utilizan utillajes.

2.4.2. COMPONENTES

En este subapartado vamos a tratar los componentes (Imagen 7) que conforman la máquina. Para ello hemos escogido la máquina Arcam Q10 (Imagen 6), puesto que se trata de un equipo destinado a la producción de componentes de tamaño pequeño-mediano y con mucha precisión ideales para implantes ortopédicos

De manera esquemática, la máquina consiste en:

- Un cabezal donde se produce el haz de electrones,
- Un contenedor donde se aloja el material con el que se realiza la pieza,
- La cámara de fabricación,
- Un distribuidor de las capas de material
- Tres juegos de bobinas para la modulación y dirección del haz de electrones.

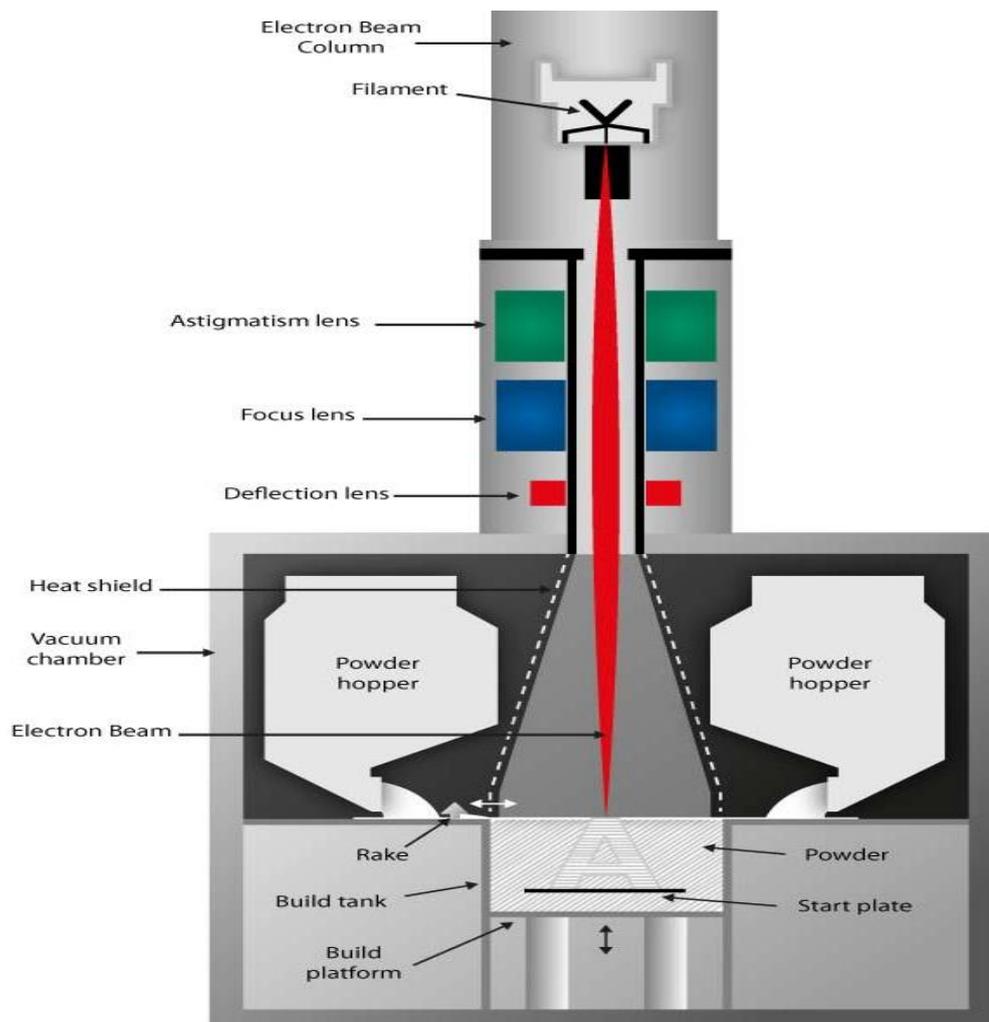


Imagen 7:Esquema básico componentes EBM Arcam Q10

A continuación, definiremos de una forma más detallada las principales partes que conforman la máquina y su funcionamiento.

Cabezal: Está conformado por un filamento de tungsteno y un ánodo (Imagen 8) .

Para generar el haz de electrones, un filamento de tungsteno es calentado hasta el blanco, más o menos alrededor de 5000 °C.

De esta manera, la diferencia de potencial entre el filamento de tungsteno y el ánodo de cristalino, excita los electrones generando un ‘chorro’ de electrones haciendo que atraviesen el cabezal.

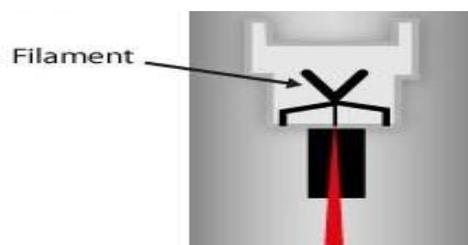


Imagen 8: Cabezal EBM Arcam Q10

Bobinas y lentes: Una vez se ha generado el haz de electrones en el cabezal, este es regulado mediante dos bobinas y dos lentes (Imagen 9) que determinan la dirección del campo eléctrico.

El haz pasa por varias lentes, convergentes y divergentes, para conseguir que se concentre el campo eléctrico y así elevar la potencia de fundición en la hora del proceso.

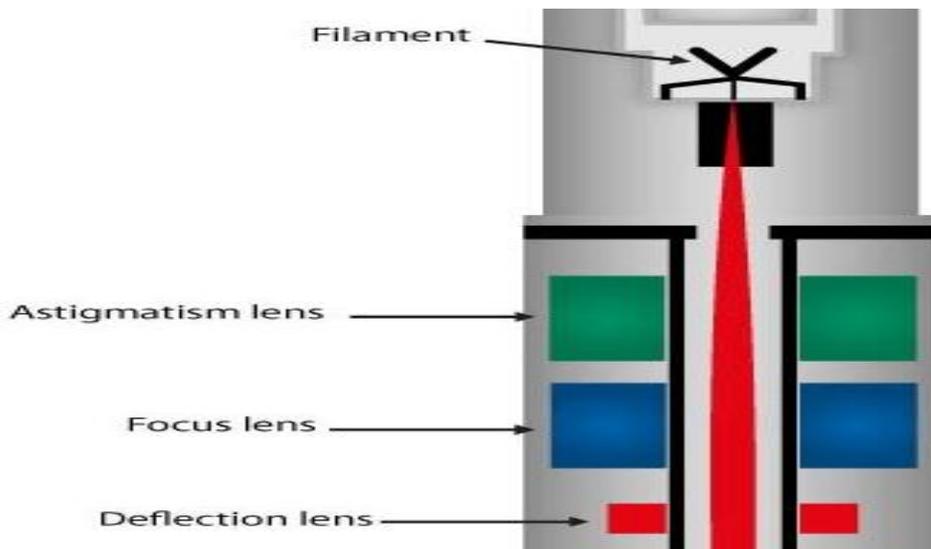


Imagen 9: Bobinas y lentes EBM Arcam Q10

Cámara de fabricación: Es la zona donde se ejecuta el proceso. Sus dimensiones están limitadas a piezas de fabricación relativamente medianas, no obstante, es ideal para piezas de implantes que no necesitan de tamaños considerables.

En la cámara se trabaja al vacío (1×10^{-3} mbar) para eliminar las impurezas que puedan existir en el ambiente, obteniendo de esta forma un material con mejores propiedades mecánicas.

Dicho vacío puede ser regulado por la máquina hasta 1×10^{-5} mbar.

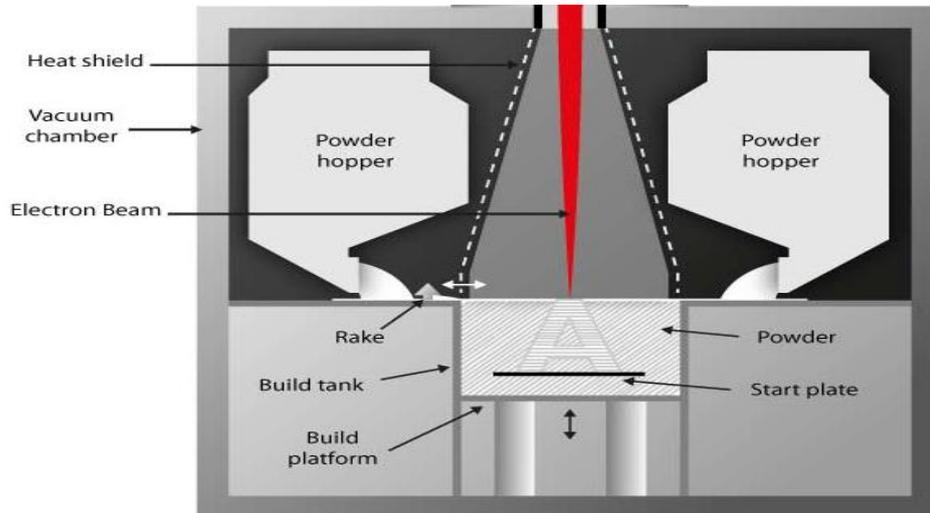


Imagen 10: Cámara de fabricación EBM Arcam Q10

La cámara de trabajo está compuesta por un tanque de trabajo (Imagen 10) de dimensiones máximas de fabricación de (200x200x180 mm), de una plataforma formada por un plato donde se alojará la pieza a fabricar y de un distribuidor de capas.

Además, la cámara de trabajo dispone de dos contenedores donde se aloja el polvo del material a trabajar

El fabricante por excelencia de esta variedad de tecnología, ARCAM, especifica las diferentes características técnicas (Tabla 2) de la máquina en la siguiente tabla.

Process type	Hot powder bed/high vacuum (temperature material dependent)
Max. build size	200x200x180 mm (W x D x H)
Max. Beam power	3000 W
Cathode type	Single crystalline
Min. Beam diameter	100 μ m
EBM MultiBeam™ technology	Multiple melt pool process
Max. EB translation speed	8000 m/s
Active cooling	Water-cooled heat sink
Vacuum base pressure	1×10^{-5} mbar
Build atmosphere	1×10^{-3} mbar partial pressure of He
He consumption, build process	1 liter / hour
He consumption, build cool down	50-75 liters / build
Process control	Layer verification camera system
Power supply	3 x 400 V, 32 A, 7kW
Size	1850 x 900 x 2200 mm (W x D x H)
Weight	1420 kg
Process computer	PC
CAD interface	Standard: STL
Network	Ethernet 10/100/1000
Certification	CE

Tabla 2: Características técnicas EBM Arcam Q10

2.5. SLM (FUSIÓN SELECTIVA POR LÁSER)

La tecnología Selective Laser Meltin (SLM) fue patentada por Dr. Carl Deckard y Dr. Joe Beaman en la University of Texas at Austin a mediados de los años 80.

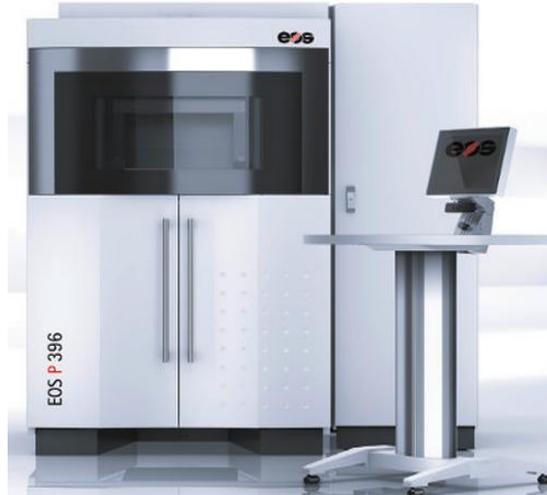


Imagen 11: Máquina -M 280- EOS

Deckard and Beaman formaron la compañía DTM. En 2001, 3D Systems el mayor competidor de DTM adquirió la compañía. Consiste en fundir el material en polvo mediante un láser, en este caso la fabricación no se hace al vacío y el láser sigue una trayectoria descrita previamente por un programa CAD. Al igual que en EBM, imprime piezas densas y fuertes además de reutilizar el material sobrante.

Los sectores más comunes para el uso de esta tecnología son el Sector médico-sanitario, sobre todo para implantes dentales y para tejidos metálicos para la osteointegración, además de sectores de automoción y aeronáuticos.

2.5.1. VENTAJAS DESTACABLES

- Fabricación de componentes con forma compleja y única a partir de polvo.
- Resistencia a temperaturas más elevadas que en el caso de EBM
- Capacidad de realizar estructuras de bajo peso, livianas.
- Propiedades muy similares a las de fundición y forjado
- Inversión nula en utillajes. Al tratarse la materia prima de polvo no es necesario de columnas que soporten al elemento mientras se va creando
- El láser que utiliza es poco potente (de 25 a 50W).
- No precisa de procesos de post-curado ni de eliminación del material sobrante.
- Muy buena precisión.

2.5.2. COMPONENTES

Hemos escogido el modelo -M 280- de la empresa EOS (Imagen 11) al ser la máquina más utilizada en los sectores antes mencionados.

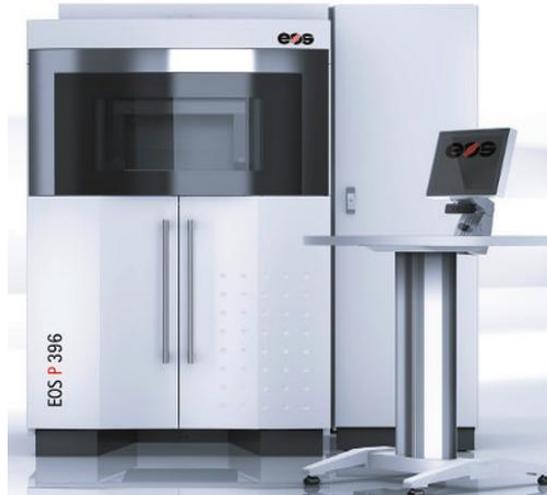


Imagen 11: Máquina -M 280- EOS

De manera esquemática, la máquina consiste en:

- Un láser y espejos por donde circula el rayo.
- Un contenedor donde se aloja el material con el que se realiza la pieza.
- La cámara de fabricación.
- Un distribuidor de las capas de material.

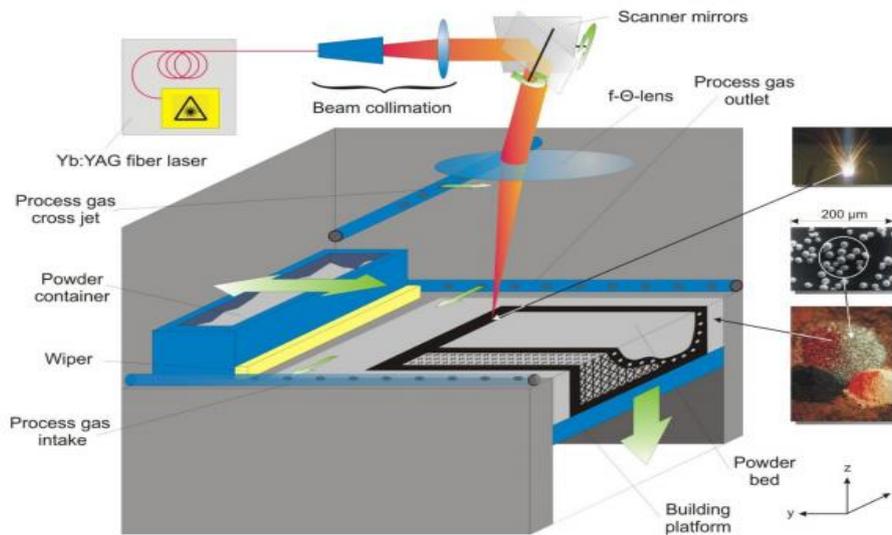


Imagen 12: Esquema básico componentes M 280 EOS

A continuación, definiremos de una forma más detallada las principales partes que conforman la máquina y su funcionamiento.

Láser y espejos: El modelo está conformado primeramente por un tubo de descarga (Imagen 13). Dicho tubo está conformado por un gas (CO₂), medio por donde se amplía la señal del rayo láser y donde se produce una descarga eléctrica. Este láser realiza el aporte de energía necesaria para fundir las partículas de polvo logrando que éstas se unan las unas a las otras.

Una vez sale el rayo este es reflejado mediante espejos hacia la zona de trabajo. Tradicionalmente, los espejos son de tipo [multicapa](#) fabricados en [silicio](#), en [Mo](#) o en [oro](#).

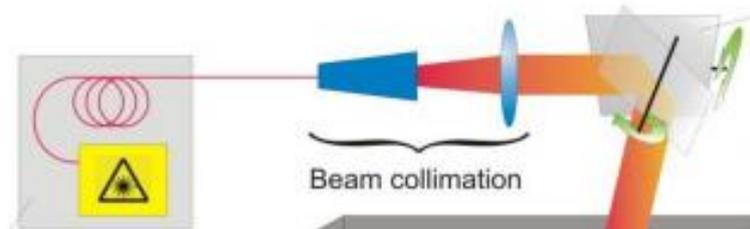


Imagen 13: Láser y espejos -M 280- EOS

Cámara de fabricación: Al igual que EBM, es la zona donde se ejecuta el proceso. Sus dimensiones están limitadas a piezas de fabricación relativamente medianas, no obstante, es ideal para piezas de implantes que no necesitan de tamaños considerables.

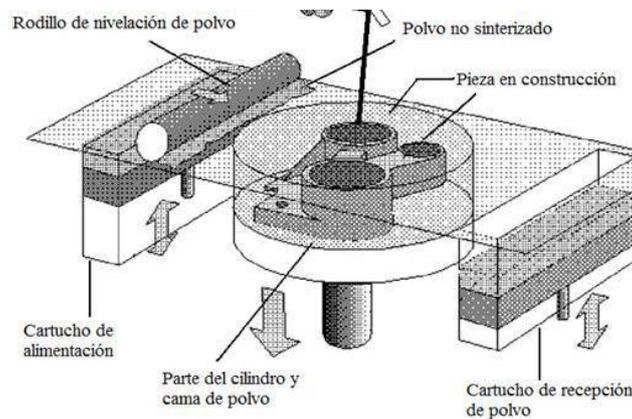


Imagen 14: Cámara de fabricación

Suele constar de una plataforma de trabajo (Imagen 14) articulada mediante pistones que suben y bajan, de dos cartuchos donde se almacena el polvo uno de alimentación y otro de recepción y de un rodillo expander del polvo.

Las dimensiones de la cámara de fabricación son 340x340x620 mm.

En la tabla siguiente se muestra las especificaciones técnicas del modelo m 280 del fabricante EOS.

Technical Data	
Building volume (including building platform)	250 mm x 250 mm x 325 mm (9.85 x 9.85 x 12.8 in)
Laser type	Yb-fibre laser, 200 W or 400 W (optional)
Precision optics	F-theta-lens, high-speed scanner
Scan speed	up to 7.0 m/s (23 ft./sec)
Variable focus diameter	100 - 500 μm (0.004 - 0.02 in)
Power supply	32 A
Power consumption	maximum 8.5 kW / typical 3.2 kW
Nitrogen generator	integrated
Compressed air supply	7,000 hPa; 20 m ³ /h (102 psi; 706 ft ³ /h)
Dimensions (W x D x H)	
System	2,200 mm x 1,070 mm x 2,290 mm (86.6 x 42.1 x 90.1 in)
Recommended installation space	min. 4.8 m x 3.6 m x 2.9 m (189 x 142 x 114 in)
Weight	approx. 1,250 kg (2,756 lb)
Data preparation	
Software	EOS RP Tools; EOSTATE Magics RP (Materialise)
CAD interface	STL. Optional: converter for all standard formats
Network	Ethernet

Tabla 3: Especificaciones técnicas M 280 EOS.

2.6. COMPARACION SLM & EBM

Una vez hemos detallado las máquinas de fabricación aditiva más utilizadas en AM para el sector biomédico, pasaremos a comparar un modelo con otro reflejado en la siguiente tabla (Tabla 4):

Characteristic	Electron beam melting	Selective laser melting
Thermal source	Electron beam	Laser
Atmosphere	Vacuum	Inert gas
Scanning	Deflection coils	Galvanometers
Energy absorption	Conductivity-limited	Absorptivity-limited
Powder pre-heating	Use electron beam	Use infrared heaters
Scan speeds	Very fast, magnetically-driven	Limited by galvanometer inertia
Energy costs	Moderate	High
Surface finish	Moderate to poor	Excellent to moderate
Feature resolution	Moderate	Excellent
Materials	Metals (conductors)	Polymers, metals and ceramics
Powder size	45-100 μm	10-45 μm

Tabla 4: Comparación SLM & EBM

Se diferencian principalmente en el medio por el cual se sinteriza el polvo, para SLM utiliza un láser (Imagen 15) , en cambio EBM hace uso de un campo de haz de electrones.

Otro aspecto a destacar es el ambiente dentro de la cámara de fabricación, Por un lado, el haz de electrones trabaja al vacío para eliminar impurezas y con el método selectivo por láser hace uso de un gas inerte, en este caso CO2.

El tamaño del polvo acepta mayores tamaños para el caso de EBM.

El modelo EBM es más rápido que el SLM debido a que el haz de electrones es dirigido por bobinas, en cambio SLM depende fundamentalmente de la inercia de galvanómetros a la hora de ejecutar las diferentes trayectorias de escaneo del láser.

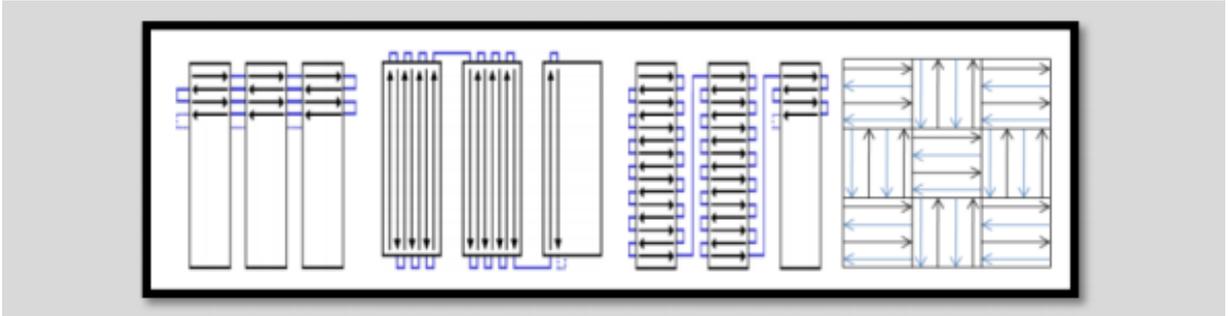


Imagen 15: Diferentes trayectorias de escaneo en una capa. De izquierda a derecha: a) Filas primero; b) Columnas primero; c) Con “stripes”; d) Ajedrezado.

3. PROCESO

En este apartado se describen todas las etapas del proceso de fabricación aditiva por capas, cubriendo desde las etapas iniciales de preparación hasta los post-procesos típicos.

Hemos distinguido 5 etapas en el proceso de fabricación:

1. Diseño del modelo en CAD a formato STL.
2. Orientación de los modelos y soportes.
3. Capeado.
4. Fabricación aditiva por capas.
5. Post proceso.

Finalmente se expondrán las limitaciones y restricciones del diseño para conformar de forma óptima la fabricación de componentes mediante tecnologías aditivas.

3.1. ETAPA 1-DISEÑO DEL MODELO EN CAD A FORMATO STL

Las tecnologías de fabricación por adición de material por capas permiten la fabricación de piezas y productos con geometrías muy complejas, prácticamente cualquier geometría es fabricable. Esto es debido a que no tienen las limitaciones de los procesos de fabricación convencionales (mecanizado, forja, inyección, etc.).

Estas limitaciones de los procesos de fabricación convencionales pueden terminar condicionando la geometría del producto para que sea fabricable, aunque no aporten ningún valor añadido a su funcionalidad, incluso pueden llegar a reducirla, por ejemplo, aumentando su peso.

Las tecnologías aditivas fabrican utilizando únicamente materia prima y el fichero CAD 3D de la pieza o producto, no existen utillajes ni sus limitaciones. Por tanto, la geometría del producto, que cumple con la funcionalidad para la que fue diseñada, no debe ser prácticamente modificada para que pueda ser fabricada con la mayoría de las tecnologías aditivas, a diferencia de lo que ocurre con los procesos convencionales.

Por esta razón, puede afirmarse que la complejidad del diseño de un producto no incrementa el coste de fabricación con tecnologías de FA.

No ocurre así con los procesos convencionales, por ejemplo en mecanizado: donde cuanto más compleja sea la pieza, necesitará un mayor número de montajes y de operaciones de fresado, que finalmente se repercutirán en el coste de producción de la pieza.

Los procesos de fabricación aditiva permiten colocar o añadir selectivamente el material donde sea necesario, por ejemplo, para soportar las cargas y condiciones de funcionamiento. Incluso es posible, fabricar productos que incluyan regiones con estructuras espaciales en 3D para aligerar la pieza, espesores de pieza variables, zonas reforzadas (según las cargas a soportar), cavidades (donde no se necesita material), etc.

Por tanto, el diseño de un producto puede ser totalmente orientado a la función que debe realizar y para comprobar su funcionamiento se realizan simulaciones y cálculos mediante ordenador por el Método de Elementos Finitos (MEF).

Estas herramientas permiten simular el comportamiento de un diseño de acuerdo a las sollicitaciones a las que se verá sometido: por ejemplo, el nivel de tensiones al que se encuentra sometido un componente, dada una geometría, dadas unas cargas, un material y unas condiciones de contorno; la transmisión de calor a través de una pieza, etc.

Las simulaciones MEF, permiten optimizar la cantidad de material de una pieza, dadas unas cargas y condiciones de contorno, mediante iteraciones y variaciones de la geometría inicial.

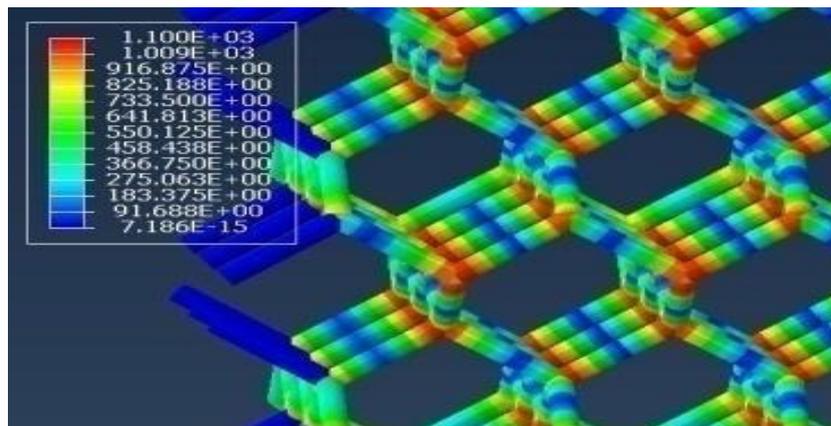


Imagen 16: Distribución de esfuerzos de Von Mises (MPa) del material al ser sometido a una compresión vertical con una deformación

Estas herramientas orientan al ingeniero indicándole que región (Imagen 16) de la pieza trabaja menos que otras, por tanto, en esta región de la pieza puede reducirse la cantidad de material y otras zonas reforzarse para soportar las condiciones de funcionamiento.

Con este apoyo informático y con la FA pueden obtenerse diseños de producto con geometrías complejas, optimizadas y con el mínimo material necesario para soportar las condiciones de funcionamiento.

Por lo tanto, una vez hemos optimizado mediante MEF el diseño del producto, tendremos que convertir nuestro fichero CAD 3D a un formato compatible con la tecnología a utilizar.



Imagen 17: Tibia fracturada sin placas: a) Modelo 3D, b) Modelo EF.

Los ficheros de formato STL son los ficheros que habitualmente se procesan en todas las impresoras 3D o sistemas de prototipado. Al igual que ANSYS, representa aproximadamente la geometría de la pieza mediante una malla cerrada de triángulos (Imagen 18).

Esta exportación se puede hacer variando la resolución de acuerdo a las necesidades, alta o baja resolución. A mayor densidad de triángulos (resolución) mejor aproximación entre el fichero STL y el CAD de la pieza.

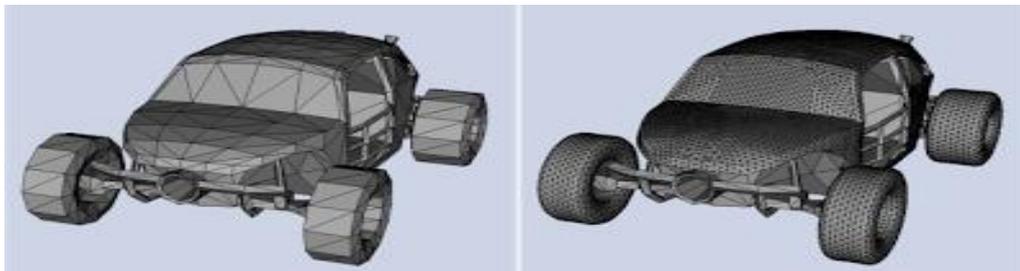


Imagen 18: Malla cerrada de triángulos formato STL

Sin embargo, para generar el fichero STL previo la fabricación, se debe desarrollar un diseño teniendo en cuenta inicialmente que será fabricado por la tecnología de fabricación aditiva, por lo tanto, resulta necesario hacer un análisis del modo en que el material es procesado sucesivamente por capas, sus capacidades y limitaciones.

Más adelante se detallarán que capacidades y limitaciones tiene la FA utilizando como tecnología SLM.

3.2. ETAPA 2-ORIENTACIÓN DE LOS MODELOS Y ADICIÓN DE SOPORTES-

Los modelos STL de las piezas son colocadas en una plataforma virtual, específica para cada tecnología, donde las modelos STL son dispuestos con la orientación de fabricación más favorable (Imagen19), de acuerdo con las capacidades y limitaciones de cada proceso de fabricación aditiva.



Imagen19: Izquierda, esta orientación del modelo obliga a colocar más soportes que en la orientación de la derecha.

Existen zonas geométricas de la pieza que no pueden ser fabricadas directamente de forma aditiva y es necesario añadir “soportes” (Imagen 20) para asegurar la correcta fabricación de la pieza.

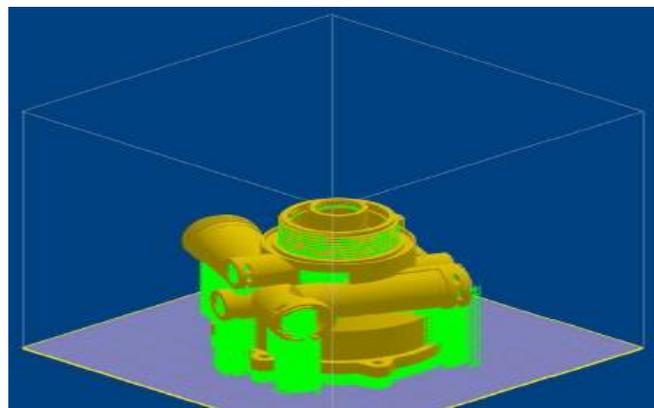


Imagen 20:Soportes para la fabricación aditiva

Estos soportes son finas columnas o entramados que sustentan zonas de la pieza demasiado esbeltas, voladizos (Imagen 21) o superficies con ángulos de fabricación muy bajos, normalmente a partir de ángulos mayores a 45º respecto a la horizontal.

Son generados automáticamente por el software de planificación de cada tecnología, durante el proceso de fabricación, se fabrican al mismo tiempo que la pieza y normalmente con el mismo

material que esta. Los soportes se fabrican capa a capa desde la plataforma de fabricación y terminan en las caras de la pieza a soportar, para asegurar su correcta fabricación.

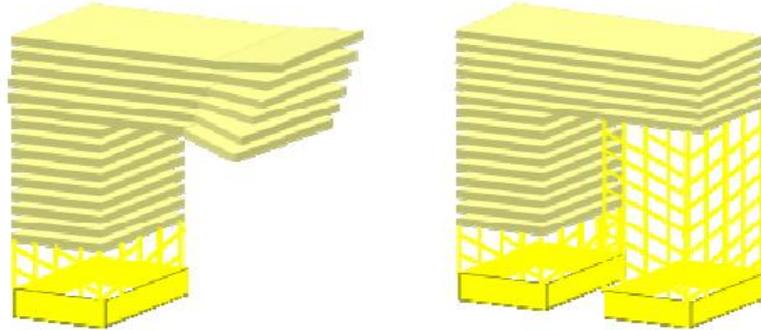


Imagen 21: Izquierda, geometría en voladizo fabricada por capas, al no existir soportes la geometría del voladizo se genera en “el aire” y se desploma. Derecha, geometría en voladizo soportada correctamente.

3.3. ETAPA 3 -CAPEADO: DIVISIÓN VIRTUAL DEL FICHERO EN CAPAS-

En esta etapa se divide virtualmente en finas capas (Imagen 22) el modelo 3D, con la orientación adecuada de fabricación y con los soportes necesarios. El rango de espesor de las capas está comprendido entre 15 y 200 μm para la mayoría de tecnologías.

El espesor de capa depende de la tecnología utilizada y las resoluciones disponibles en cada tecnología, normalmente existen 2 o 3 resoluciones:

- Baja Resolución: ofrece una alta productividad con baja calidad de detalle, este es el caso de espesores de capa mayor, por ejemplo 200 μm , donde resulta apreciable un efecto de escalonado en la superficie de la pieza fabricada.
- Estándar: ofrece un buen compromiso entre productividad y nivel de detalle, espesor de capa intermedio, por ejemplo 100 μm .
- Alta resolución: posibilita un alto nivel de detalle, pero con una productividad menor. El espesor es, en este caso de 15 a 70 μm . Con esta resolución de fabricación no resulta apreciable el efecto de escalonado entre capas en las superficies de la pieza obtenida.

A esta etapa de preparación se le denomina “capeado” y el formato de fichero digital obtenido tiene diferentes extensiones (SLC, CLS, ABF, etc.) dependiendo de la tecnología y su correspondiente patente.

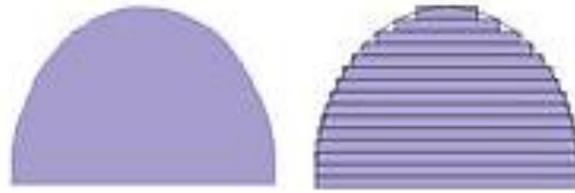


Imagen 22: División virtual del fichero en capas

3.4. ETAPA 4-FABRICACIÓN POR CAPAS-

El fichero digital generado con la información de la pieza en capas, es enviado al equipo de FA, donde comienza el proceso de fabricación, que se compone básicamente de 2 etapas (Imagen 23):

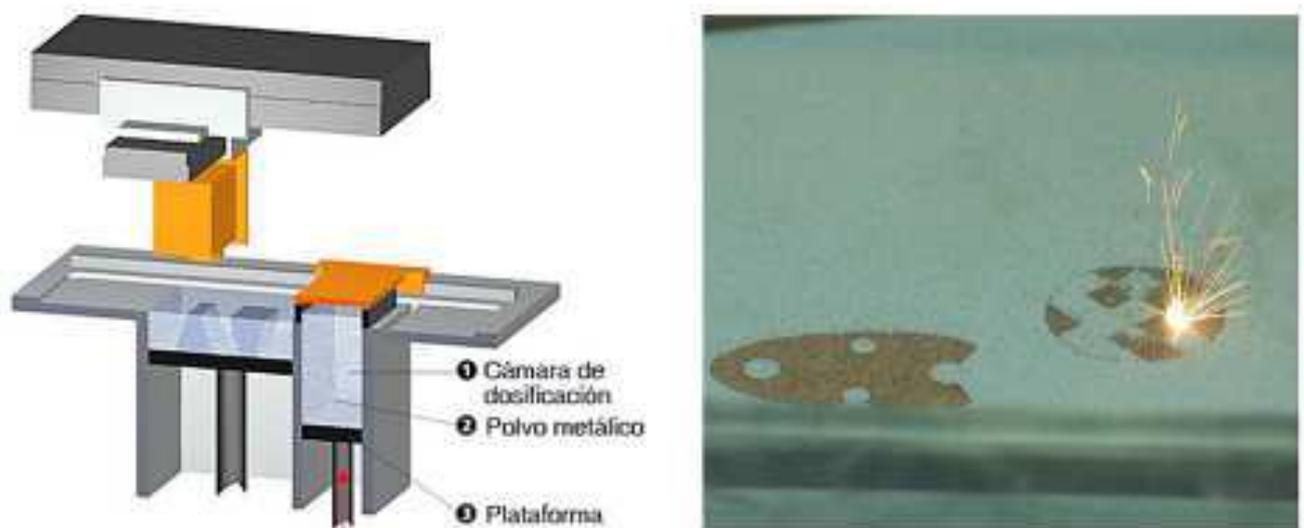


Imagen 23: Equipo FA operando

1) Reparto del material. El material es repartido sobre la bandeja de fabricación formando una capa del mismo espesor en el que se ha dividido virtualmente el fichero 3D. El formato de la materia prima puede ser líquido, en el caso de tecnologías que procesan polímeros o polvo esférico para las tecnologías que procesan metales, aunque también existen tecnologías que procesan polímeros partiendo de polvo.

2) Procesado del material en la capa. Una fuente de energía (haz laser, haz de electrones, luz etc.) procesa selectivamente el material de la capa siguiendo el contorno e interior de la pieza

Estos dos pasos se repiten hasta que la pieza se ha completado, es decir, sobre una capa de material ya procesado se reparte una nueva capa de material que se vuelve a procesar. La fuente de energía introduce la energía suficiente para procesar la capa actual y unirla a las capas anteriores. Hay que añadir que en cada capa la máquina procesa una sección de la pieza diferente siguiendo el patrón del fichero 3D dividido en capas y cohesionando la nueva capa con las anteriores.

En la imagen 24 puede observarse la estrategia de procesamiento por capa, primero se procesan los contornos de la pieza (exteriores e interiores) tras esto el láser procesa la sección interna de la pieza. El material no procesado que rodea la pieza es reutilizado tras la fabricación, en este caso polvo metálico y tecnología SLM (Selective Laser Melting).

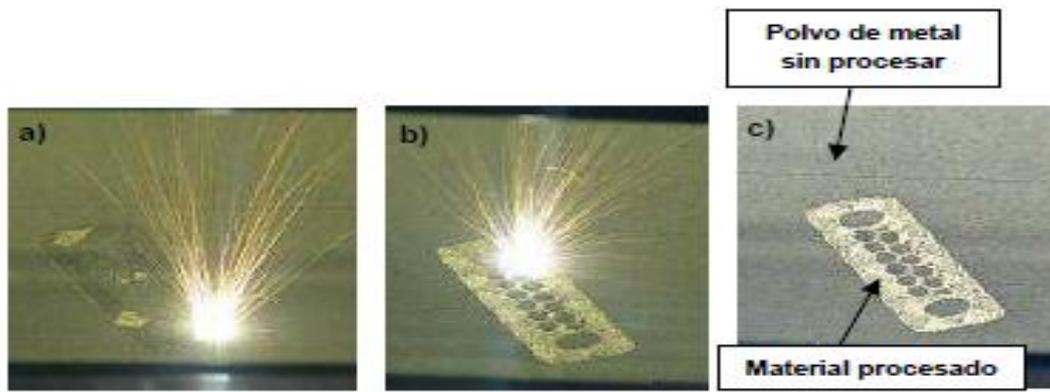


Imagen 24: Secuencia de procesamiento en la capa, primero contornos (a) y luego sección interna de la pieza (b). Derecha, capa fusionada con polvo de metal que rodea la pieza en construcción (c).

3.5. POST-PROCESOS FA: LIMPIEZA Y ELIMINACIÓN DE SOPORTES

Terminado el proceso de fabricación, se extraen la/s pieza/s de la máquina y el material que envuelve la pieza que no ha sido procesado es reutilizable entre un 95% y 99%

Las piezas son limpiadas del material no procesado que las rodeaba con distintos métodos dependiendo de la tecnología empleada.

Por ejemplo: en el caso de que la materia prima fuesen polímeros líquidos (Esterolitografía o SLA y Procesado por luz digital o DLP), primero se escurren las piezas dentro de la máquina, después las piezas se limpian manualmente con alcohol (imagen 25).

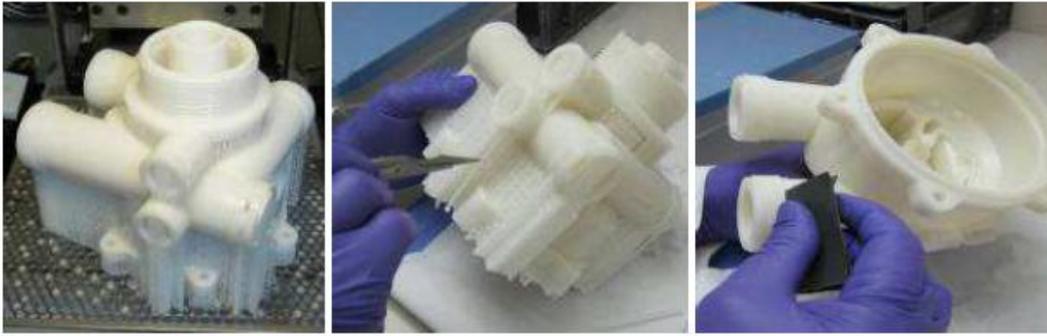


Imagen 25: Izquierda, pieza con soportes en la plataforma de fabricación Esterolitografía, en donde la resina líquida escurre desde el modelo sólido hasta el depósito. Centro, eliminación manual de soportes. Derecha limpieza final y lijado de las superficies que tenían soportes.

En el caso de partir de polvo metálico las piezas pueden ser sopladas con aire a presión, chorreadas con arena (SLM) o chorreadas con el mismo material de partida (polvo de titanio) para evitar la contaminación de la pieza, este es el caso de las piezas de titanio fabricadas por EBM (imagen 26). Tras la limpieza inicial, se retiran los soportes mediante procesos manuales con la ayuda de herramientas como: pinzas, bisturís, tenazas, sierras, discos de corte, etc.

En el caso de las piezas metálicas también se suelen realizar algunas operaciones de mecanizado en las zonas de las piezas donde se requiere precisión, como planeado, taladros, roscados, etc. En ocasiones también se realizan pulidos.

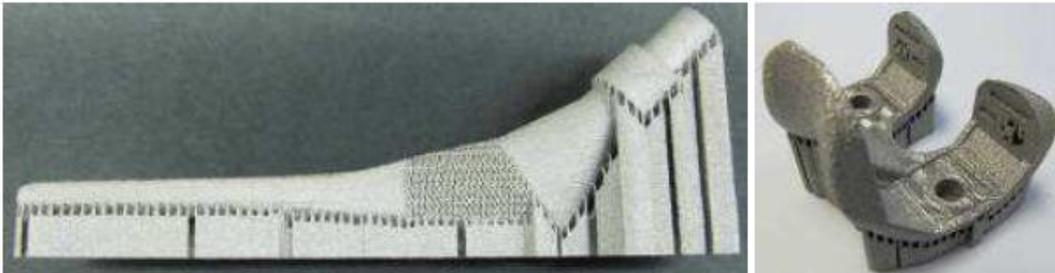


Imagen 26: Piezas de titanio fabricadas mediante EBM con los soportes de fabricación.

Para resumir las etapas anteriores (figura 10) se muestra de forma esquemática las etapas generales seguidas para la fabricación de una pieza, particularizado para un implante de rodilla y la tecnología EBM.

Notar que, la última etapa de acabados es común a otros procesos de fabricación (forja, colada, etc.), lo que demuestra que se obtiene una pieza totalmente funcional sin porosidad a partir de la fusión en sucesivas capas de polvo metálico.



figura 10:Esquema etapas de fabricación

3.6. RESTRICCIONES DE FABRICACIÓN

Una vez hemos definido las diversas etapas que intervienen en el proceso de fabricación aditivo, a continuación, detallaremos las limitaciones en el proceso de fabricación que deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar un producto:

- Agujeros verticales y horizontales
- Superficies inclinadas
- Voladizos mono-apoyados y biapoyados
- Detalles
- Mecanizado

Si bien esta tecnología está limitada por estas restricciones, no obstante, son menos restrictivas que las técnicas de fabricación sustractivas.

3.6.1. AGUJEROS HORIZONTALES

En el caso de agujeros cilíndricos horizontales existe una limitación a partir de una dimensión, alrededor de 8 mm de diámetro según el proveedor de la tecnología SLM. Esta limitación surge del propio proceso de fabricación ya que el material de la pieza se añade capa a capa (espesor de capa 30 micras), mediante la energía de un láser que funde el polvo metálico correspondiente a la sección de la pieza en cada capa.

El agujero de la pieza aparece al no fundir el láser la zona media de la capa en un conjunto de capas n , equivalente al diámetro ($n \cdot 30 \text{ micras} = D$ en mm).

La construcción es como un voladizo bi-apoyado, donde debajo de la capa actual hay polvo metálico sin procesar. Este polvo sinterizado produce que el espesor de esa capa no sea de 30 micras en la zona de cierre de un agujero cilíndrico, lo cual implica que no se completa un círculo perfecto (Imagen 28) y construye un círculo achatado.

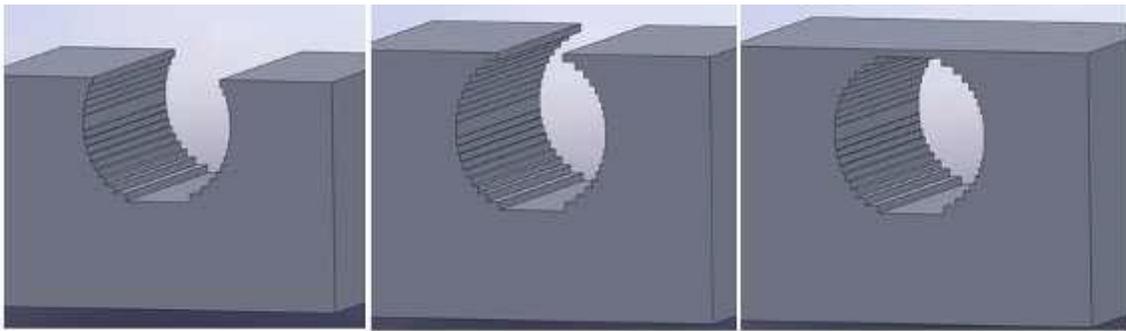


Imagen 28: Defectos en agujeros horizontales

Esta imperfección de cierre de los agujeros, es mayor o más perceptible, cuanto mayor sea el voladizo biapoyado de la última capa, el cual está directamente relacionado con el diámetro del agujero horizontal.

3.6.2. SUPERFICIES INCLINADAS

En el proceso SLM, es posible fabricar superficies inclinadas sin soporte por encima de 45° respecto de la placa base horizontal, según el proveedor de la tecnología SLM la zona crítica es la cara inclinada a 45° respecto a la horizontal, ya que se fabrica por capas.

Si hacemos un zoom, en realidad lo que se está fabricando mediante SLM es una figura aproximada escalonada en capas de $30 \mu\text{m}$ de espesor (Imagen 29).

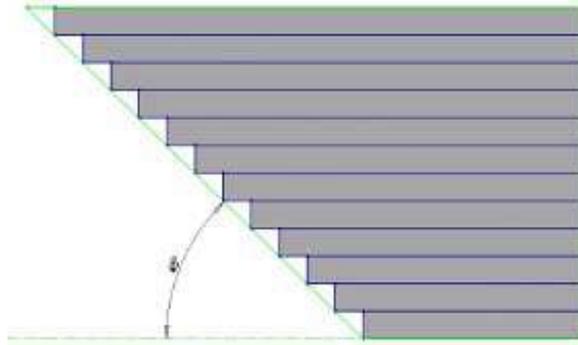


Imagen 29:Figura aproximada escalonada en capas

Se observa que el plano inclinado se fabrica al ir acumulando capas de distinto tamaño acabadas con un pequeño voladizo, el mismo mientras no se cambie la inclinación de la pared. En el caso de ángulos inferiores a 45° sobre la horizontal, por ejemplo 30° , el volado es más grande. El volado de las capas no es soportado por el polvo sin procesar de debajo.

Al contrario, el polvo situado debajo del volado queda sinterizado a este, quedando esta zona muy debilitada (Imagen 30). Durante la etapa de reparto de polvo, termina desprendiéndose el volado de la pieza. Esta zona de plano inclinado continúa construyéndose mal cada capa lo que al final supone una pieza defectuosa.

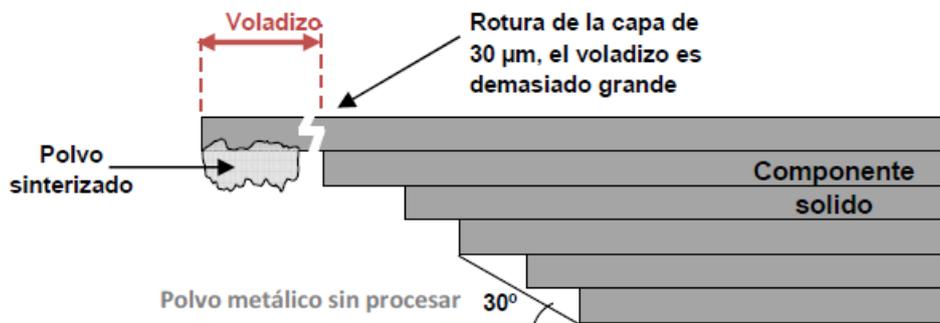


Imagen 30:Polvo metálico sin procesar.

Con un ángulo mayor a 45° , por ejemplo 60° , se observa (Imagen 31) que la fabricación tiene menos problemas y riesgos, es más segura porque el volado (o escalonado) es más pequeño, lo que se traduce también en una mejor calidad superficial.

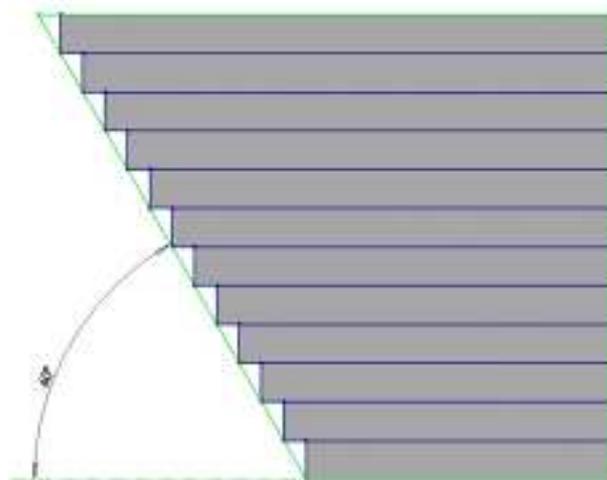


Imagen 31:Volado a 60º

3.6.3. VOLADIZOS MONO-APOYADOS Y BI-APOYADOS

El proceso SLM permite la fabricación de pequeños volados, sin la necesidad de soportes. Existen los volados mono-apoyados (apoyados en un lateral) y los bi-apoyados (Figura 32).

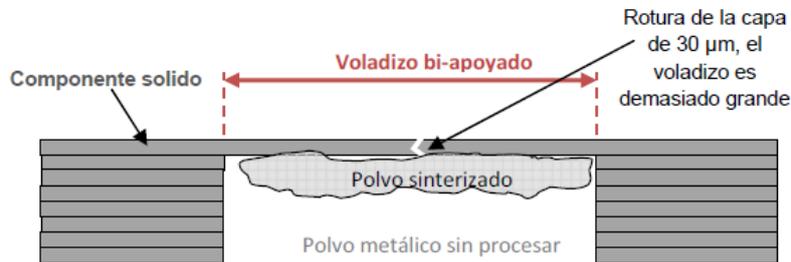


Imagen 32:Voladizos bi-apoyados

A partir de 0,9 mm la superficie inferior es más rugosa y empieza a no ser plana, lo que a mayores dimensiones produce una rotura.

3.6.4. DETALLES

A detalles en AM nos referimos a espesores de pared o diámetros muy pequeños

El proceso es capaz de fabricar pequeños detalles de espesor 0,2 mm, Por tanto, si el detalle está suficientemente rigidizado y no es demasiado alto el proceso tiene la capacidad de fabricarlo con el espesor mínimo posible (0,2 mm equivalente al diámetro del haz laser).

En cambio, para detalles menores que el diámetro del láser durante el proceso se rompe o se dobla en la etapa del reparto del polvo.

3.6.5. MECANIZADO: ESPESOR A MECANIZAR PARA ELIMINAR LA RUGOSIDAD.

Lo que se hace durante la etapa del diseño es dejar con creces la pieza a imprimir para luego desbastar dichas creces en el post proceso.

Se debe conocer el espesor superficial mínimo a mecanizar para llegar obtener una superficie lisa y sin poros, llegando de esta forma al material 100% denso. Este conocimiento permite diseñar la crez de material en algunas zonas del componente que será fabricado mediante SLM.

Por lo tanto, es necesario mecanizar al menos 0,15 mm superficialmente para eliminar la rugosidad superficial. Además, En SLM, se recomienda añadir una crezo sobre espesor mínimo de 0,3 mm a las geometrías en las zonas que se pretendan mecanizar para conseguir buen acabado dimensional y superficial

3.7. RESTRICCIONES DE DISEÑO

Las restricciones de fabricación del proceso SLM, son traducidas a reglas a tener en cuenta durante el diseño de piezas y componentes para ser fabricadas correctamente mediante este proceso.

Como en fabricación, las restricciones para el diseño se descomponen en las siguientes reglas:

- Reglas de diseño para agujeros
- Reglas de diseño para superficies inclinadas
- Reglas de diseño para voladizos
- Reglas de diseño para detalles
- Reglas de diseño para mecanizado

3.7.1. REGLAS DE DISEÑO PARA AGUJEROS

- En cuanto a canales y agujeros cilíndricos horizontales.

Se recomienda diseñar agujeros cilíndricos comprendidos entre 0,4 mm y 6 mm de diámetro, para obtener un buen acabado y sin riesgos durante el proceso de fabricación.

Diámetros iguales o superiores a 8 mm en agujeros puede producir problemas durante la fabricación tales como: errores de cilindridad acentuados, desprendimientos de material de la superficie superior de cierre del agujero que rayaran otras zonas de la pieza durante el proceso provocando más defectos.

Si es necesario un agujero de diámetro igual o mayor a 8 mm resulta recomendable fabricar por SLM uno de 5 o 6 mm y realizar un mecanizado posterior partiendo de la posición del ya existente

- Con respecto a los agujeros cilíndricos verticales.tabla

Se ha comentado que no existe limitación de fabricación superior para diámetros verticales, excepto el área de trabajo del equipo que suele ser 250x250 mm.

El límite inferior parece ser 0,2 mm. No es posible fabricar agujeros de diámetro 0,1 mm con el equipo SLM utilizado en este estudio. Sin embargo, es importante mencionar que están apareciendo nuevos equipos con mejores resoluciones, que utilizan espesores de capa menores (aprox. 15 μm) y diámetros del haz laser alrededor de 40 μm . Es posible que estos equipos puedan realizar estos detalles o incluso menores.

Se ha observado una diferencia entre la dimensión del diámetro diseñada y la fabricada. Los agujeros cilíndricos suelen ser 0,1 mm más pequeños. Por tanto, los orificios son menores y la pieza mayor, existen alternativas para solventar esta diferencia:

- Sumar esta diferencia (0,1 mm) a los diseños de los agujeros para obtener la dimensión fabricada deseada, es decir, diseñar $\varnothing 6,1$ mm si se necesita un $\varnothing 6$ mm.
- Si es necesario precisión y buen acabado superficial en el agujero, se recomienda diseñar el diámetro requerido o incluso 0,1 mm inferior y repasar el agujero mediante mecanizado.

3.7.2. REGLAS DE DISEÑO PARA PLANOS INCLINADOS

No resulta recomendable utilizar planos inclinados sin soportes a 45° sobre la horizontal, ya que parece ser el límite fabricable, para este material y para el proceso SLM.

Resulta recomendable diseñar todos los planos del componente con inclinación superior a 45° respecto a la horizontal o tener en cuenta que el componente pueda orientarse o apoyarse para la fabricación por SLM sobre otras caras de modo que queden con una inclinación comprendida entre 50° y 90°.

3.7.3. REGLAS DE DISEÑO PARA SOPORTES

El entramado de soporte recomendable varía entre 1,2 – 1,4 – 1,6 mm, dependiendo del tamaño de la superficie horizontal a soportar. Con mayores superficies es recomendable entramados menores para evitar riesgos durante la fabricación.

Aunque el diseñador de componentes mecánicos no suele añadir soportes, normalmente esta tarea recae en el operador de máquina SLM que prepara y orienta el fichero en la bandeja de fabricación, es importante que conozca las alternativas existentes e indique el nivel de acabado que necesita en esa superficie y el resultado que puede obtener finalmente en la superficie soportada de la pieza al retirar estos soportes.

3.7.4. REGLAS DE DISEÑO PARA VOLADOS

En cuanto a volados laterales, la dimensión máxima saliente fabricable, con menores probabilidades de riesgo durante la fabricación, varía entre 0,1 y 0,3 mm.

Con respecto a volados bi-apoyados varía entre 0,3 y 0,8 mm.

Para las 2 tipologías anteriores, en el caso de valores mayores, se recomienda añadir una crez de material entre 0,2 y 0,3 mm a la superficie volada y realizar un rectificado posterior.

3.7.5. REGLAS DE DISEÑO PARA DETALLES

Los detalles mínimos fabricables pueden obtenerse con una dimensión de 0,2 mm pero deben estar suficientemente rigidizados, por ejemplo textos, no muy altos. En el caso más desfavorable, estructuras más débiles como columnas y paredes finas este valor recomendado es mayor entre 0,4 y 0,6 mm dependiendo de la altura fabricada mediante SLM.

3.7.6. ESPESOR A MECANIZAR PARA ELIMINAR LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL

En zonas que necesiten buen acabado dimensional y superficial, se recomienda añadir una crezo sobre-espesor mínimo de 0,3 mm y realizar operaciones de mecanizado tras la fabricación en SLM. A continuación, se presenta un cuadro resumen con los valores recomendados para el diseño de componentes que serán fabricados mediante SLM.

CARACTERÍSTICA DISEÑO	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO	OBSERVACIONES
DIÁMETROS VERTICALES	0,2 mm	Bandeja fabricación	El valor mínimo debe repasarse con una aguja para eliminar el polvo atrapado en el canal.
DIÁMETROS HORIZONTALES	0,4 mm	6 mm	El valor máximo fabricable es 8 mm pero con problemas, la geometría final debe repasarse porque no es cilíndrica.
PLANOS INCLINADOS	45°	-	El valor mínimo de 45° puede no ser fabricable dependiendo de la posición de la cara inclinada con el repartidor de polvo. Recomendable inclinación > 50°.
DETALLES	0,4 mm	-	Es posible fabricar paredes de 0,2 mm si la geometría se encuentra rigidizada por otras paredes.
VOLADOS LATERALES	0,1 mm	0,2 mm	Se podría fabricar hasta 0,6 mm pero la superficie inferior es muy rugosa, podría no fabricarse dependiendo de la posición respecto al repartidor de polvo.
VOLADOS BIAPOYADOS	0,3 mm	0,8 mm	La superficie inferior del volado no es completamente plana.
SOPORTES	1,2 mm	1,6 mm	Para conservar la geometría soportada se recomienda el menor valor.
CREZ MECANIZADO	0,2 mm	0,3 mm	Se recomiendan valores de 0,3 o de 0,4 mm para tener suficiente margen de seguridad.

Tabla 5: Resumen para los valores recomendados en diseño



En resumen, en este apartado del TFG “Desarrollo de estructuras porosas mediante técnicas aditivas” se han definido el proceso por el cual opera las tecnologías de prototipado rápido atendiendo a las diversas etapas en su conformado, a las limitaciones de esta tecnología, y a las restricciones a tener en cuenta en el diseño

4. MATERIALES

En este apartado que vamos a abordar, nos centraremos en los materiales más empleados en el sector biomédico y que actualmente se están utilizando en fabricación aditiva para el desarrollo de prótesis.

Estos materiales son principalmente el titanio y las aleaciones en base Cobalto. Haremos especial hincapié en la aleación de titanio Ti6Al4V que es la que se analizará experimentalmente y finalmente se expondrá un nuevo material que está en proceso de investigación para procesos aditivos como el Bronce.

De esta manera los materiales a desarrollar en este apartado serán

- Titanio.
- Cobalto.
- Cobre.

Además de definir el material, se analizarán sus aleaciones Ti6AL4V, Cromo-Cobalto y Bronce puro en base a las propiedades mecánicas, físicas y químicas procesadas por EBM.

Una vez definidas sus propiedades, describiremos el comportamiento alotrópico de los distintos componentes en el proceso aditivo, así como las diferentes etapas en su transformación.

4.1. TITÁNIO Y SUS ALEACIONES

El titanio comparado con otros metales es un material con una demanda baja en la industria, pero que supera con creces las propiedades mecánicas a las que están sujetas la mayor parte de componentes industriales y biomédicos. La forma de obtención del metal a partir de sus óxidos y la confección del mismo hacen de él un material muy caro.

De forma habitual se utiliza el titanio en sectores industriales en los que necesitan de materiales con propiedades excepcionales (resistencia mecánica específica, corrosión) como la aeroespacial, la medicina o que puedan aportar un valor añadido como la joyería.

Uno de los sectores más productivos como la industria de automoción utilizan de éste material para componentes que requieren sobretodo una combinación de buenas propiedades mecánicas y baja densidad.

El titanio es el cuarto metal más abundante de la corteza terrestre (0'6%), después del aluminio, hierro y magnesio. Su estado original es en forma de óxido, más conocidos geológicamente como la ilmenita (FeTiO_3) y el rutilo (TiO_2).

Fue descubierto en el año 1791 por William Gregor al que llamó inicialmente a este nuevo material “mecanita”. Más tarde en año 1910 pasó a llamarse “titanio” de la mano de Matthew Albert Hunter cuando obtuvo el material con una pureza del 99'9% haciendo reaccionar tetracloruro de titanio (TiCl_4) con sodio.

Este nuevo procedimiento más conocido como el método Kroll, utiliza de una atmósfera protectora para la reducción del TiCl_4 con magnesio obteniendo un titanio en forma de esponja.

Esta manera de producir titanio en grandes cantidades es la más utilizada hasta el día de hoy.

4.1.1. PROPIEDADES GENERALES DEL TITANIO

El titanio se encuentra dentro de la familia de metales ligeros y se caracteriza por tener la ventaja de tener alto punto de fusión y excelente resistencia a la corrosión. Por otra parte, tiene poca conductividad tanto térmicamente como eléctricamente. Este material conocido en la tabla periódica como Ti y con un número atómico 22 tiene una densidad de 4'505 g /cm³ (Figura 11).

Otra gran propiedad del titanio es que es de los metales más ligeros, además dentro de la familia de los metales es la que mayor resistencia específica (Figura 12) posee como se puede apreciar en las siguientes imágenes:

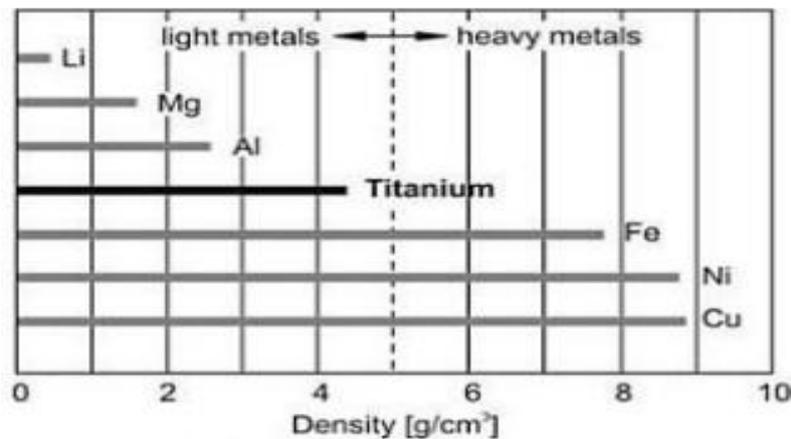


Figura 11: Comparación densidades para diversos metales

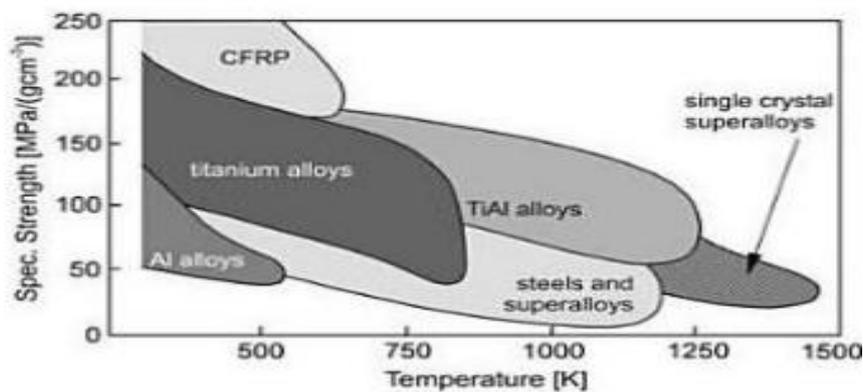


Figura 12: Relación resistencia-temperatura en función del material

Como destacar la tabla 6 contiene propiedades básicas del titanio. Algunas pueden variar al hacerlo la pureza del titanio, por lo que los datos son orientativos

Número atómico	22
Peso atómico	47,90
Volumen atómico	10,6 W/D
Radio covalente	1,32 Angstrom
Color	Gris oscuro
Densidad	4,51 g/cm ³
Temperatura de fusión	1668 °C ± 10 °C
Temperatura de ebullición	3260°C
Calor específico (a 25°C)	523 J/kg°C
Conductividad térmica	17 W/m°C
Calor latente de fusión	292 kJ/kg
Calor latente de vaporización	9,83 MJ/kg
Dureza	70 a 74 HRB
Resistencia a tracción	240 MPa (mínima)
Módulo de elasticidad	102,7 GPa
Coefficiente de Poisson	0,32-0,36 (policristal)
Coefficiente de expansión térmica	8,64·10 ⁻⁶ /°C
Resistencia eléctrica	564,9·10 ⁻⁹ Ωm
Conductividad eléctrica	3% IACS (cobre 100%)

Tabla 6:Propiedades básicas del titanio

El titanio además de poseer una característica óptima como las representadas en las gráficas anteriores, posee también una buena relación resistencia-temperatura (Figura 13), es por eso por lo que los sectores de la aeronáutica son frecuentes los componentes utilizados con este material.

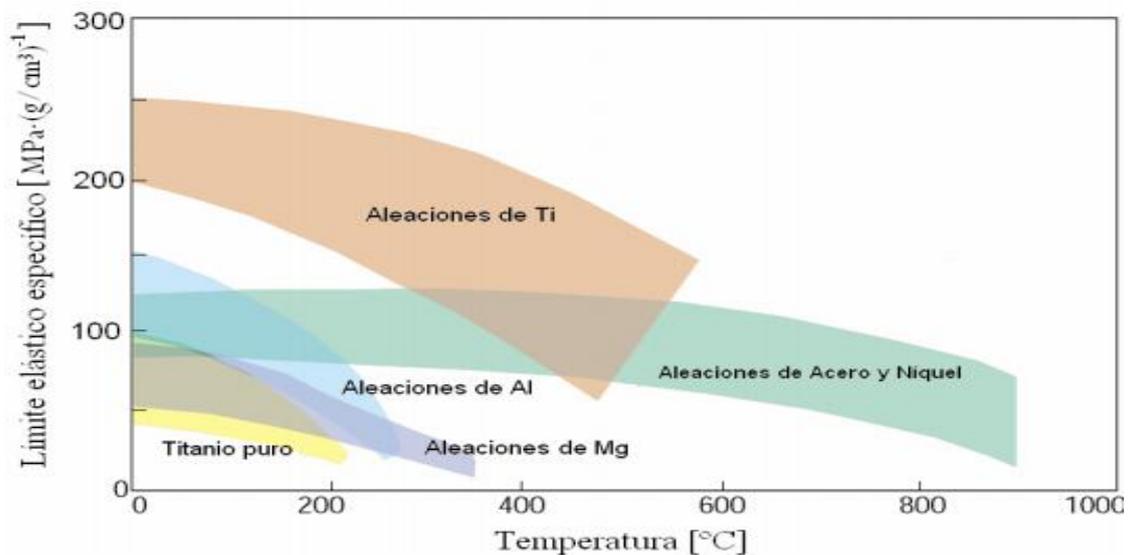


Figura 13:Relación límite elástico temperatura para cada material

4.1.2. ESTRUCTURAS CRISTALINAS DEL TITANIO

El Ti es un metal alotrópico, posee dos estructuras de equilibrio (Figura 14): Hexagonal compacta (HCP) y Cúbica centrada en el cuerpo (BCC). Cada una de estas estructuras es estable dentro de un determinado rango de temperaturas.

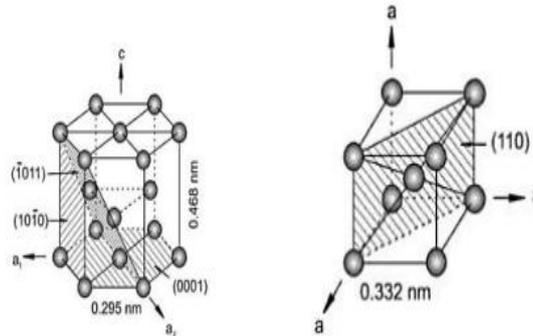


Figura 14: Estructuras de equilibrio para el titanio. Izquierda hexagonal compacta y derecha cúbica centrada

La deformación plástica está estrechamente relacionada con la estructura atómica. Así mismo la anisotropía (las propiedades mecánicas varían según la dirección estudiada) es más acusada en la estructura hexagonal, pudiendo variar el módulo de Young de 145 GPa en el plano a_1 a 100 GPa en el plano de la base a_2 .

El cambio de una estructura a otra se denomina transformación alotrópica. En el caso del titanio a temperatura ambiente el presenta la estructura HCP, denominada alfa (α), y a 882°C se transforma en estructura BCC, denominada beta (β).

Los aleantes hacen variar la temperatura de transformación.

4.1.3. EFECTO DE LOS ALEANTES

Dependiendo del efecto estabilizador, los elementos aleantes se clasifican del siguiente modo:

- Alfégenos, que estabilizan la fase α de la estructura cristalina.

La temperatura de cambio de fase se incrementa (Figura 15). El aluminio es el elemento alfégeno por excelencia.

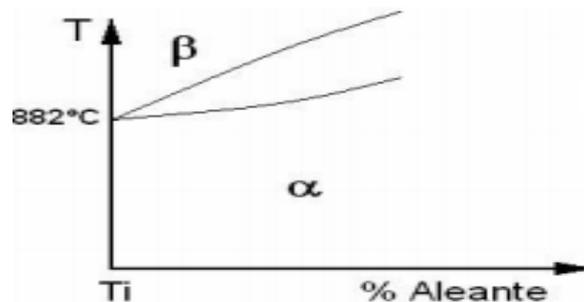


Figura 15: Gráfica efectos de los aleantes en función de la temperatura.

- Betágenos, estabilizadores de la fase β , disminuyen la temperatura de transición de la misma.

Éstos a su vez se dividen en dos tipos (Figura 16):

- Elementos isomorfos, que logran disolverse totalmente en la fase β .
- Elementos eutectoides, que forman intermetálicos.

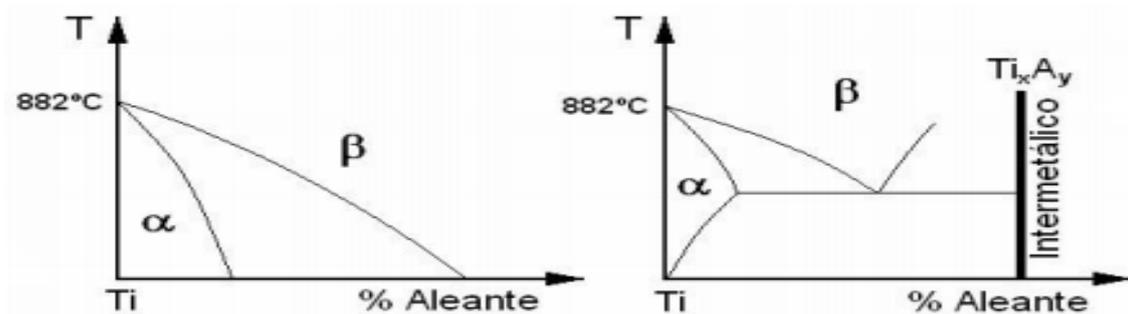


Figura 16: Gráfica efectos de los aleantes en función de la temperatura. Elementos isomorfos izquierda y eutectoides derecha

- Neutros.

Diagrama de fase del Ti aleado con un elemento neutro [1]

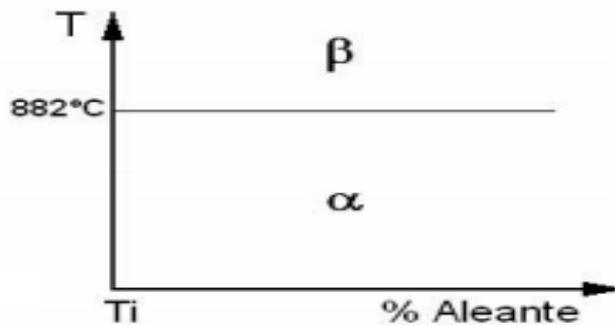


Figura 17: Diagrama de fase para aleantes neutros

En la tabla 7 se muestra los aleantes más comunes en el mercado del titanio.

		Empleados comercialmente	No empleados
Alfágenos		Al, O	N, C
Betágenos	<i>Isomorfos</i>	V, Mo, Nb, Ta	Re
	<i>Eutectoides</i>	Cr, Mn, Ni, Fe, Pd, Si	H, Cu, W, Bi, Co, Ag, Au, Pt, Be, Pb, U
Neutros		Zr, Sn	Hf

Tabla 7: Principales aleantes del mercado del titanio

4.1.4. ALEACIONES TITANIO

Las aleaciones de titanio se dividen en tres grupos: α , $\alpha+\beta$ y β . El criterio de clasificación corresponde a la respuesta que tienen las aleaciones a los tratamientos térmicos.

La figura sirve para ilustrar dicha clasificación. En ella se representa la presencia de un elemento estabilizador β

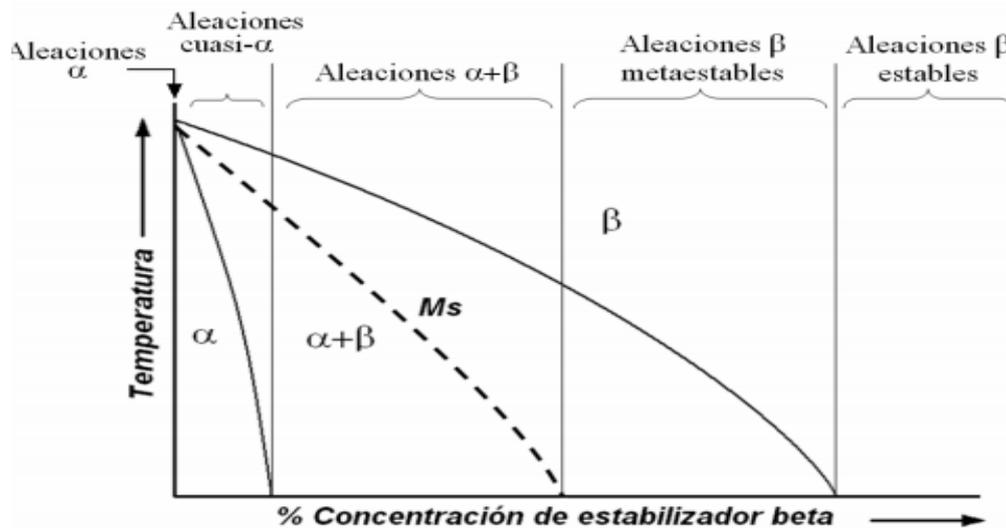


Figura 18: Clasificación aleaciones de titanio en función del estabilizador β

-Las aleaciones α , corresponden a aleaciones de titanio puro o aleadas con elementos estrictamente neutros o alfégenos. Las aleaciones cuasi- α tienen pequeñas cantidades de elementos betágenos (menos del 2% en peso), y tienen propiedades muy similares a las aleaciones α . Poseen una buena resistencia a fluencia y buena soldabilidad.

-Las aleaciones $\alpha+\beta$, que tienen un mayor contenido de elementos betágenos (comprenden entre un 5 y un 40% de fase β). Este tipo de aleaciones se caracteriza por la aparición de estructuras martensíticas al enfriarse rápidamente. Poseen una resistencia media-alta y la mayoría son soldables.

La aleación de titanio más conocida, Ti-6Al- 4V, pertenece a este grupo.

-Por último, las aleaciones β tienen la propiedad de retener fase β y no sufrir transformación martensítica al enfriarse rápidamente. Tienen una gran capacidad de ser endurecidas térmicamente.

En función de la concentración de aleantesbetágenos se pueden obtener aleaciones estables o metaestables. Dentro de las aleaciones comerciales sólo existe este último grupo, por lo que a las aleaciones metaestables se las denomina aleaciones β .

- **Aleaciones comerciales del titanio**

En la tabla 8 se presenta las aleaciones comerciales del titanio, mostrando su resistencia y componentes del mismo.

Tipos de aleaciones	$\sigma_{\text{Tracción}}$	Límite elástico	Límite de impurezas, % en peso máximo				
	MPa		MPa	N	C	H	Fe
Aleaciones α y casi α							
Ti-0.3Mo-0.8Ni	480	380	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25
Ti-5Al-2.5Sn	790	760	0.05	0.08	0.02	0.50	0.20
Ti-5Al-2.5Sn-ELI	690	620	0.07	0.08	0.0125	0.25	0.12
Ti-8Al-1Mo-1V	900	830	0.05	0.08	0.015	0.30	0.12
Aleaciones $\alpha+\beta$							
Ti-6Al-4V	900	830	0.05	0.10	0.0125	0.30	0.20
Ti-6Al-4V-ELI	830	760	0.05	0.08	0.0125	0.25	0.13
Ti-8Mn	860	760	0.05	0.08	0.015	0.50	0.20
Ti-3Al-2.5V	620	520	0.015	0.05	0.015	0.30	0.12
Aleaciones β							
Ti-13V-11Cr-3Al	1170	1100	0.05	0.05	0.025	0.35	0.17
Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	1170	1100	0.03	0.05	0.015	2.5	0.17
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	900	830	0.03	0.05	0.20	0.25	0.12

Tabla 8: Aleaciones comerciales de Ti

Por sus equilibradas propiedades, la aleación Ti-6Al-4V representa más de un 50% de la producción mundial de titanio, donde más del 80% es consumido por la industria aeronáutica

4.2. LA ALEACIÓN Ti6Al4V

El Ti6Al4V es la aleación de titanio de uso más común, tal y como se ha indicado anteriormente y es la que va a ser objeto de estudio en nuestro trabajo de fin de grado desarrollo de estructuras porosas mediante técnicas aditivas.

Dadas las excelentes características de biocompatibilidad, propiedades mecánicas, baja densidad, resistencia a la corrosión, así como propiedades de oseointegración, la aleación Ti-6Al-4V sobresale de entre las más populares para ser usada en la fabricación de implantes médicos.

Sin embargo, la implementación de dicha aleación como una pieza sólida aún genera problemas de sujeción a largo plazo debido a la diferencia de rigidez entre el implante y el tejido óseo.

El desarrollo de nuevos procesos de conformado como la fabricación aditiva, permite la generación de piezas complejas con las cuales se pueden explotar plenamente las propiedades del material.

4.2.1. PROPIEDADES (Ti6Al4V)

Composición química (Ti6Al4V)

La aleación está compuesta por Aluminio (Al), Hierro (Fe), Carbono (C), Oxígeno (O) Nitrógeno (N), Hidrógeno (H) y Titanio (Ti).

Su formulación varía ligeramente según el estándar o el fabricante escogido. En la tabla se presenta una comparación de los márgenes para la composición del Ti6Al4V por diferentes normativas.

	Composición [wt%]							
	Al	V	Fe	C	O	N	H	Ti
UNE-7301	5,5-6,5	3,5-4,5	0,25	0,08	0,13	0,05	0,012	bal.
ISO 5832-3	5,5-6,75	3,5-4,5	0,30	0,08	0,20	0,05	0,015	bal.
ASTM F136	5,5-6,5	3,5-4,5	0,25	0,08	0,13	0,05	0,012	bal.

Tabla 9: Composición del Ti6Al4V por diferentes normativas.

Propiedades físicas (Ti6Al4V)

En comparación con el titanio puro, la aleación Ti6Al4V al tener los restante elementos (oxígeno, nitrógeno, aluminio o vanadio) sucede que cuando aumentamos los componentes, mayores son algunas propiedades mecánicas de gran interés industrial como la resistencia.

En cambio, si la proporción de los componentes es menor, mayor es la tenacidad a fractura, la ductilidad, la resistencia a la corrosión y la velocidad de propagación de grieta.

En la siguiente tabla se comparan las propiedades entre el titanio puro y la aleación Ti6Al4V

	Commercially Pure Titanium	Ti6Al4V-ELI
Grade Designation	Grades 1-4	Grade 23
Yield Strength	170-655 MPa	760-795 MPa
Minimum Tensile Strength	240-550 MPa	825-860 MPa
Melting Point	1668 deg C	1635-1670 deg C
Density	4.51 g/ cm ³	4.42 g/ cm ³
Specific Strength	53-122 kN m/kg	187-195 kN m/kg
Fatigue Strength (10 ⁷ cycles)	88-425 MPa	500-600 MPa
Hardness	120-265 HB	330 HB
Elastic Modulus	103-107 GPa	100-130 GPa

Tabla 10: Propiedades físicas del Titanio comercial y Ti6Al4V

Propiedades mecánicas (Ti6Al4V)

Las propiedades mecánicas del Ti6Al4V dependen de factores como la forma de obtención del material, así como de los tratamientos térmicos.

En nuestro caso esto es objeto de gran interés pues nuestro proceso aditivo genera temperaturas muy altas en su fabricación por las cuales pasan por diferentes estados alotrópicos y con ello cambio de propiedades.

A continuación, se exponen las propiedades mecánicas y térmicas suministradas por el fabricante de la tecnología para el material Ti6Al4V Arcam.

El fabricante nos garantiza unas propiedades mecánicas del material después de su procesado como su rigidez, flexibilidad, resistencia, fatiga...etc.

Material	Ti6Al4V Eli
Ensayo de tracción	
	(1)
Modulo de Young [MPa]	120
Límite elástico [MPa]	930
Resistencia máxima a la tracción[MPa]	970
Reducción en sección de espécimen ensayado [%]	50
Elongación [%]	16
TEST DE FATIGA	
Diagrama (S-N) Fatiga	
(1)	
Stress [MPa]	Número de ciclos [-]
600 (tras HIP)	>10.000.000

Tabla 11: Propiedades mecánicas del Ti6Al4V

Arcam Ti6Al4V High Cycle Fatigue Test

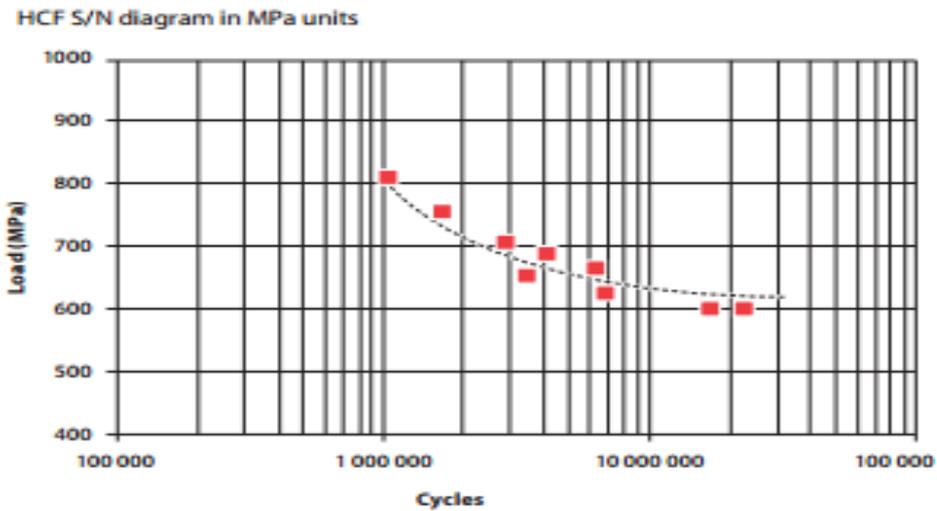


Figura 19: Gráfica ciclo de vida de la aleación Ti6Al4V.

4.2.2. COMPORTAMIENTO ALOTRÓPICO TI6AL4V

El Ti6Al4V puede adquirir gran variedad de microestructuras, según el tratamiento termo mecánico empleado.

La microestructura se puede clasificar en varias categorías:

- Equiaxial
- Martensítica
- Laminar
- Bimodal (mezcla de equiaxial y laminar)

Microestructura equiaxial

Las estructuras equiaxiales se obtienen tras trabajar mecánicamente el material en el rango de temperaturas $\alpha+\beta$.

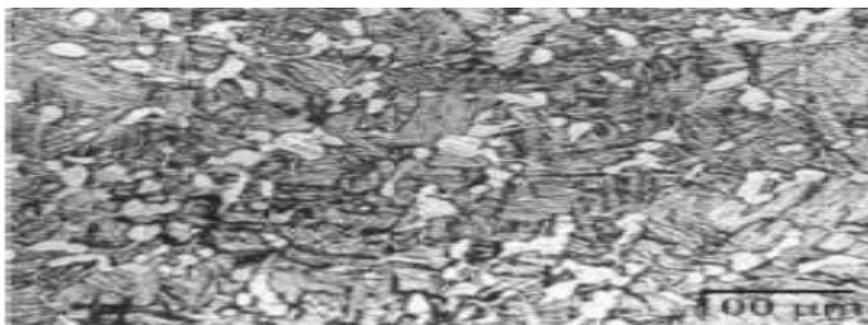


Imagen 33: Estructura Equiaxial del Ti6Al4V.

Un recocido posterior a temperaturas menores a la temperatura de inicio de martensita (por ejemplo 700°C) produce una microestructura formada por granos finos de α y β , denominada mill-annealed, si bien esta estructura depende mucho del trabajado previo del material.

Durante el proceso de recocido, la microestructura consta de fase α β . Al enfriar el material, la fase α se transforma, pero la fase β sí que se transforma, con una estructura final dependiente de la velocidad de enfriamiento desde la temperatura de recocido.

Si la temperatura de recocido es más alta, la fase β se transforma a fase α secundaria con estructura laminar, y se obtiene una estructura formada por granos α y regiones laminares finas, denominadas con el término ‘ β -transformada’, si bien el término se refiere a paquetes laminares de α secundaria. La estructura así obtenida se denomina microestructura dúplex

Microestructura martensítica

La estructura martensítica se obtiene por enfriamiento rápido o temple desde temperaturas superiores a β -transus, lo que genera la estructura de transformación masiva martensita dando lugar a la fase α' o martensita hexagonal no termoelástica y la fase martensita ortorrómbica termoelástica, causante de las propiedades de memoria de forma.

Esta microestructura, es acicular o finamente laminar y tiene parámetros de red similares a los de la fase α .



Imagen 34: Estructura martensítica del Ti6Al4V

Microestructura laminar o de Widmanstätten

Las estructuras laminares o de Widmanstätten se obtienen por enfriamiento lento desde temperaturas superiores a β -transus hasta la región bifásica.

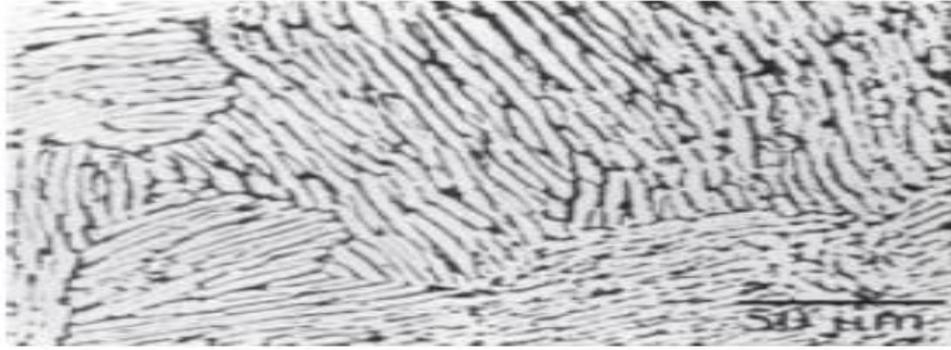


Imagen 35: Estructura Equiaxial del Ti6Al4V

La ralentización del proceso de enfriamiento permite una difusión controlada entre las fases α y β cuando la temperatura disminuye por debajo de β -transus y la fase α comienza a nuclear en los bordes de grano β , produciéndose un crecimiento de la fase α en forma de láminas.

La estructura laminar resultante se compone de gruesas placas de fase α y finas placas. Estudio de la influencia sobre la microestructura de fase β , unidas formando paquetes o colonias. Esta estructura es llamada fase α laminar, estructura de Widmanstätten o bien tipo cesta.

Microestructura bimodal

Las microestructuras bimodales consisten en granos α aislados en una matriz β transformada. Se obtienen con un recocido a 950° C, seguido de un temple en agua, y un envejecimiento a 600° C. Se consigue entonces un grano α de 15–20 μm de diámetro aislado por fase β retransformada. Sin embargo, si se envejece a 650° C se produce la descomposición precipitados de la fase β en granos de fase α .

4.2.3. ETAPAS DE TRASFORMACIÓN Ti6Al4V POR EBM

Para definir las etapas de transformación se han utilizado los diversos estudios realizados por distintas universidades

Las investigaciones se han centrado en la influencia en las propiedades finales de las condiciones de trabajo (área de trabajo a 650-700°C aprox.) en el procesado de Ti6Al4V mediante la tecnología EBM. Y que han conducido a un posterior proceso de estandarización necesario para que este tipo de tecnologías puedan ser asumidas por sectores tan exigentes como el aeronáutico o el de biomedicina como una vía alternativa o solución novedosa para producción de una gran variedad de sus productos.

Para nuestro caso nos ceñiremos a las condiciones que marca el fabricante ARCAM que aporta información sobre las propiedades mecánicas y microestructurales del material Ti6Al4V Eli procesado mediante EBM. A continuación se exponen las propiedades mecánicas y térmicas suministradas por el fabricante de la tecnología para el material Ti6Al4V Eli

Material	Ti6Al4V Eli	
Ensayo de tracción		
	(1)	
Modulo de Young [MPa]	120	
Límite elástico [MPa]	930	
Resistencia máxima a la tracción [MPa]	970	
Reducción en sección de espécimen ensayado [%]	50	
Elongación [%]	16	
TEST DE FATIGA		
Diagrama (S-N) Fatiga		
(1)		
Stress [MPa]	Número de ciclos [-]	
600 (tras HIP)	>10.000.000	
Cycles (N _e)		
Test de dureza		
Dureza superficial [HRC]	32	Sin post-tratamiento

Tabla 12: Resumen de propiedades Ti6Al4V Eli

Estos datos frente a la norma americana ASTM F136 se plasma en la siguiente tabla:

	Arcam Ti6Al4V ELI*	Ti6Al4V ELI Required**
Yield Strength (Rp 0,2)	930 MPa	795 MPa
Ultimate Tensile Strength (Rm)	970 MPa	880 MPa
Rockwell Hardness	32 HRC	30-35 HRC
Elongation	16%	>10%
Reduction of Area	50%	>25%
Fatigue strength @ 600 MPa	>10,000,000 cycles	>1,000,000 cycles
Modulus of Elasticity	120 GPa	114 GPa

* Typical ** ASTM F136
The mechanical properties of materials produced in the EBW process are comparable to wrought or rolled materials and are better than cast materials.

Tabla 12: Propiedades mecánicas del fabricante frente a los requerimientos de la norma ASTM F136 para el Ti6Al4V ELI.

Dichos estudios indican que las piezas fabricadas mediante la tecnología EBM presentan una microestructura mejor que la obtenida por colada, ya que contiene una fase α lamelar con largos granos de fase β con mayor densidad y un tamaño de grano significativamente más fino, gracias al rápido proceso de enfriamiento de la piscina de fundida.

El área de trabajo se mantiene a una temperatura elevada durante toda la construcción lo que provoca que las piezas obtenidas presenten de forma natural una estructura propia de un tratamiento de o habría que decir recocido (Imagen 36)

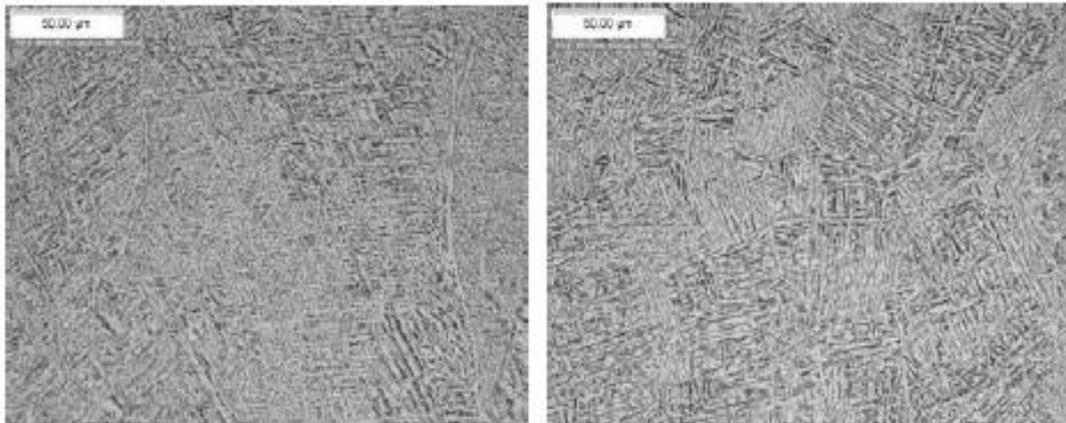


Imagen 36: Micrografía longitudinal del material de ARCAM AB Ti6Al4V ELI a 500x. Micrografía transversal del material de ARCAM AB Ti6Al4V ELI a 500x

En la investigación se asume la existencia de un gradiente de temperatura desde la superficie de la pieza fabricada hasta la placa de fabricación. Como condición de contorno se considera una temperatura de placa de fabricación próxima a los 850°C.

A partir de 882°C (conocida como T^{β} Transus) comienza a producirse una transformación alotrópica donde la estructura se transforma de un empaquetamiento hexagonal compacto α -Ti a una estructura cúbica centrada en caras β -Ti en toda la pieza.

Por tanto, se puede concluir que durante toda la fabricación las piezas fabricadas están sometidas a temperaturas por encima de β Transus. Enfriándose toda la pieza una vez finalizada la fabricación, lo que genera una estructura propia de colada, principalmente compuesta por una estructura acicular α -Ti formada a partir de granos β -Ti epitaxiales que solidificaron inicialmente. Incluso apareciendo fase α -Ti alrededor de los granos β -Ti.

Como conclusión, se expone que cualquier pieza bajo estas condiciones se encuentra fuertemente influenciada por la geometría frente al efecto capa que es despreciable. Datos de dureza obtenida HV 285-300 (HRC 28-30)

4.3. COBALTO Y SUS ALEACIONES

Este tipo de aleaciones se llevan utilizando desde hace tiempo como material a implantar y actualmente se está utilizando como aleación para la fabricación aditiva. Es por ello por lo que vamos a tratarlo en nuestro trabajo de fin de grado

Hoy en día, estas aleaciones han adquirido una mayor seguridad y son, por lo tanto, utilizadas ampliamente como material a implantar. En 1924, Zierold empleaba ya como material implantario una aleación que fue difundida en 1937 por Venable. Bajo el nombre de Vitallium, se le utilizó también en cirugía ortopédica restauradora.

En numerosos trabajos ha quedado demostrado que, si bien el cobalto solo podía ser citotóxico, a partir del momento en que era combinado con algunos metales bien definidos, la aleación se comportaba como un material inerte y no tóxico. Así, la toxicidad del cobalto se encuentra neutralizada por la presencia del cromo y desaparece. Sin embargo, esto no se produce más que a partir del momento en que la aleación contiene más del 40 % de cromo.

Se utilizan en colados dentales de prótesis parciales y ciertos tipos de puentes. Sus ventajas son su menor peso, su resistencia a la corrosión y son económicos.

Los inconvenientes son, la alta temperatura para su manipulación, y su difícil pulido.

Los elementos que constituyen esta aleación son:

- 65% de cobalto
- 30% de cromo
- 5% de componentes varios (molibdeno, manganeso, silicio, carbono y tungsteno)

Todo aleamiento de estas relaciones da como resultado un descenso en las propiedades mecánicas y una disminución de la Resistencia.

Para comprender exactamente el comportamiento del material y sus cambios de estructura cristalina durante el procesado, tendremos que diferenciar cada elemento de la aleación cromo-cobalto por separado.

4.4. CROMO

Elemento químico, símbolo Cr, número atómico 24, peso atómico 51.996; metal que es de color blanco plateado, duro y quebradizo. Sin embargo, es relativamente suave y dúctil cuando no está tensionado o cuando está muy puro. El nombre se debe a la multitud de colores que presentan sus combinaciones.

Se usa para endurecer el acero, obtener acero inoxidable y otras aleaciones muy importantes, debido a su resistencia a la corrosión, fundamentalmente como ferrocromo (Fe con 52-75% de Cr).

Sus propiedades mecánicas, incluyendo su dureza y la resistencia a la tensión, determinan la capacidad de utilización. El cromo tiene una capacidad relativa baja de forjado, enrollamiento y

propiedades de manejo. Sin embargo, cuando se encuentra absolutamente libre de oxígeno, hidrógeno, carbono y nitrógeno es muy dúctil y puede ser forjado y manejado.

Nombre	Cromo
Número atómico	24
Valencia	2,3,4,5,6
Estado de oxidación	+3
Electronegatividad	1,6
Radio covalente (Å)	1,27
Radio iónico (Å)	0,69
Radio atómico (Å)	1,27
Configuración electrónica	[Ar]3d ⁵ 4s ¹
Primer potencial de ionización (eV)	6,80
Masa atómica (g/mol)	51,996
Densidad (g/ml)	7,19
Punto de ebullición (°C)	2665
Punto de fusión (°C)	1875
Descubridor	Vaughlin en 1797

Tabla 13:Propiedades Físicas Cromo

4.5. COBALTO

Elemento químico metálico, Co, con número atómico de 27 y un peso atómico de 58.93. El cobalto se parece al hierro y al níquel, tanto en estado libre como combinado. Se encuentra distribuido con amplitud en la naturaleza y forma, aproximadamente, el 0.001% del total de las rocas ígneas de la corteza terrestre, en comparación con el 0.02% del níquel.

El cobalto es un metal plateado, duro, quebradizo, muy parecido al hierro y níquel. Ferromagnético, con un punto de Curie de 1150°C. Su permeabilidad magnética es 2/3 de la del hierro. Su conductividad eléctrica es 1/4 de la del cobre.

Estable al aire y el agua a temperatura ambiente. Sin embargo, polvoriento y puro puede autoinflamarse.

Entre sus aplicaciones comerciales más importantes están; la preparación de aleaciones para uso a temperaturas elevadas, aleaciones magnéticas, aleaciones para máquinas y herramientas, sellos vidrio a metal y la aleación dental y quirúrgica llamada vitallium.

El cobalto es ferromagnético y se parece al hierro y al níquel, en su dureza, resistencia a la tensión, capacidad de uso en maquinaria, propiedades térmicas y comportamiento

electroquímico. Al metal no lo afectan el agua ni el aire en condiciones normales, y lo atacan con rapidez el ácido sulfúrico, el ácido clorhídrico y el ácido nítrico;

Nombre	Cobalto
Número atómico	27
Valencia	2,3
Estado de oxidación	+3
Electronegatividad	1,8
Radio covalente (Å)	1,26
Radio iónico (Å)	0,63
Radio atómico (Å)	1,25
Configuración electrónica	[Ar]3d ⁷ 4s ²
Primer potencial de ionización (eV)	7,90
Masa atómica (g/mol)	58,93
Densidad (g/ml)	8,9
Punto de ebullición (°C)	2900
Punto de fusión (°C)	1495
Descubridor	George Brandt en 1737

Tabla 14: Propiedades físicas Cobalto

4.5.1. EFECTO DE LOS ALEANTES Y ALEACION

Aunque el cobalto tiene una estructura cristalográfica (hcp) a temperatura ambiente, a temperaturas mayores de 400°C se transforma a estructura centrada en las caras (fcc).

Este tipo de aleaciones es bifásica, compuesta por una matriz de Co (FCC) y precipitados de carburos. La cantidad, distribución, tamaño y morfología de las fases precipitadas depende de los tratamientos térmicos a los que fue sometida la aleación.

- **Aleaciones alfégenas (Cr-W):**

La adición de aleantes como cromo (Cr) y tungsteno (W) elevan dicha temperatura de transformación, mientras que el molibdeno (Mo) aumenta el rango de solidificación, alterando la morfología de los carburos.

- **Aleaciones betágenaseustectoide (Cr-Mo):**

Otra forma de modificar la estructura es modificando los elementos de aleación. Al reemplazar el molibdeno por el tungsteno en iguales cantidades se mejora la ductilidad.

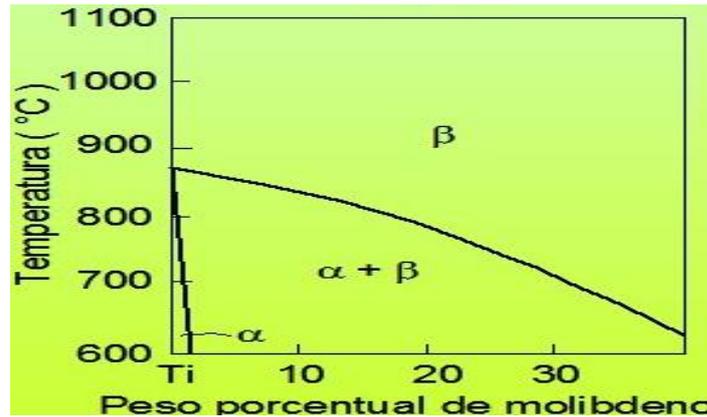


Figura 20: Efectos aleantes Mo

Este elemento acerca las líneas de solidus y liquidus y cuando segrega, altera la morfología de los precipitados generando cantidades adicionales de carburos eutécticos, de igual forma, el aumento del contenido de molibdeno hace disminuir la concentración de fallas de apilamiento y aumenta la fracción en volumen del compuesto intermetálico σ en aleaciones Co-Cr.

Este tipo de aleación es el de nuestro interés pues es la que más se utiliza en fabricación aditiva

- Aleaciones betágenaseustectoide (Cr-Ni):

Igual comportamiento provoca la adición de níquel en las aleaciones Co-Cr-Mo (12). Agregando estabilizadores de fase fcc, tales como Ni, se facilita su retención a temperatura ambiente debido a que la transformación fcc \rightarrow hcp requiere una alta energía para producirse.

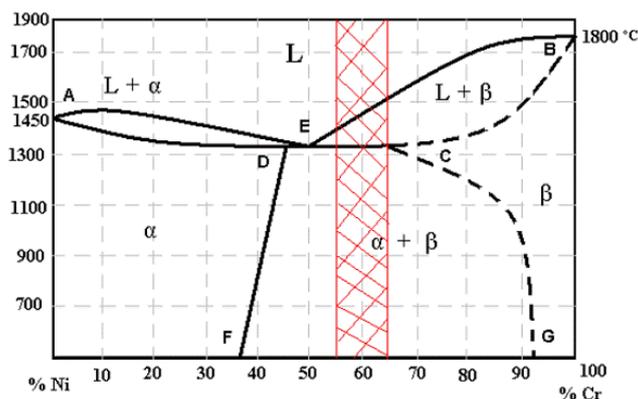


Figura 21: Efectos aleantes Ni

4.5.2. DIAGRAMAS DE FASE

Las siguientes cinco fases están presentes en el sistema binario de cobalto-cromo por encima de 800 ° C (véase la Figura 22):

- Fase líquida
- Fase rica en cobalto cara cúbica centrada (FCC)

- Fase hexagonal compacta cobalto (HCP)
- Fase de Sigma
- Fase de cromo-rica centrada en el cuerpo cúbico (BCC).

El punto de cobalto y cromo puro de fusión es de 1495 ° C (2723 ° F) y 1906 ° C (3463 ° F), respectivamente.

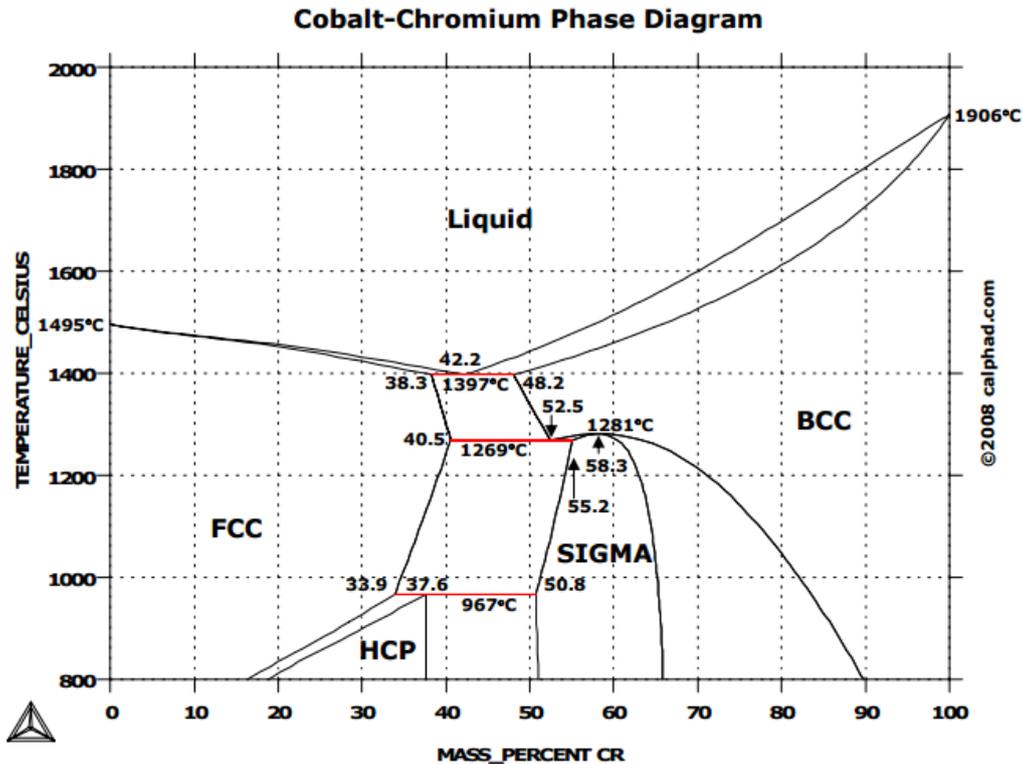


Figura 22:Diagrama de fases Cr-Co

En el diagrama Co-Cr muestra qué fases son de esperar en equilibrio para diferentes combinaciones de contenido de cromo y la temperatura (en ° C) en Co-Cr aleaciones binarias.

La fase de FCC es la modificación de alta temperatura y la fase HCP es la modificación a baja temperatura de la solución sólida terminal de cobalto. La fase sigma es un compuesto intermetálico frágil de cobalto y cromo con una composición que corresponde aproximadamente a la relación Co₂Cr₃.

Por lo tanto el sistema binario Co-Cr tiene las siguientes cuatro reacciones:

- Líquido reacción eutéctica -> FCC + BCC en 1397 ° C (2547 ° F) y 42,2% de Cr
- Reacción Congruente BCC -> Sigma en 1281 ° C (2338 ° F) y 58,3% de Cr
- Reacción eutectoide BCC -> FCC + Sigma en 1269 ° C (2316 ° F) y 52.5% Cr y
- Reacción Peritectoid FCC + Sigma -> HCP a 967

4.6. ALEACIÓN CR-CO-MO

La aleación Cr-Co-Mo es la que vamos a estudiar en nuestro TFG desarrollo de estructuras porosas mediante técnicas aditivas

Es una de las aleaciones utilizadas en la fabricación de prótesis e implantes quirúrgicos con técnicas aditivas de fabricación, debido a su gran tenacidad, alta resistencia a la corrosión y excelente biocompatibilidad.

Los dos elementos básicos son el cobalto (65 %) y cromo (35 % en peso) que forman una solución sólida. Se añade Mo para producir un grano más pequeño que produce una mayor resistencia después de moldear o forjar.

Las aleaciones moldeadas fueron las primeras utilizadas para acetábulos de prótesis total de cadera, presentan una estructura dendrítica con precipitados $M_{23}C_6$ ($M=Cr+Mo+Co$) en los espacios interdendríticos. Estos carburos en forma de bloque endurecen el material, pudiendo ser disueltos mediante tratamientos térmicos a temperaturas de 1240° C.

Fueron desarrolladas al comienzo de los años 70, utilizadas en vástagos de prótesis de cadera (Mueller, Weber y WeberStuehmer) de rodilla (GSB), de hombro (GSB) y de mano (Meuli).

En el proceso de recristalización después de la conformación se obtiene granos muy pequeños con una estructura monofásica.

Asimismo, deben evitarse las soldaduras en esta aleación ya que las uniones son lugares propicios para la aparición de corrosión. El módulo de elasticidad de las aleaciones base cobalto, está entre 220 y 234 GPa que es superior incluso al de los aceros inoxidable (200-210 GPa). Este hecho afecta sin duda al proceso de transferencia de carga entre el implante y el hueso.

4.6.1. PROPIEDADES GENERALES

Composición química

Al igual que con el titanio Ti6Al4V Su formulación varía ligeramente según el estándar o el fabricante escogido.

La composición química exacta de la aleación se representa en la siguiente tabla 15. En ella se compara los componentes del material utilizado por fabricación aditiva con los componentes necesarios según norma.

CHEMICAL COMPOSITION

	Arcam ASTM F75*	ASTM F75 Required
Chromium, Cr	28,5%	27–30%
Molybdenum, Mo	6%	5–7%
Nickel, Ni	0,25%	<0,5%
Iron, Fe	0,2%	<0,75%
Carbon, C	0,22%	<0,35%
Silicone, Si	0,7%	<1%
Manganese, Mn	0,5%	<1%
Tungsten, W	0,01%	<0,2%
Phosphorus, P	0,01%	<0,02%
Sulphur, S	0,005%	<0,01%
Nitrogen, N	0,15%	<0,25%
Aluminium, Al	0,05%	<0,1%
Titanium, Ti	0,01%	<0,1%
Bor, B	0,006%	<0,01%
Cobalt, Co	Balance	Balance

* Typical

Tabla 15: Propiedades químicas aleación Cr-Co

Propiedades físicas

En comparación con las otras aleaciones en base a cobalto, el Cr-Co-Mo la aleación ASTM F75 es una de las aleaciones utilizadas en la fabricación de prótesis e implantes quirúrgicos con técnicas aditivas, debido a su gran tenacidad, alta resistencia a la corrosión y excelente biocompatibilidad.

En el siguiente diagrama (Figura 16) se comparan los diferentes compuestos que pueden formar la aleación base Co.

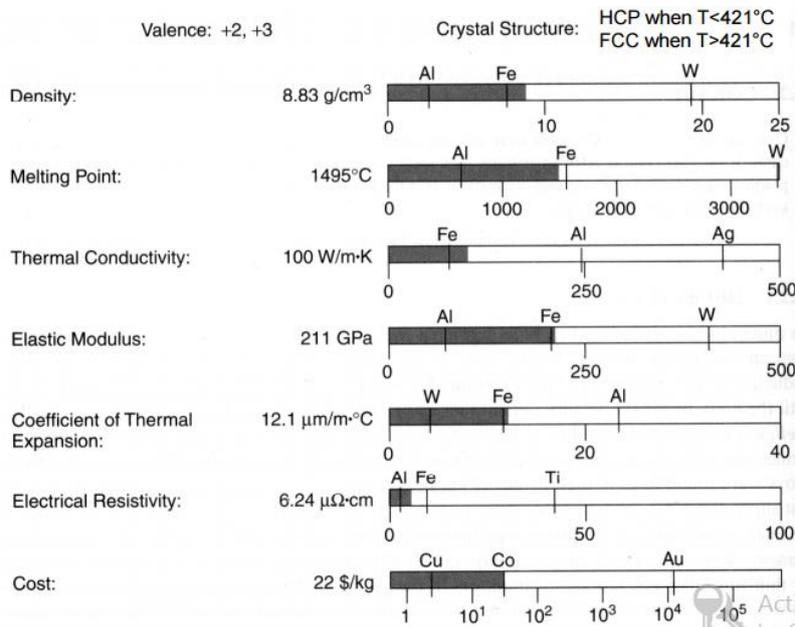


Figura 16: Propiedades físicas aleación Cr-Co

Se puede destacar que la aleación como Molibdeno supera en módulo elástico, coeficiente térmico de expansión y es más conductor que el Fe además de ser más denso. Sin embargo, tiene un punto de fusión inferior al Fe además de tener una resistividad eléctrica inferior a este.

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del Cr-Co-Mo (Tabla 15) dependen de factores con la forma de obtención del material, así como de los tratamientos térmicos.

A continuación, se exponen las propiedades mecánicas y térmicas suministradas por el fabricante ARCAM.

	Arcam, as-built*	Arcam, after heat treatment*	ASTM F75-07, required
Rockwell Hardness	47 HRC	34 HRC	25–35 HRC
Tensile Strength, Ultimate		960 MPa 140,000 psi	655 MPa 95,000 psi
Tensile Strength, Yield		560 MPa 80,000 psi	450 MPa 65,000 psi
Elongation at Break	Not applicable	20%	>8%
Reduction of Area	Not applicable	20%	>8%
Fatigue limit, Rotating Beam Fatigue		>10 million cycles at 610 MPa (90 ksi)	

Tabla 15: Propiedades mecánicas aleación Cr-Co

4.6.2. COMPORTAMIENTO ALOTRÓPICO CR-CO

Aunque el cobalto tiene una estructura cristalográfica (hcp) a temperatura ambiente, a temperaturas mayores de 400°C se transforma a estructura centrada en las caras (fcc).

La adición de aleantes como el molibdeno (Mo) aumenta el rango de solidificación, alterando la morfología de los carburos.

Debido a la naturaleza compleja de la transformación fcc→hcp, la microestructura característica consiste en una matriz dendrítica α-fcc rica en cobalto en estado metaestable, más un precipitado eutéctico interdendrítico compuesto principalmente por carburos M₂₃C₆, fase σ y fase α-fcc (Imagen 37).

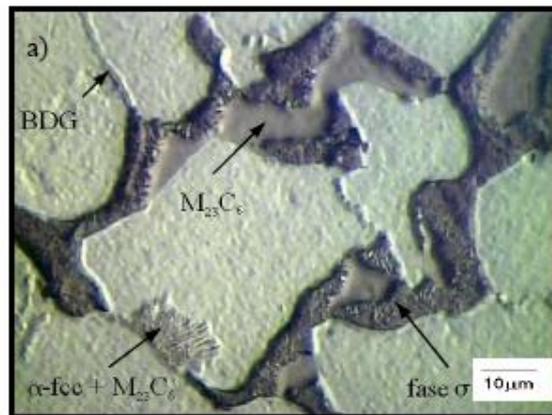


Imagen 37: Microestructura HCP Cr-Co

4.6.3. ETAPAS DE TRANSFORMACIÓN CR-CO POR EBM

El principal mecanismo de endurecimiento para el estado EBM es la precipitación de carburos, que se forman en una reacción eutéctica y precipitan normalmente en regiones interdendríticas y borde de grano.

Debido a las bajas velocidades de enfriamiento asociadas al método de fabricación, se presentan dos morfologías principales:

- Tipo bloque
- Tipo perlita

Estas morfologías son producto de la reacción eutéctica, mezcla de finas láminas de carburo M23C6 intercaladas con fase α -fcc (7).

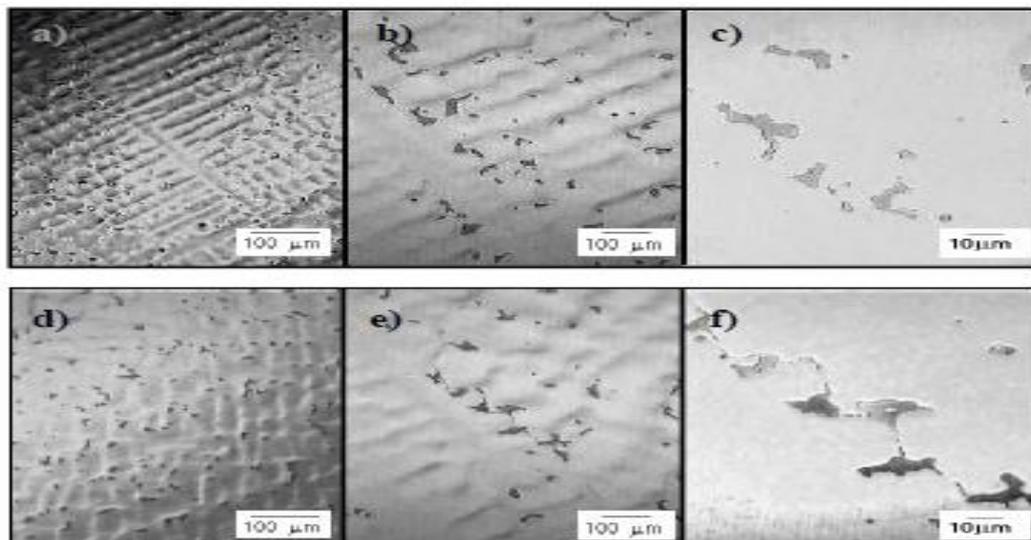


Imagen 38: Microestructuras del Cr-Co en el proceso de fabricación por EBM

Por otro lado, el contenido de nitrógeno afecta levemente el tamaño de grano, además, al incrementar su contenido se promueve por un lado, la formación de carburos M6C más finos, en lugar del tipo M23C6 que tienden a acumularse en el borde de grano y, por otro lado, una mejoría en las propiedades mecánicas al actuar como endurecedor por solución sólida, aunque también actúa en detrimento de otras propiedades mecánicas, resultando a menudo menores a las especificadas en las normas

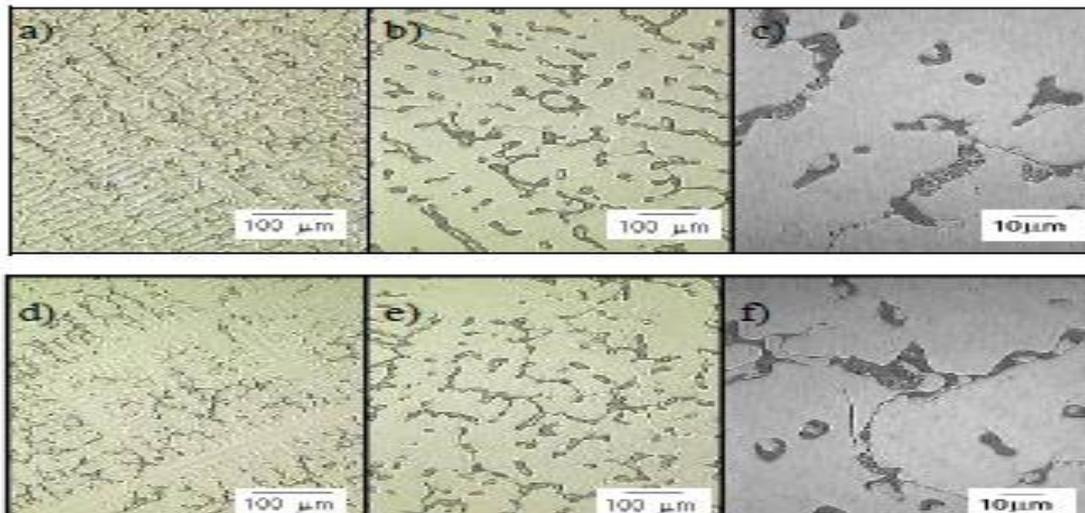


Imagen 39: Microestructuras del Cr-Co en el proceso de fabricación por EBM con exceso de nitrógeno

4.7. COBRE Y SUS ALEACIONES

Los metales de transición, también llamados elementos de transición es el grupo al que pertenece el cobre. El cobre es un metal pesado, rojo con brillo metálico. Es blando, maleable, dúctil, y un buen conductor del calor y de la electricidad (es el segundo mejor conductor, después de la plata). Las impurezas aumentan considerablemente su resistividad.

Al contacto con el aire su superficie se oxida lentamente a Cu_2O , rojo, lo que evita la oxidación posterior. En zonas húmedas se forma una capa protectora de color verde de carbonato básico de cobre ($\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{CO}_3$) en las ciudades, de sulfato básico de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) en los centros industriales y de cloruro básico ($\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$) en las zonas costeras.

Se le considera semiprecioso, pues sólo es atacado directamente por los ácidos oxidantes. Más del 50% del cobre (puro o aleado) se destina a aplicaciones eléctricas o a la electrónica. Su elevado precio hace que sea sustituido por materiales más baratos siempre que es posible (aluminio).

Base de las aleaciones de nominadas bronce (cobre y estaño) y latones (cobre y zinc) de gran importancia económica.

4.7.1. PROPIEDADES GENERALES COBRE

Elemento químico, de símbolo Cu, con número atómico 29; uno de los metales de transición e importante metal no ferroso. Su utilidad se debe a la combinación de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como a sus propiedades eléctricas y su abundancia. El cobre fue uno de los primeros metales usados por los humanos.

Por último, una característica que está tomando pujanza en nuestros días es la buena disponibilidad al reciclaje que presenta el cobre una vez finalizado su vida útil. De hecho, puede ser reciclado de forma indefinida, lo que permite reducir enormemente la energía necesaria (hasta un 90%) que si la comparamos con la energía que haría falta para transformar para su uso el material extraído directamente de la naturaleza.

La siguiente tabla 16 resume las características más importantes del cobre en estado puro y con un tratamiento de recocido:

CARACTERISTICAS	ESTADO DE SUMINISTRO	
	RECOCIDO	
Peso específico (Kg/dm ³)	8.9	8.9
Temperatura de fusión (O° C)	1.083	1.083
Coefficiente de dilatación lineal	16.5 x 10-6	16.5 x10-6
Temperatura de Recocido (O° C)	500	
Temperatura de Forja (O° C)	750 - 900	750 - 900
Solución de decapar	H ₂ SO ₄ al 10%	H ₂ SO ₄ al 10%
Carga de rotura R (Kg/mm ²)	32	22
Alargamiento (%)	3 a 5	28 a 30
Calor específico de 0° a 100°C (cal/g°C)	0,092	0,092

Tabla 16:Propiedades generales del Cobre

- **PROPIEDADES QUÍMICAS**

Densidad a 20 °C: 8,96 g/cm³ (0,31 lb/in³ a 68 °F)

- • Punto de fusión: 1083 °C (1981 °F, 1356 K)
- • Punto de ebullición: 2595 °C (4703 °F, 2868 K)
- • Calor específico: 0,385 J/g·K (0,092 cal/ g °C)
- • Calor latente de fusión: 214·103 J/kg
- • Calor latente de ebullición: 5410·103 J/kg
- • Conductividad eléctrica a 20 °C: 58,108·106 S/m (siemens por metro)
- • Resistencia eléctrica: 0,017 Ohmio/mm²
- • Conductividad térmica: 400 W/m·K
- • Coeficiente de dilatación lineal: 1,7·10-5 °C-1, de 20 °C a 100 °C

- **PROPIEDADES MECÁNICAS**

En la siguiente tabla 17 se recogen las propiedades mecánicas de resistencia del cobre, según los distintos estados de tratamiento a que sea sometido:

Características Mecánicas del Cobre			
Estado	Resistencia a la tracción, kg/mm²	Límite elástico, kg/mm²	Alargamiento en la rotura, %
Fundido	15 - 22	-	25 - 15
Recocido	21 - 24	9	46 - 47
Templado	37 - 41	36	5 - 6

Tabla 17: Propiedades Mecánicas del Cobre

En la siguiente tabla se indica los valores para el Módulo de elasticidad transversal, G, para distintos materiales, además de para el cobre, en ella podemos apreciar la rigidez del material frente a otros (Tabla 18).

Material	G (MPa)
Acero	81.000
Aluminio	26.300
Bronce	41.000
Cobre	42.500
Fundición Gris (4.5 %C)	41.000
Hierro Colado	< 65.000
Hierro Forjado	73.000
Latón	39.200

Tabla 18: Comparativa Módulo de elasticidad

Los valores típicos de dureza Brinell del cobre y de otros materiales nos dan una idea de la dureza característica del cobre frente otros materiales, podemos destacar la baja dureza del Cobre frente a materiales convencionales como el acero (Tabla 19).

Material	Dureza Brinell
Cobre	35 HB
Aluminio	15 HB
Acero (blando)	120 HB
Acero de herramientas	500 HB
Acero inoxidable	250 HB

Tabla 19: Durezas según el material

Después de la plata (Ag), el cobre es el mejor conductor de la electricidad (Figura 17)



Figura 17:Comparativa conductividad eléctrica en función del material

Además, el cobre es el metal que mejor conduce el calor, es por eso por lo que su uso es grandemente apreciado para calentar o enfriar rápidamente, un líquido o un gas.

El cobre es amagnético, es decir, no tiene magnetismo y, por lo tanto, no es atraído por polos.

Por ser amagnético, el cobre se utiliza mucho en relojería, construcción eléctrica y electrónica, armamentos, dragados de minas, etc.

En resumen, las principales propiedades físicas que destacamos del cobre son:

- BUEN CONDUCTOR DE LA ELECTRICIDAD
- EL MEJOR CONDUCTOR DEL CALOR
- AMAGNETICO

4.7.2. EFECTO ALEANTES

ALEACIONES BASE COBRE (LATÓN, BRONCE)

Las principales aleaciones de base cobre son los latones y las aleaciones de bronce.

- **Latones (Cu-Zn):**

Los latones son un tipo de aleación de base cobre con zinc, cuyo porcentaje en cobre varía del 45 al 95%, siendo el resto de cinc.

Además puede contener la adición de cantidades relativamente pequeñas de otros elementos (estaño, plomo, manganeso, níquel, aluminio y silicio).

Debe tenerse en cuenta que los latones con más de un 50% en contenido de cinc son muy frágiles, por lo que su uso industrial es escaso.

Los latones en función del porcentaje en contenido en cinc, se pueden clasificar en los siguientes grupos:

-**Latones Alfa:** aleaciones que contienen hasta un 39% de cinc.

Estos latones se emplean en procesos de embutición, aunque deben protegerse de la intemperie mediante un recubrimiento debido a su tendencia a empañarse o deslustrarse.

A su vez, los latones tipo alfa se subdividen en dos grandes grupos:

a) Latones alfa rojos: con un contenido en cinc de hasta el 20%. Se caracterizan por su color rojizo, resistencia a la corrosión, facilidad de trabajo y buen ajuste bajo presión. Se emplean mucho por su facilidad de moldeo y de trabajo, y por su economía.

b) Latones alfa amarillos: tienen entre un 20% y un 39% de cinc. Son los más dúctiles y por lo tanto muy utilizados en operaciones de fuerte trabajo en frío, dado que se pueden laminar y estirar indefinidamente a temperatura ambiente.

- **Latones Beta:** latones con un contenido en cinc que comprende entre un 46% a un 50%.

Son muy frágiles y casi no tienen aplicaciones industriales, aunque se suelen emplear como material de aporte para soldadura, debido a que su punto de fusión es inferior al de los otros latones.

Además de los tipos anteriores, existen otras variedades de latones en función de los elementos aleantes que se le pueden añadir, como son:

- **Latones al estaño:** son aleaciones Cu-Zn-Sn, con contenidos de Sn y Zn inferiores al 1% y 40% respectivamente.

- **Latones al plomo:** son aleaciones Cu-Zn-Pb que no suelen sobrepasar el 40% en Zn.

- **Alpacas:** son aleaciones Cu-Zn-Ni, con un contenido en Ni que suele estar comprendido entre un 10 y un 30%, mientras que el cobre se mantiene próximo a un 54 o 64%, siendo el resto Zn. Sus propiedades varían en función de la proporción de estos elementos.

En general, las aleaciones de alpaca tienen una buena resistencia a la corrosión y buenas cualidades mecánicas, por lo que tienen muchas aplicaciones en la construcción, ferretería y accesorios de fontanería, además de materiales de vajillas y orfebrería.

- **Latones especiales:** para ciertos usos se exige a los latones una serie de características que se consiguen con la adición de elementos de aleación tales como Al, Ni, Fe, Sn, Mn, Si, Pb, etc.

- **Bronces (Cu-Sn)**

Los bronce son genéricamente aleaciones de cobre y estaño (Cu-Sn), con un contenido en estaño que varía del 2 al 22%, a los cuales se les puede añadir otros elementos aleantes, que permiten obtener unas propiedades específicas al material.

En este sentido, en función de los elementos aleantes agregados se obtienen los siguientes tipos de bronce:

- **Bronces fosforosos:** que se emplean en aquellas aplicaciones donde sea necesario un bajo coeficiente de fricción.

- **Bronces al cinc:** en este caso el cinc se añade para abaratar el costo de producción del bronce y mejorar su fluidez.

Estos bronce, con un bajo contenido de estaño (~3% Sn, ~2.5% Zn), se utilizan para monedas, y los de alto contenido en estaño (10% Sn, 2% Zn) se utilizan en aquellos otros casos donde se requiere una alta resistencia a la corrosión, por ejemplo, en aplicaciones marina.

- **Bronces al plomo:** cuando se añade hasta un 2% de Pb.

- **Bronces al cinc y plomo:** en estos casos, el plomo no suele exceder de un 4% en las aleaciones para forja y de un 10% en las de moldeo.

- **Bronces al níquel:** el Ni se añade en proporciones de hasta 1,5%, consiguiéndose mejoras en las propiedades y características tecnológicas del material.

La adición de níquel contribuye también a prevenir la segregación del plomo en los bronce moldeados de elevado contenido en Pb.

Para nuestro estudio utilizaremos cobre puro sin aleantes ya que es hasta ahora el único estudio que se ha realizado hasta el día de hoy procesado por la tecnología EBM.

4.8. COMPORTAMIENTO ALOTRÓPICO DEL BRONCE PURO

El cobre tiene una red de Bravais del tipo cúbico, mostrando una estructura cúbica centrada en las caras (FCC), en ella se distinguen espacios tetraédricos.

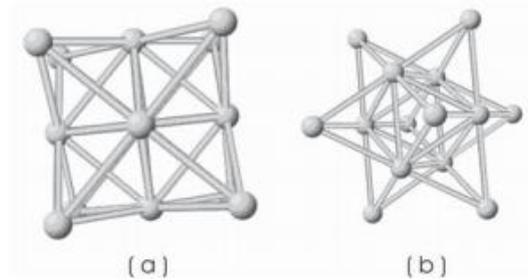


Imagen 40: Estructura Cristalina del Cobre. (a) Celda FCC vista frontal (b) Celda FCC vista lateral

La simetría dominante es cúbica axial. Los planos de deslizamiento preferenciales en este tipo de estructura pertenecen a la familia de planos $[111]$ en las direcciones $\langle 110 \rangle$ que corresponde a la dirección más compacta en este tipo de empaquetamiento. [2]

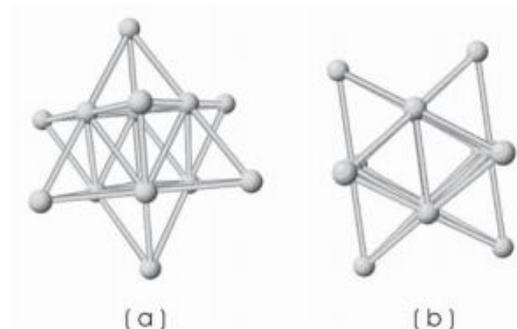


Imagen 41: Espacios tetragonales presentes en la estructura FCC del cobre. A) Vista frontal b) Vista lateral.

De acuerdo con esta estructura cristalina y las imperfecciones presente en el medio, se generan comportamientos típicos del material.

Es por esta razón que establecer relaciones apropiadas entre estructura, propiedades y procesamiento se vuelve una tarea importante al buscar nuevas aplicaciones para el cobre

- **Etapas de transformación cobre por ebm**

A continuación, veremos las distintas estructuras formadas después de haber sido tratadas por EBM

En la figura 9 se observa la microestructura del material procesado en función del plano de fabricación (XY o XZ), del número de la fabricación (1 o 44) y de la ubicación en la bandeja de fabricación.

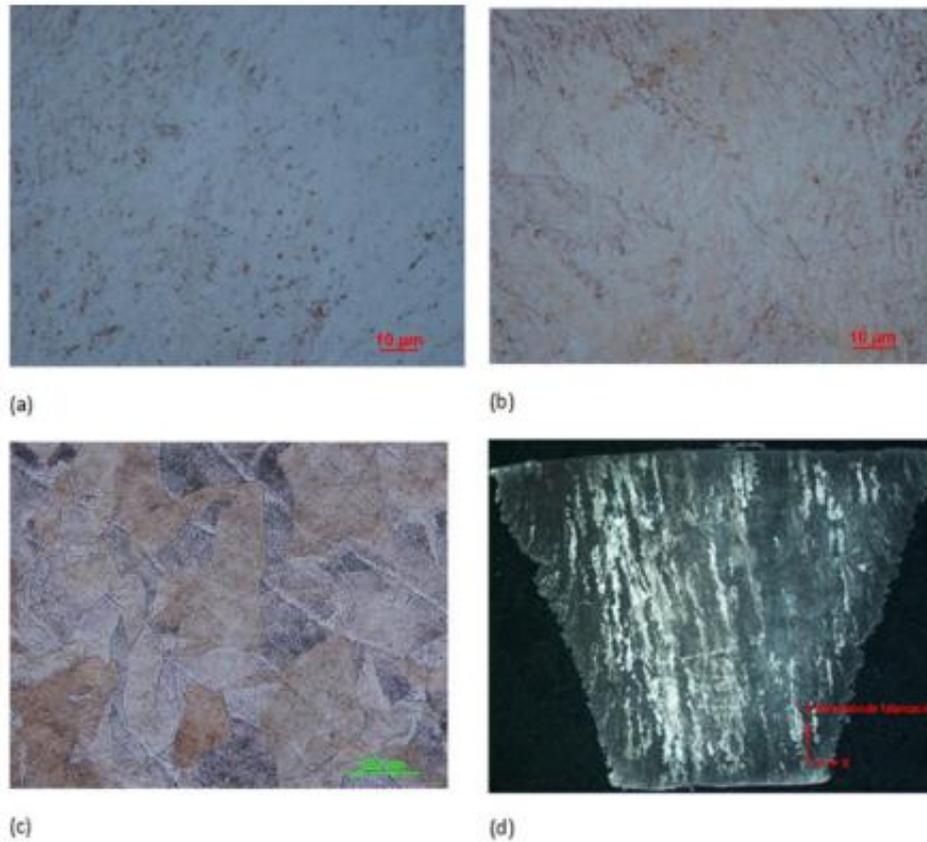


Imagen 42: Microestructura de las muestras de cobre procesadas por EBM. a) Ubicación 2.1, fabricación 1, plano xy 1000X; b) ubicación 3.2, fabricación 1, plano XY 1.000X; c) ubicación 3.1, fabricación 44, plano XY 1.000X; d) ubicación 1.2, fabricación 44, plano XZ 10X

La microestructura es muy similar para las distintas posiciones en una misma placa de fabricación. En la figura 9d (plano xz) podemos ver granos columnares en la dirección de solidificación mientras que en las figuras 9a, b y c (plano xy) se observan granos equiaxiales que han aumentado de tamaño tras 44 fabricaciones, lo que repercute directamente la disminución de las propiedades mecánicas (dureza), como se observa en la tabla 2. La dureza se mantiene prácticamente invariable en para cualquier posición del área de fabricación en una misma fabricación. Ramirez D.A. et al. [6], encontraron una arquitectura de dislocaciones-precipitados en piezas de cobre fabricadas por EBM la cual influye en el aumento de dureza mientras que precipitados no coherentes (CuO_2) estaban unidos a las dislocaciones desde esas configuraciones espaciales.

En la tabla 4 se dan los valores de dureza Brinell (carga de 10 Kg y bola de 1 mm de diámetro) según UNE-EN ISO 6506-1 para el material procesado en todas las posiciones definidas en la bandeja de fabricación obtenidos con un durómetro Wolpert V-Testor 2.

Se puede observar que para una misma fabricación los valores de dureza en el material procesado son muy similares en todo el volumen. Se presenta una disminución de dureza alrededor de un 22% en las dos fabricaciones estudiadas debido principalmente al crecimiento de grano (Tabla 20).

Fabricación Nº	Dureza Brinell (HBW 1/10)
1	90
	92
	89
	91
	92
	93
	90
	93
	88
	89

Tabla 20: Durezas HB para el Cobre procesado

Como hemos comentado anteriormente el cobre es un excelente material debido a sus propiedades conductoras tanto eléctricas como térmicas es por eso por lo que ha realizado dicho estudio con este material.

Por ello los resultados proporcionados por AIMME en su último estudio nos dicen que La conductividad eléctrica obtenida para la pieza procesada por EBM es un 4% menor que la del cobre comercialmente puro C11000 (5.80×10^7 S/m, 100% IACS) a temperatura ambiente. Este valor disminuye a medida que aumenta la temperatura y los valores experimentales obtenidos son muy similares a los valores teóricos.

También se observa en la figura 10 que la curva de conductividad es menor después de 44 fabricaciones, posiblemente debido a impurezas, aumento del tamaño de grano y del contenido de óxido de cobre. Se puede concluir, que el cobre procesado por EBM, pierde conductividad en función del nivel de reutilización del polvo utilizado para la fabricación entre una 17%, cuando se compara a 20 °C, de 5,61 a $4,68 \times 10^7$ [S/m], y 15%, cuando se compara a 200 °C (de 3,27 a $2,77 \times 10^7$ [S/m]).

Fabricación 1		
Temperatura [°C]	Conductividad eléctrica experimental $\cdot 10^7$ [S/m]	Conductividad eléctrica teórica $\cdot 10^7$ [S/m]
20	5.61	5.61
50	5.08	5.06
100	4.31	4.34
150	3.72	3.80
200	3.27	3.38
Fabricación 44		
Temperatura [°C]	Conductividad eléctrica experimental $\cdot 10^7$ [S/m]	Conductividad eléctrica teórica $\cdot 10^7$ [S/m]
20	4.68	4.68
50	4.28	4.21
100	3.57	3.61
150	3.14	3.17
200	2.77	2.82

Tabla 21: Comparación conductividad eléctrica entre fabricación convencional y aditiva

Con esta tabla vemos los resultados obtenidos por EBM comparando los datos experimentales con los teóricos (Tabla 21). Comparación conductividad eléctrica entre fabricación convencional y aditiva. Se puede ver como no existe demasiada dispersión entre el cobre procesado de manera convencional y el procesado por EBM.

Para la conductividad térmica ocurre algo parecido. En la tabla 22 se tienen los datos de conductividad térmica (λ) y se puede observar que los datos experimentales para la primera fabricación son muy similares a los datos teóricos del cobre para las dos temperaturas estudiadas, sin embargo, a medida que se va reutilizando el material disminuye considerablemente esta propiedad.

Fabricación 1					
T [°C]	Cp [J/gK]	Densidad [Kg/m ³]	Difusividad [m ² /s]	l experimental [W/mK]	l teórica [W/mK]
25	385.0	8960	0.000112999	389.80	391.00
200	405.9	8960	0.000106570	387.58	388.35
Fabricación 44					
T [°C]	Cp [J/gK]	Densidad [Kg/m ³]	Difusividad [m ² /s]	l experimental [W/mK]	l teórica [W/mK]
25	385.0	8960	0.000078289	270.07	391.00
200	405.9	8960	0.000072170	262.47	388.35

Tabla 22: Conductividad térmica (λ) del cobre puro en la primera fabricación.

En resumen, en este apartado de materiales se han analizado los materiales metálicos más empleados en fabricación aditiva como son el Ti6Al4V, Cromo-Cobalto y Bronce puro.

Se han visto las propiedades de cada uno de ellos comparándolas con los métodos convencionales de fabricación y las distintas fases por las que pasan una vez tratados térmicamente por EBM.

A continuación, desarrollaremos la parte experimental de la aleación Ti6Al4V en la que caracterizaremos mediante los ensayos pertinentes las propiedades de la aleación.

5. PLANIFICACION EXPERIMENTAL

En este apartado nos centraremos en caracterizar las muestras de la aleación Ti6Al4VEI con el fin de determinar si las propiedades de nuestras estructuras porosas son válidas para la funcionalidad que debe cumplir mediante el proceso de fabricación aditiva.

Dichas propiedades se determinarán mediante ensayos de compresión ensayos metalográficos y ensayos de dureza.

Más adelante se detallará cómo son estos ensayos, así como el desarrollo experimental empleado. Finalmente se mostrarán los resultados obtenidos, se discutirán y se llegarán a unas conclusiones.

El proceso para caracterizar las propiedades de las muestras por EBM ha sido mediante nuestros cubos de diferentes tamaños proporcionados por AIMME (Imagen 43).

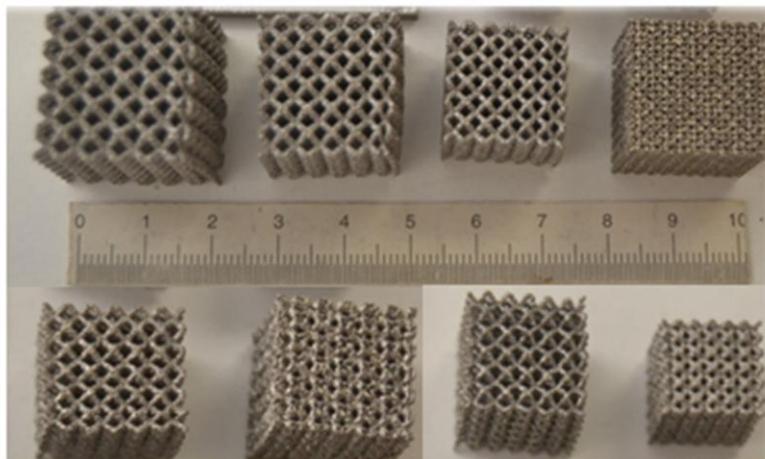
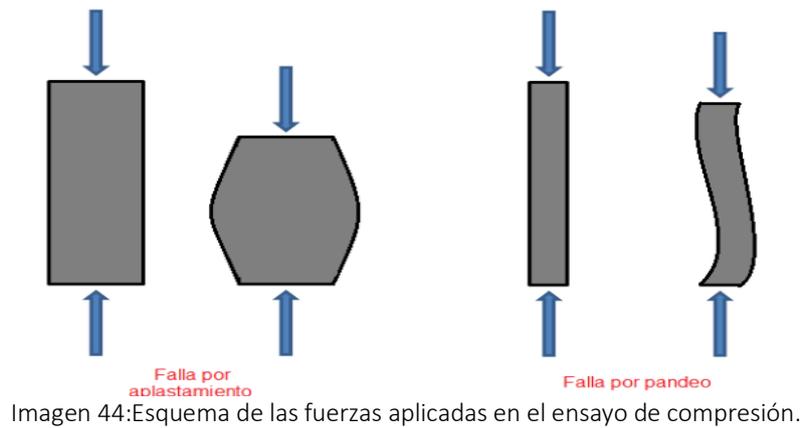


Imagen 43: Cubo proporcionados por AIMME

Los ensayos para los cuales determinaremos las propiedades mecánicas elementales como **módulo de elasticidad, límite elástico, carga de rotura, alargamiento máximo y dureza**, así como los ensayos metalográficos que nos determinan características microestructurales son:

- **Ensayo de compresión** (Imagen 44): El ensayo de compresión consiste en aplicar a la muestra una carga estática en la dirección de su eje longitudinal que tiende a provocar un acortamiento de la misma y cuyo valor se irá incrementando hasta la rotura o suspensión del ensayo.



-Se miden cargas y acortamientos y la gráfica tiende a ser de la siguiente manera:

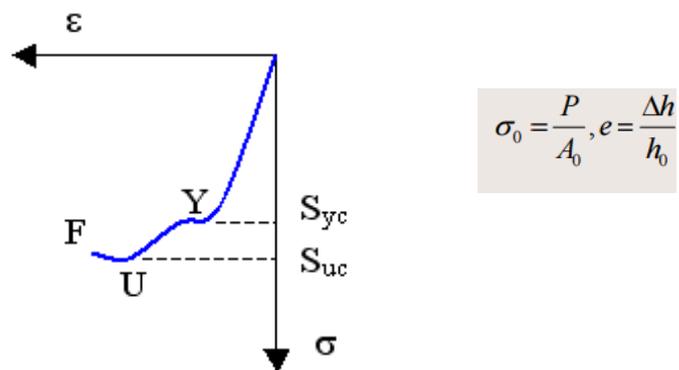


Figura 18: Gráfica de tensión-deformación para el ensayo de compresión

Por convenio, las tensiones y deformaciones en compresión se consideran negativas (Figura 18), de ahí la posición del gráfico en el tercer cuadrante.

A partir de la curva citada se pueden definir tres puntos característicos principales y de los cuales extraeremos los datos necesarios para nuestras muestras:

- Y: Límite de fluencia: punto a partir del cual se producen deformaciones plásticas permanentes
- U: Límite de resistencia última o límite de rotura: punto en el que se alcanza la tensión máxima de compresión
- F: Punto de fractura: punto en el que se produce la rotura de la probeta.

-Ensayo de dureza: Desde el punto de vista físico se define la dureza como la resistencia que oponen los cuerpos a ser rayados o penetrados por otros con los que se compara. Existen distintas escalas para medir la dureza.

En el ensayo de dureza Brinell el penetrador es una bola de acero extraduro de diámetro D , que se apoya sobre la probeta a estudiar, ejerciendo sobre la misma una fuerza P durante un tiempo t dado apareciendo una huella de diámetro d sobre el metal

En la dureza Brinell, siendo S la superficie de la huella, casquete esférico (Figura 19) . P se expresa en kg fuerza y S en mm^2 . Se expresa de la siguiente manera:

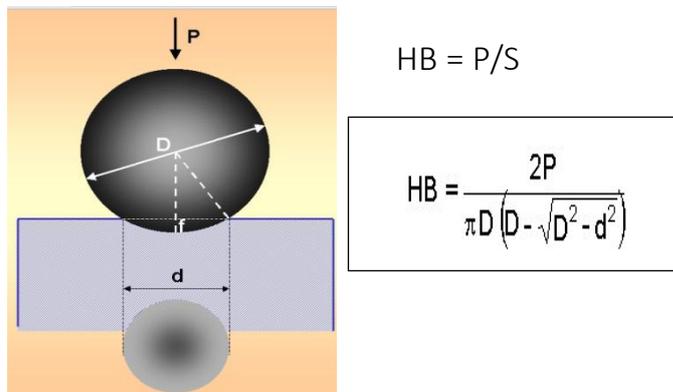


Figura 19:Esquema dureza Brinell

El ensayo de dureza Vickers (Figura 20) es, como el Brinell, un ensayo cuyo objetivo es la determinación de la superficie lateral, S , de la huella. El penetrador es una pirámide de diamante de base cuadrada, cuyo ángulo en el vértice es de 136° .

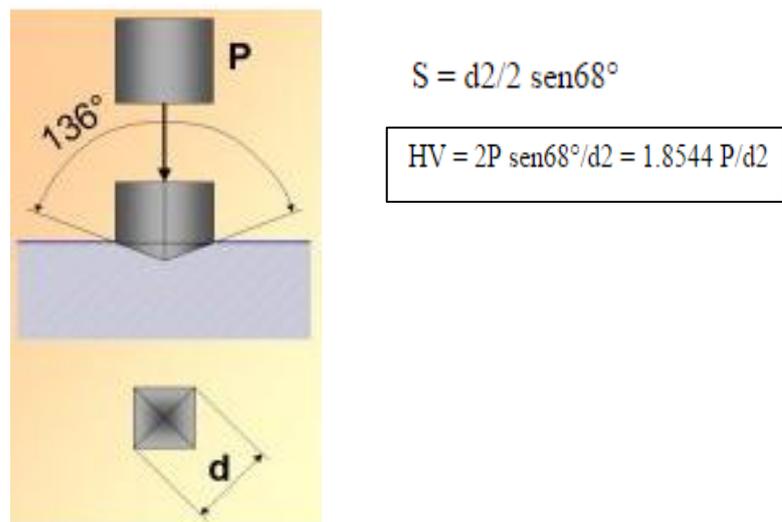


Figura 20: Esquema dureza Vickers

En los ensayos de dureza Rockwell (Figura 21), las unidades de dureza se establecen por la medida de la profundidad, e , de la huella de acuerdo con el modelo:

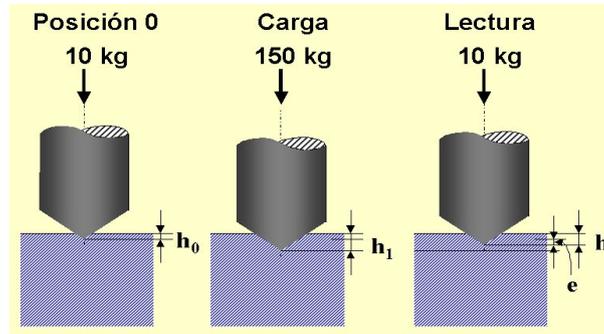


Figura 21: Esquema dureza Rockwell

La denominación de la dureza Rockwell ensayada es por escalas, de A a L, que identifica la precarga, carga y tipo de penetrador (Tabla 23).

ESCALA	CARGA (kg)	PENETRADOR	MATERIALES TÍPICOS PROBADOS
A	60	Cono de diamante	Materiales duros en extremo, carburos de wolframio, etc.
B	100	Bola de 1/16"	Materiales de dureza media, aceros al carbono bajos y medios, latón, bronce, etc.
C	150	Cono de diamante	Aceros endurecidos, aleaciones endurecidas y revenidas.
D	100	Cono de diamante	Acero superficialmente cementado.
E	100	Bola de 1/8"	Hierro fundido, aleaciones de aluminio y magnesio.
F	60	Bola de 1/16"	Bronce y cobre recocidos.
G	150	Bola de 1/16"	Cobre al berilio, bronce fosforoso, etc.
H	60	Bola de 1/8"	Placa de aluminio.
K	150	Bola de 1/8"	Hierro fundido, aleaciones de aluminio.
L	60	Bola de 1/4"	Plásticos y metales suaves, como el plomo.

Tabla 23: Escala dureza rockwell

Con el objeto de obtener ensayos reproducibles, la máquina obtiene el valor "e", por incrementos de las cargas aplicadas de acuerdo con la secuencia siguiente:

- 1 - Aplicación de una carga previa, $F_0 = 10$ kg. Esta sirve para tomar una referencia h_0 , independiente del estado superficial.
- 2 - Aplicación de la sobrecarga de ensayo, F_1 , con lo que se alcanza h_1 .
- 3 - Eliminación de la sobrecarga F_1 , con lo que se recupera la deformación elástica y se

conserva la remanente. La profundidad alcanzada es h.

4 - La profundidad de la huella viene definida por:

$$e = h - h_0$$

-Ensayo metalográfico: Los ensayos metalográficos permitieran determinar las características de la microestructura en función del tamaño del poro originado en el proceso de fabricación.

Se determinará la morfología de las muestras.

Para ello se realizará un análisis metalográfico mediante microscopía óptica y mediante lupa a distintas ampliaciones.

- **Microscopía óptica:** Se cortarán secciones longitudinalmente, procediéndose a su embutición y pulido, para seguidamente ser estudiados metalográficamente mediante un microscopio óptico.

Mediante un análisis de imagen se determinará las características de las fases presentes, disposición de las mismas y porosidades internas.

- **Microscopio de lupa:** Debido a la opacidad de los metales y aleaciones, opera con la luz reflejada por el metal. Por lo que para poder observar la muestra es necesario preparar una probeta y pulir a espejo la superficie. Es posible examinar una muestra con aumentos que varían entre 50x y 2000x.

6. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

En el presente epígrafe se detallará el procedimiento de los ensayos antes mencionados, así como de la preparación de las muestras del Ti6Al4VEli.

También se detallará el material y los equipos utilizados para alcanzar los fines propuestos.

Todas estas etapas y los ensayos descritos en el apartado de planificación experimental, se llevaron a cabo en función de los equipos y las técnicas de caracterización disponibles en el departamento de Material de la Universidad Politècnica de València. Obteniendo con ello, un completo estudio de las características mecánicas, morfológicas y microestructurales.

El procedimiento a seguir para el desarrollo experimental consta de varias etapas antes de sacar conclusiones.

Entre ellas se distinguen principalmente y por el mismo orden:

- 1º. Presentación de los 8 cubos por EBM.
- 2º. Preparación de las muestras consideradas por embutición.
- 3º. Ensayo metalográfico.
 - Caracterización morfológica de las muestras mediante una lupa.
 - Caracterización morfológica y microestructural mediante microscopía óptica.
- 4º. Ensayo de Dureza.
- 5º. Ensayo de Compresión.
- 6º. Resultados.
- 7º. Conclusiones.

6.1. PRESENTACIÓN DE LOS 8 CUBOS POR EBM.

El primer paso para caracterizar las muestras y con ello poder realizar los ensayos, es la presentación de los 8 elementos de los cuales trabajaremos posteriormente. Como se ha mencionado anteriormente, las muestras están fabricadas de Ti6Al4VEli a través de la tecnología aditiva por ElectronBeamMelting (EBM) en AIMME.

Consta de 8 muestras y cada una tiene un tamaño de poro distinto.

La muestra tipo tiene una estructura a simple vista en forma de celda o más conocido en el sector biomédico como “scaffold”.

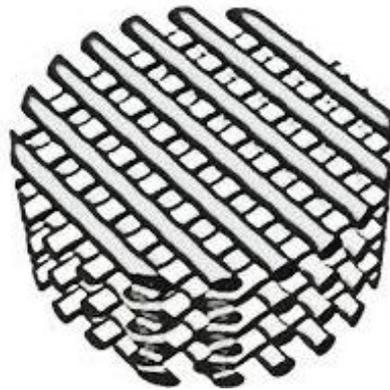


Figura 22: Estructura macroscópica del “scaffold”

Este tipo de estructura es ideal para prótesis ya que conseguimos una inercia y rigidez adecuada con el menor peso posible.

El proceso de tejido es intercalando varios cordones de titanio en forma de tejido poroso. Tanto la orientación como el tamaño del cordón son controlados mediante la máquina Q10 Arcam de tecnología EBM. Las diversas capas de material crean unos orificios de tamaño controlado por los cuales se injertarán los tejidos biológicos.

La limitación en este tipo de estructuras fabricadas por impresión 3D está en la disminución del tamaño del poro. De ahí a que se hayan fabricado varias muestras con distintos tamaños.

La graduación del poro va desde un tamaño $1864 \pm 41 \mu\text{m}$ hasta $810 \pm 73 \mu\text{m}$ y se han realizado numerosas pruebas hasta conseguir un tejido uniforme y con un tipo de poro homogéneo.

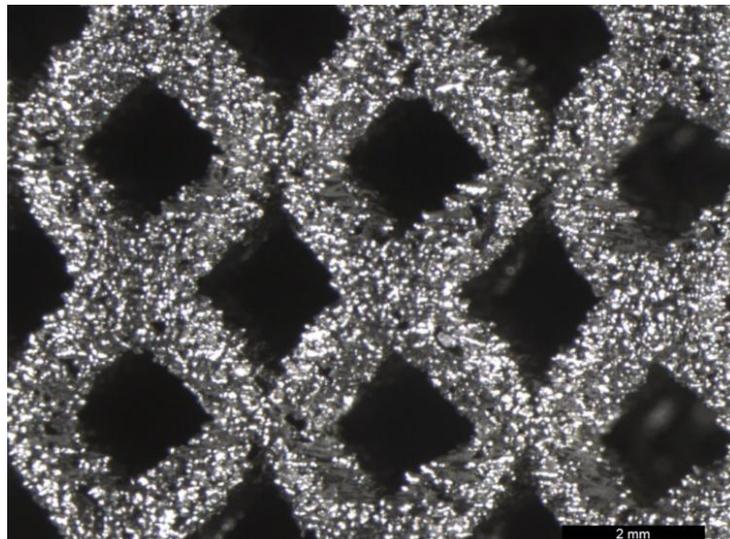


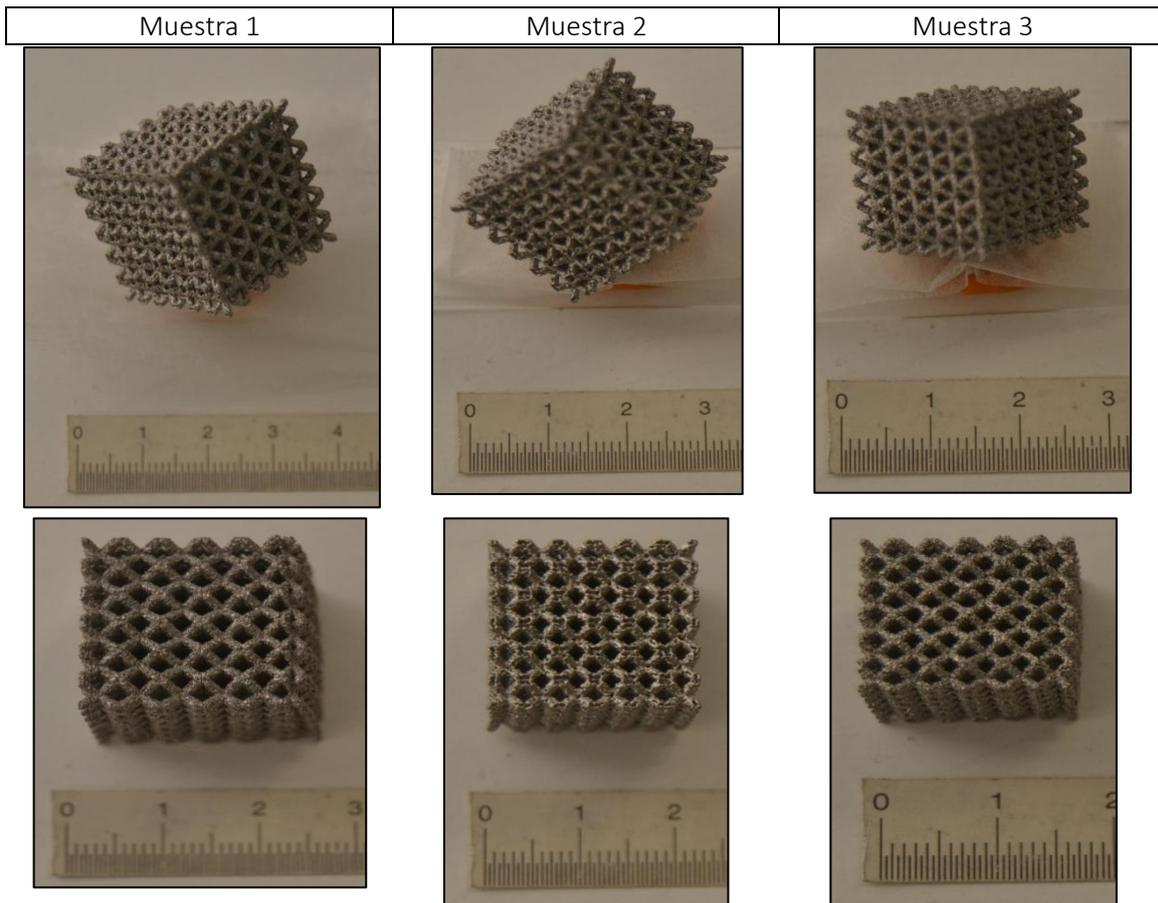
Imagen 45: Estructura a lupa de una de las muestras.

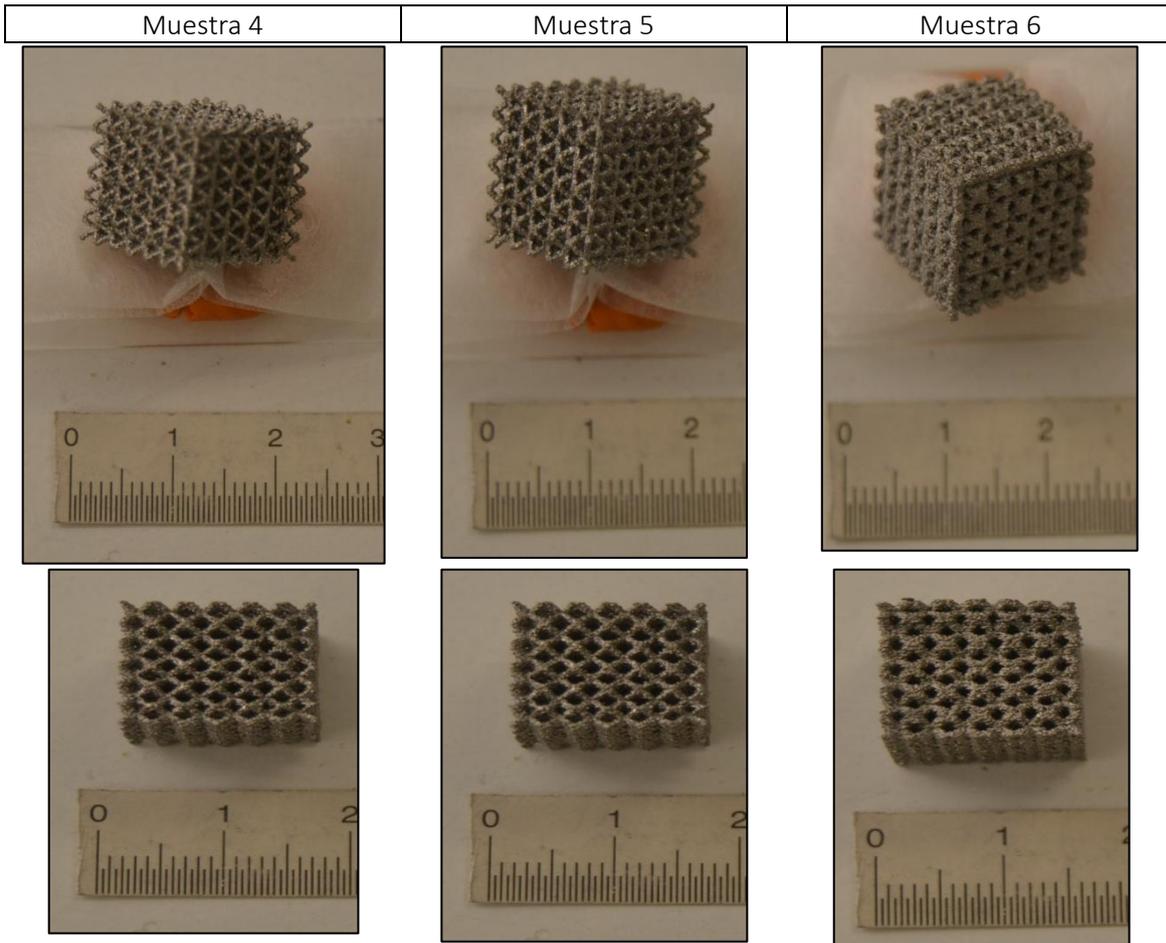
En la siguiente tabla se definen las 8 muestras con las que vamos a trabajar describiendo sus dimensiones y su diagonal mayor (Tabla 24).

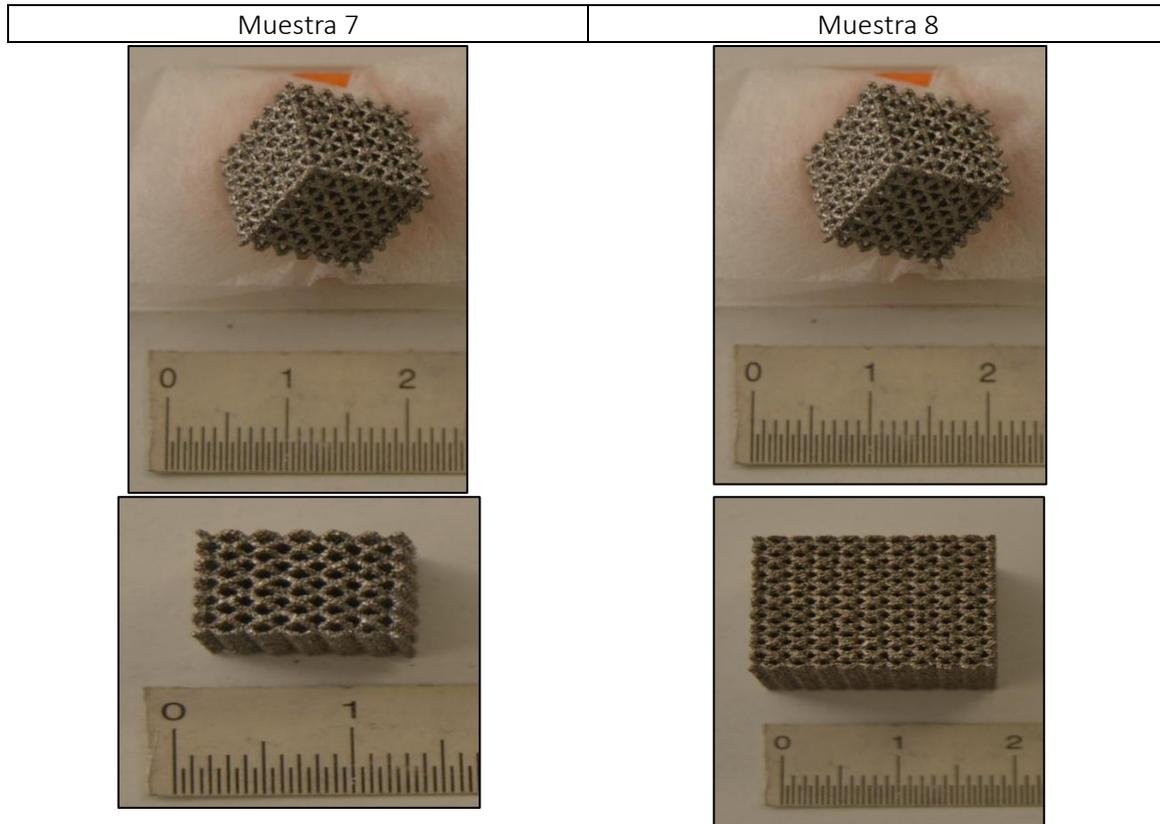
CUBOS EBM		
MUESTRA	DIMENSIONES (cm)	DIAGONAL MAYOR (cm)
1	2x2x2	4
2	2x2x2	3
3	1,5x1,5x1,5	3
4	1x1x1	2
5	1,5x1,5x1,5	2
6	1,5x1,5x1,5	2
7	1x1x1	1,5
8	2x2x2	3

Tabla 24: Dimensiones de las muestras a ensayar

A continuación, se representan las muestras incluyendo una regla normalizada en milímetros para definir las dimensiones antes descritas en la tabla.







Como se observan en las imágenes las muestras tiene forma de “scaffold” y cada uno de un tamaño distinto. La variabilidad de las dimensiones (se incluye diagonal mayor) se debe a que se ha cogido una muestra representativa con el suficiente volumen como para realizar los ensayos pertinentes.

Una vez reconocidas las muestras que vamos a analizar, en el siguiente apartado realizaremos la preparación de las muestras para los posteriores ensayos metalográficos.

6.2. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Para realizar el ensayo metalográfico es necesario seccionar una parte de los ejemplares para poder analizarlo mediante microscopio óptico y lupa.

Para la preparación de las muestras de EBM vamos a seleccionar los cubos 1, 2, 3, 5,6 ya que los cubos 4 7 y 8 ya estaban embutidos de otros ensayos.

6.2.1. FASE DE CORTE DE LAS MUESTRAS:

Para realizar los ensayos metalográficos se cortarán 5 muestras de aproximadamente 20 x 10mm.

Para ello se ha seccionado la tronzadora **Steuers Setecom-15**(Imagen 46).



Imagen 46:Corte de la muestra con la tronzadora Steuers Setecom-15

El disco empleado es de un espesor de 5mm.

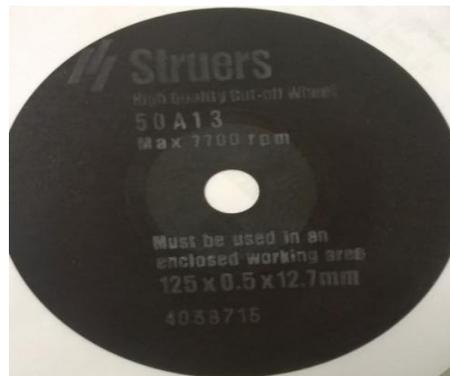


Imagen 47:Disco de corte Steuers

Las condiciones de corte (Imagen 48) son **de 0.015 mm/s a 3500 rpm** y son las necesarias para realizar un buen corte.

Un exceso en el tiempo de corte, puede producir formación del metal distorsionado y rayas profundas en la matriz. Esto puede provocar, entre otros, problemas de enfoque en el microscopio óptico.

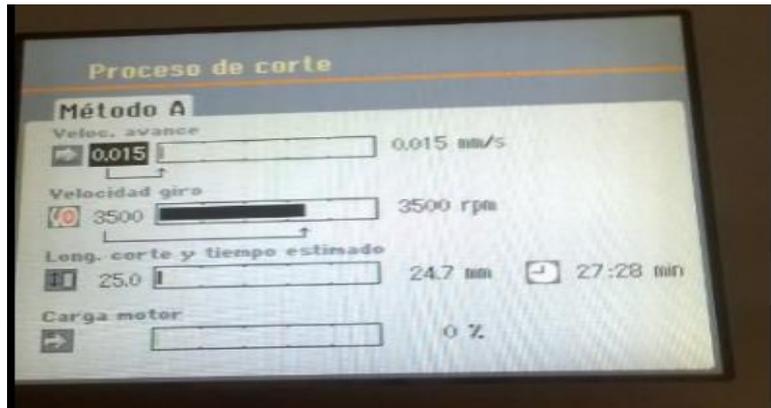


Imagen 48: Condiciones de corte para la preparación de las muestras
De esta manera se van seccionando las muestras (Imagen 49) una a una para realizar los ensayos quedando de la siguiente forma:



Imagen 49: Ejemplo de muestra cortada para ensayos metalográficos y de dureza

Por otra parte, las secciones que se cortan para el ensayo de compresión son de mayor tamaño que las anteriores (Imagen 50) y consta de 8 probetas de un tamaño medio de 23 x 10 x 10 mm



Imagen 50: Ejemplo de muestra cortada para ensayo de compresión

Es necesario enfatizar que esta etapa es crucial en el proceso de análisis microestructural, ya que el corte de las muestras puede producir deformación superficial de las mismas y alterar los resultados de la observación.

En resumen, tendremos finalmente 8 probetas cúbicas para el ensayo de compresión y 5 probetas cuadradas para los ensayos metalográficos y de dureza.

6.2.2. FASE DE EMBUTICIÓN DE LAS MUESTRAS:

Una vez tenemos las muestras cortadas se pasa a la siguiente fase. En esta, se recubren las muestras con un conglomerante resinoso para su tratamiento posterior y almacenado. A este proceso, más conocido como el de **embutición**, se realiza con una incluidora, que, mediante una resistencia interior calienta la resina hasta que se deshace. La muestra finalmente, queda recubierta de esta resina protegiéndola de factores externos. El proceso de embutición es relativamente rápido y la calidad y dureza de la muestra es óptimo

En nuestro caso se ha utilizado una máquina embutidora **Struers CitoPress-1** (Imagen 51).



Imagen 51: Embutidora Struers CitoPress-1

El conglomerante utilizado ha sido de la marca **TransOptic** y el proceso de embutición ha sido según las condiciones del fabricante (Imagen 52).

-Tº= 177ºC.

-Presión = 145 bar

-Tiempo = 7min (1 in/25mm)

Instructions for use:

System	Temperature	Pressure	Heat/Cool Time (min:sec)			
			1in 25mm	1.25in 30mm	1.5in 40mm	2in 50mm
SimpliMet™ 1000 / 3000	177 °C (350 °F)	145 bar 2100 PSI	3:00/ 11:00	3:00/ 11:00	3:00/ 11:00	4:00/ 11:00
SimpliMet XPS1	177 °C (350 °F)	290 bar 4200 PSI	1:00/ 7:00	1:30/ 9:30	1:30/ 10:00	3:30/ 10:30

Imagen 52: Condiciones de embutición según el fabricante TransOptic

Finalmente, y después del proceso de embutición (Imagen 53), las muestras quedan de la siguiente forma:

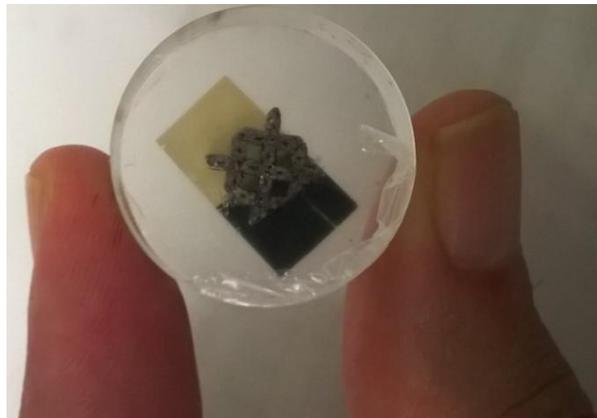


Imagen 53: Muestra embutida

De esta manera y gracias a este recubrimiento se pueden almacenar y manipular posteriormente las probetas de una manera óptima.

6.3. ENSAYO METALGRÁFICO

Una vez tenemos las probetas preparadas, pasaremos a realizar los ensayos metalográficos pertinentes. En el ensayo metalográfico, se determinan las características estructurales o de constitución del material para relacionarlas con las propiedades mecánicas. Básicamente, el procedimiento que se realiza en un ensayo metalográfico incluye la preparación y ataque químico de la muestra para terminar en la observación microscópica.

Si la etapa de preparación no se realiza cuidadosamente es posible que se obtenga una superficie poco representativa del metal y sus características.

A continuación, se hará una breve descripción de cada uno de los pasos previos a la observación en el microscopio y a la lupa, comenzando por la preparación de la misma y por último se describe el ataque químico a la muestra y la observación microscópica.

La preparación metalográfica de la muestra puede dividirse en tres fases:

- 1) Desbaste Grosero
- 2) Desbaste Final

3) Ataque químico

6.3.1. DESBASTE GROSERO

Se practica una vez extraída la probeta con la finalidad de reducir las irregularidades, producidas en la operación de extracción, hasta obtener una cara lo más plana posible. De cualquier manera, en el desbaste grosero siempre se debe cuidar que la presión no sea exagerada para que la distorsión no sea muy importante, ni la temperatura de la superficie se eleve demasiado.

Los esfuerzos mecánicos que introducen las partículas de abrasivo, sumado al efecto térmico producen la fluencia del metal en la superficie de la muestra. Esta fluencia de metal destruye, al menos parcialmente, el estado cristalino del metal. Es por ello que este proceso se debe realizar de la mejor forma posible para no falsear los resultados morfológicos de la muestra.

En nuestro caso para la operación de desbaste utilizaremos una cinta de desbaste de la marca **Streuers LabProf-21** (Imagen 54) como el de la figura:



Imagen 54:Cinta de desbaste Streuers LabProf-21

El procedimiento a seguir es ir puliendo las muestras una a una en el disco, ejerciendo manualmente una pequeña presión en la probeta. Durante el desbaste grosero, se van intercambiando la orientación de la muestra a 90° cada cierto tiempo para que se desbaste de una forma óptima.

Una vez hemos hecho el desbaste grosero, pasamos al desbaste final.

6.3.2. DESBASTE FINAL

Para este caso de desbaste, se coloca un papel abrasivo sobre una placa plana y limpia y se mueve la probeta longitudinalmente de un lado a otro del papel aplicándole una presión suave. Se debe mantener la misma dirección para que todas las rayas sean paralelas.

Durante la operación, se debe dejar que una corriente de agua limpie los pequeños desprendimientos de material y a su vez lubrique y refrigere la zona desbastada. El final de la operación sobre un papel está determinado por la desaparición de las rayas producidas durante el desbaste grosero o el papel anterior.

En este paso la muestra se ha pasado por un desbaste fino con un abrasivo de **diamante de 3 micras y luego de 1** (Imagen 55).

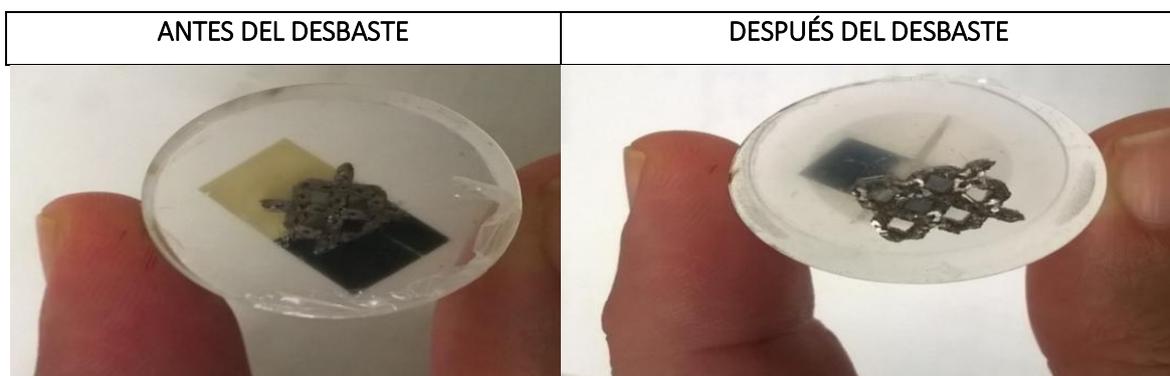


Imagen 55: Cinta de desbaste Streuers LabProf-21 de 3 micras

El procedimiento que se ha seguido es el de operar de manera que las rayas de un papel a otro sean perpendiculares, es decir, se debe rotar 90º la dirección de movimiento de la probeta cada vez que se cambia de abrasivo. Además, cada vez que se cambia de abrasivo es conveniente lavar la probeta y enjuagarse las manos para no transportar las partículas desprendidas en el abrasivo anterior, ya que esto puede provocar la aparición de rayas.

La presión que se aplica a la probeta no debe ser exagerada ya que esto aumentala distorsión y además pueden aparecer rayas profundas. La presión debe irdisminuyendo a medida que se avanza en la operación.

Finalmente, después del desbaste grueso y fino con distintos tipos de abrasivos las muestras quedan de la siguiente forma:



Una vez tenemos las muestras desbastadas el siguiente paso es el de ataque químico.

6.3.3. ATAQUE QUÍMICO:

El ataque químico de la cara que se observará tiene por objetivo poner en evidencia, mediante un ataque selectivo, las características estructurales de la muestra. Al aplicar el reactivo sobre la superficie a observar, las características de la estructura son reveladas como consecuencia de un ataque selectivo de la superficie. Esto se debe a que las distintas fases, así como los planos cristalográficos diferentemente orientados poseen diferencias en la susceptibilidad al ataque.

En general aquellas regiones de la estructura donde la energía libre del sistema es mayor, como por ejemplo los límites de fases, bordes de grano, etc., son atacadas más rápidamente que las regiones monofásicas o ínter granulares. Los reactivos de ataque por lo general son ácidos orgánicos disueltos en agua, alcohol, glicerina, etc. El grado de ataque de una probeta es función de la composición, temperatura y tiempo de ataque.

Para que el ataque sea apropiado es necesario elegir el reactivo de acuerdo a la composición de la probeta. En general, dado un reactivo, el tiempo de ataque es una variable fundamental, y en general debe ser determinado en forma práctica.

Un tiempo de ataque demasiado corto (subataque), no nos permitirá que el reactivo actúe lo suficiente y por lo tanto no se obtendrá un buen contraste entre las fases, o los bordes de grano aun no habrán aparecido. Por otro lado, si sobre atacamos las muestras nos proporcionará una cara oscura con bordes de grano demasiado anchos, resultando dificultoso una distinción clara de las proporciones de cada una de las fases.

En este sentido la experiencia indica que, en el caso de no conocer el tiempo de ataque adecuado, es conveniente comenzar con secciones acumulativas de ataques de corta duración y observaciones microscópicas hasta lograr el contraste apropiado. En el caso que se produjese un sobre ataque será necesario pulir la probeta en el abrasivo más fino y también en el paño antes de atacar nuevamente durante un tiempo menor

Una vez se ha transcurrido el tiempo de ataque tomaremos la probeta y la lavaremos con agua y alcohol e inmediatamente la separamos con aire caliente.

De esta manera ya tenemos las muestras desbastadas y atacadas lo suficiente como para distinguir sus características morfológicas en el microscopio óptico y en la lupa

6.3.4. -CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LAS MUESTRAS MEDIANTE UNA LUPA.

En este subapartado reflejaremos las muestras ya preparadas mediante una lupa donde se apreciará a gran escala la morfología porosa de las muestras.

Gracias a estas imágenes podremos conocer el diámetro del poro de cada una de las probetas caracterizando su microestructura.

La lupa utilizada es de la marca *** y se han realizado varias tomas a distintas escalas.

A continuación, se expondrá cada una de las muestras con sus correspondientes ampliaciones y sus resultados de diámetro del poro y grosor de pared en el proceso de fabricación por técnicas aditivas.

Estos resultados son de gran consideración puesto que es el fin por el que se fabrican este tipo de estructuras para conseguir un orificio lo suficientemente pequeño y con gran variedad de tamaño para el uso de injertos biológicos.

- **Resultados:**

Para obtener los valores de la porosidad se han medido 7 diagonales, seleccionadas de forma aleatoria, con las que se calcula la media y la desviación típica. El valor del espesor de pared es orientativo puesto que se ha tomado una única medida.

-Cubo 1: 24x24x24 mm

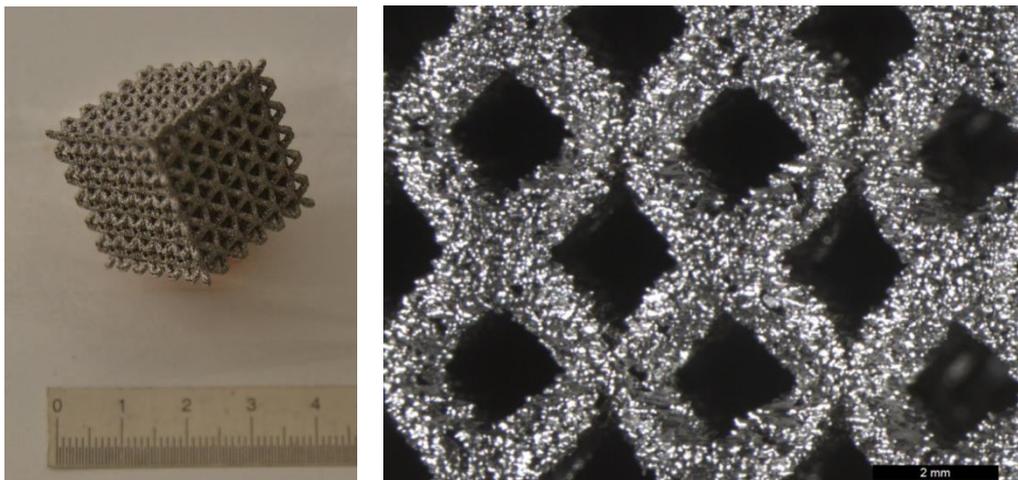


Imagen 56: Dimensiones poro y espesor Cubo 1

- Diagonal de poro: $1864 \pm 41 \mu\text{m}$
- Espesor de pared: $1076 \mu\text{m}$

-Cubo 2: 21x21x21 mm

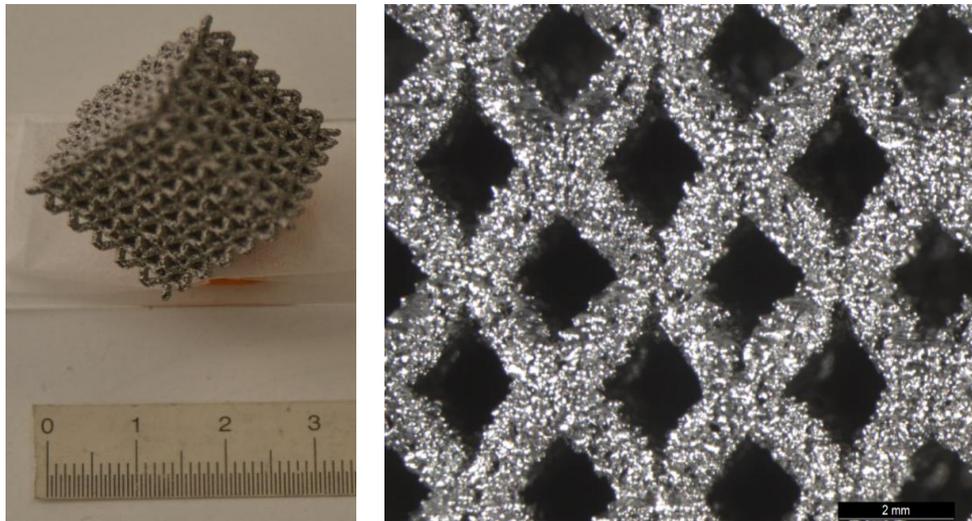


Imagen 57: Dimensiones poro y espesor Cubo 2

- Diagonal de poro: $1727 \pm 66 \mu\text{m}$
- Espesor de pared: $858 \mu\text{m}$

-Cubo 3: 18x18x18 mm

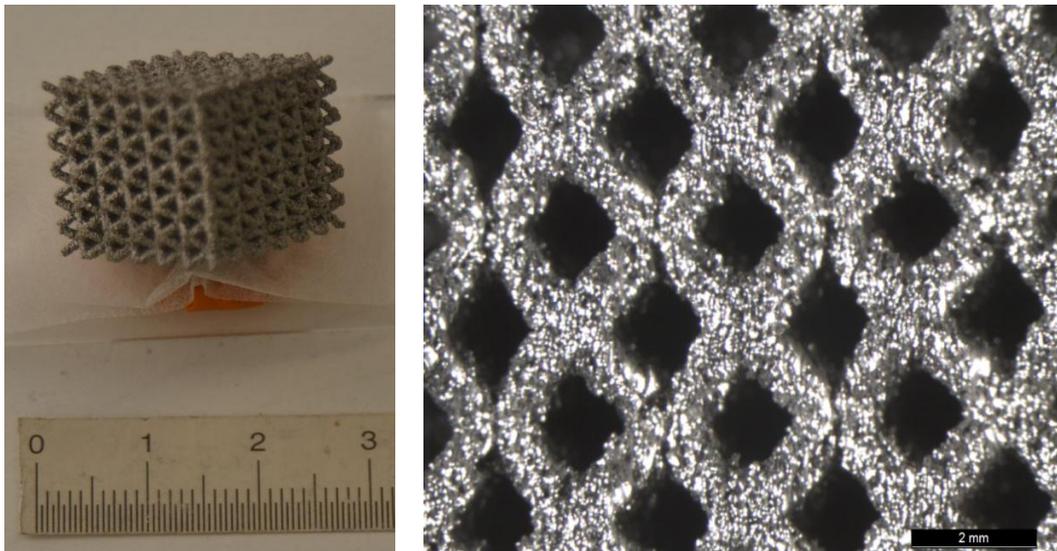


Imagen 58: Dimensiones poro y espesor Cubo 3

- Diagonal de poro: $1371 \pm 50 \mu\text{m}$
- Espesor de pared: $893 \mu\text{m}$

-Cubo 4: 15x15x15 mm

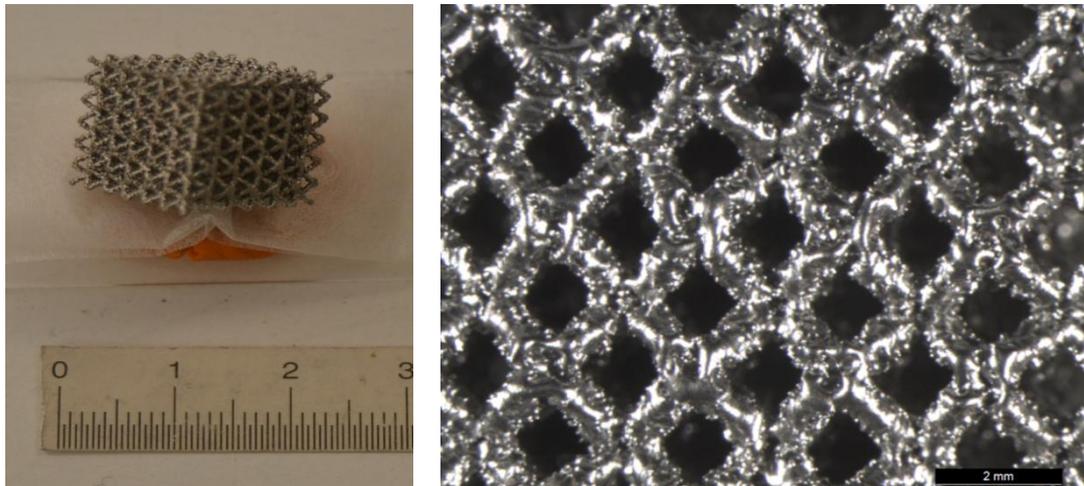


Imagen 59: Dimensiones poro y espesor Cubo 4

- Diagonal de poro: $1191 \pm 120 \mu\text{m}$
- Espesor de pared: $477 \mu\text{m}$

-Cubo 5: 15x15x15 mm

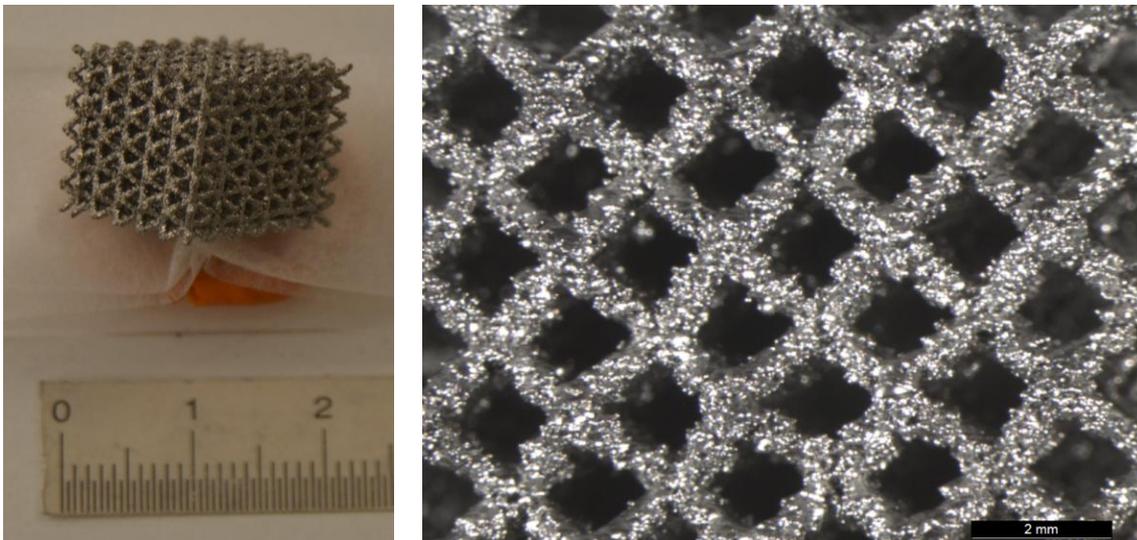


Imagen 60: Dimensiones poro y espesor Cubo 5

- Diagonal de poro: $1372 \pm 92 \mu\text{m}$
- Espesor de pared: $460 \mu\text{m}$

-Cubo 6: 15x15x15 mm

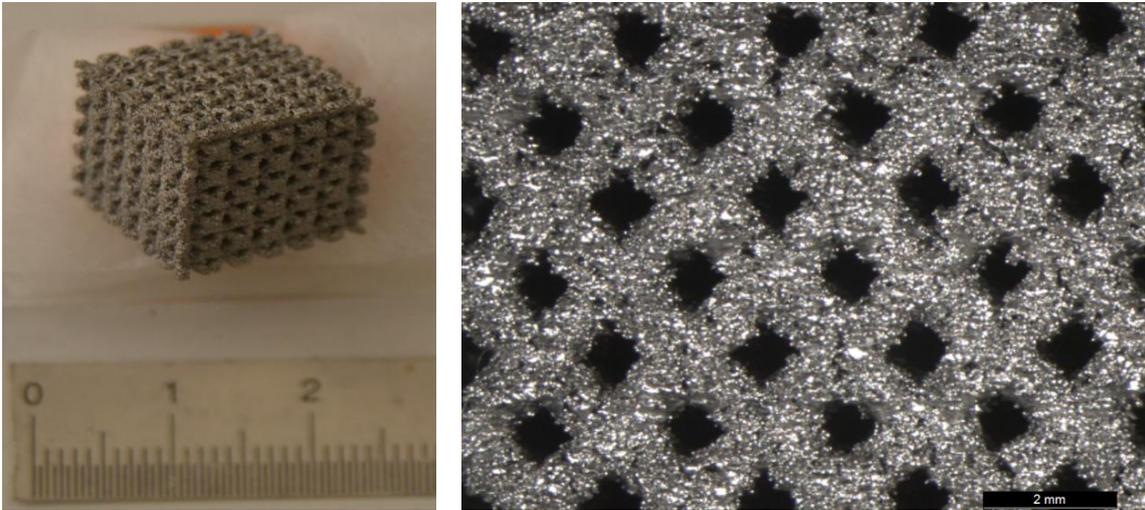


Imagen 61: Dimensiones poro y espesor Cubo 6

- Diagonal de poro: $914 \pm 80 \mu\text{m}$
- Espesor de pared: $862 \mu\text{m}$

-Cubo 7: 12x12x12 mm

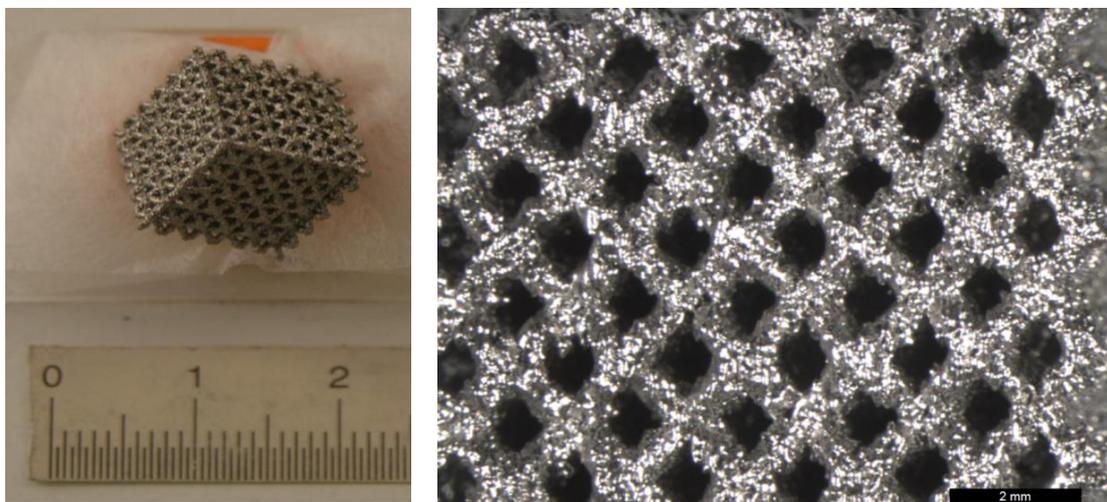


Imagen 62: Dimensiones poro y espesor Cubo 7

- Diagonal de poro: $810 \pm 73 \mu\text{m}$
- Espesor de pared: $539 \mu\text{m}$

-Cubo 8: 20x20x20 mm

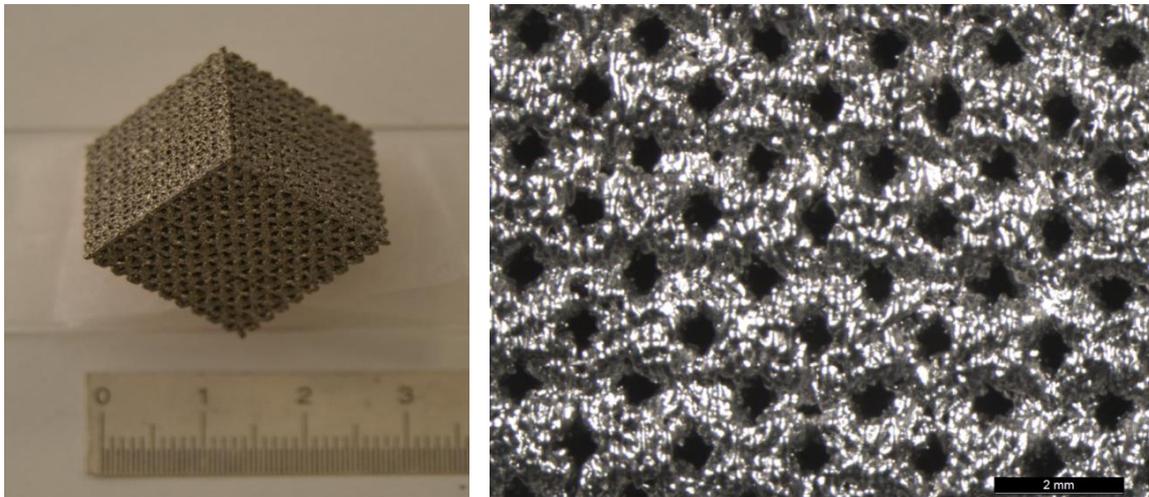


Imagen 63: Dimensiones poro y espesor Cubo 8

- Diagonal de poro: $520 \pm 79 \mu\text{m}$
- Espesor de pared: $732 \mu\text{m}$

En la siguiente tabla se recogen los resultados antes expuestos (Tabla 25):

RESUMEN MORFOLÓGICO			
MUESTRA	DIMENSIONES (cm)	DIAGONAL DEL PORO (μm)	ESPESOR DE PARED (μm)
1	2x2x2	1864 ± 41	1076
2	2x2x2	1727 ± 66	858
3	1,5x1,5x1,5	1371 ± 50	893
4	1x1x1	1191 ± 120	477
5	1,5x1,5x1,5	1372 ± 92	460
6	1,5x1,5x1,5	914 ± 80	862
7	1x1x1	810 ± 73	539
8	2x2x2	520 ± 79	732

Tabla 25: Resumen dimensiones de los cubos a ensayar

Como hemos observado, la diagonal del poro se encuentra entre $1864 \pm 41 \mu\text{m}$ y $520 \pm 79 \mu\text{m}$ de la misma manera el espesor de pared se encuentra en un intervalo entre $732 \mu\text{m}$ y $1076 \mu\text{m}$.

Este tipo de orificios con esa geometría son imposibles de conseguir mediante las técnicas de fabricación convencionales y más aún si el material es titanio.

El siguiente paso será caracterizar las muestras mediante un microscopio óptico donde podremos observar las distintas fases que componen el material después de haber sido tratado por la tecnología EBM.

6.3.5. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LAS MUESTRAS MEDIANTE MICROSCOPIO ÓPTICO.

En este apartado definiremos las características micro estructurales de las muestras, que mediante un análisis de imagen se determinará las características de las fases presentes y disposición de las mismas.

Se utilizó el microscopio óptico **Nikon Microphot FX**, mostrado en la figura 64, para revelar las características morfológicas del Ti6Al4V Eli con una resolución de hasta 1000 aumentos, tanto en modo de campo claro como en campo oscuro, permitiendo éste último, la observación de porosidades en el material, entre otras características.

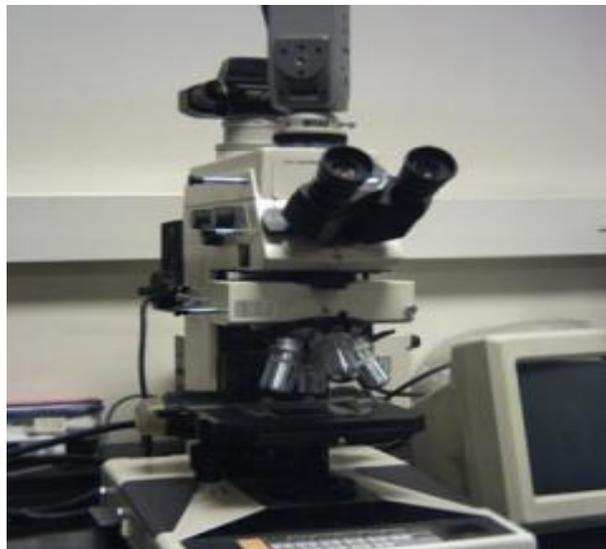


Imagen 64: Microscopio óptico Nikon Microphot FX

La microscopía óptica es la técnica sobre la que se han desarrollado las bases fundamentales de la metalografía, siendo una de las herramientas más utilizada en la determinación microestructural. Este hecho, se ve potenciado gracias a la posibilidad de utilizar otras técnicas, además de la de iluminación directa por luz normal, que lo convierten en una herramienta más versátil y completa.

Aparte de la iluminación en campo claro, que es la más usual, están la iluminación en campo oscuro, la iluminación con luz polarizada y el contraste interferencial de Nomarski.

Con este instrumento y procedimiento de este estudio se obtuvieron las imágenes siguientes a 50, 100 y 200 aumentos. En ellas se puede observar la heterogeneidad en el tamaño de partícula y su geometría características ya mencionada en el apartado anterior.

A modo ejemplo se exponen los resultados de los cubos 4,7 y 8:

-Cubo 4:

➤ Aumento x50:

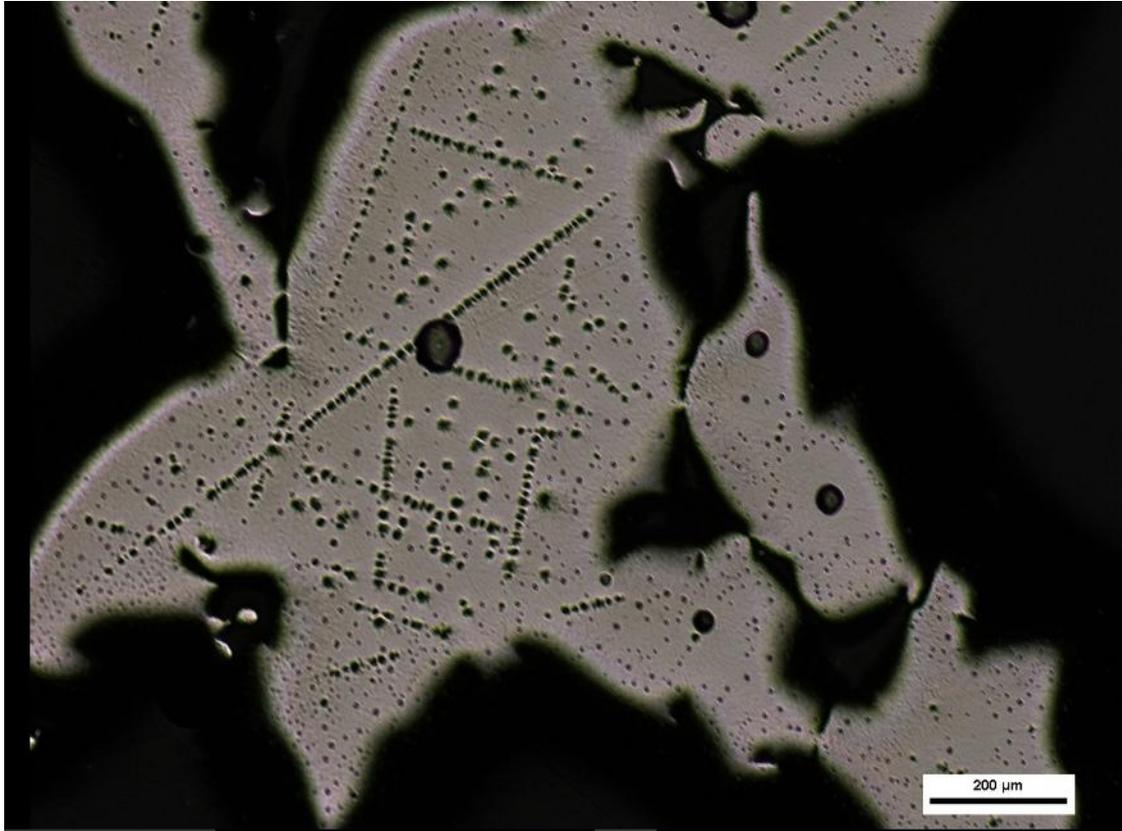


Imagen 65: Cubo 4 a 50 aumentos

➤ Aumento x 200:

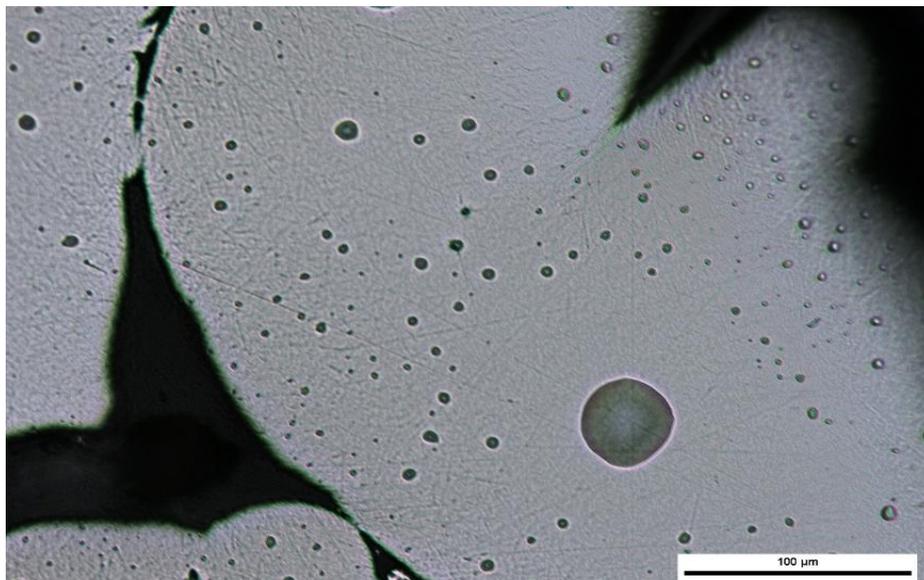


Imagen 66: Cubo 4 a 200 aumentos

-Cubo 7:

➤ Aumento x50:

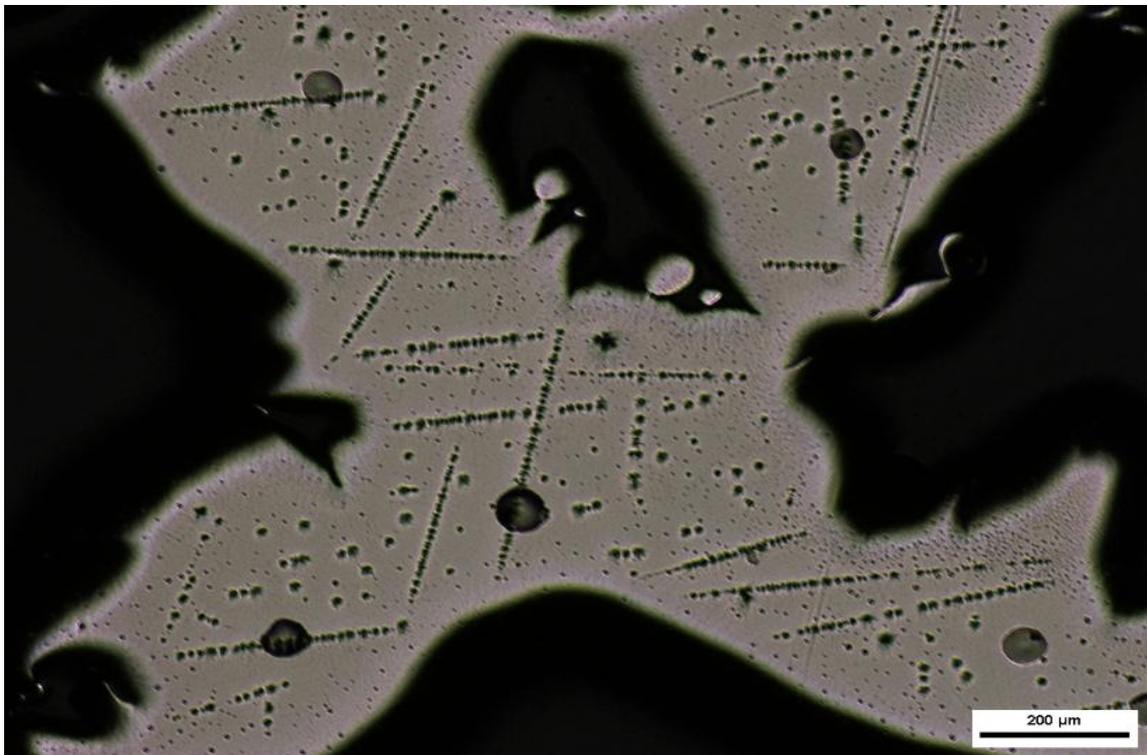


Imagen 67: Cubo 7 a 200 aumentos

-Cubo 8:

➤ Aumento x50:

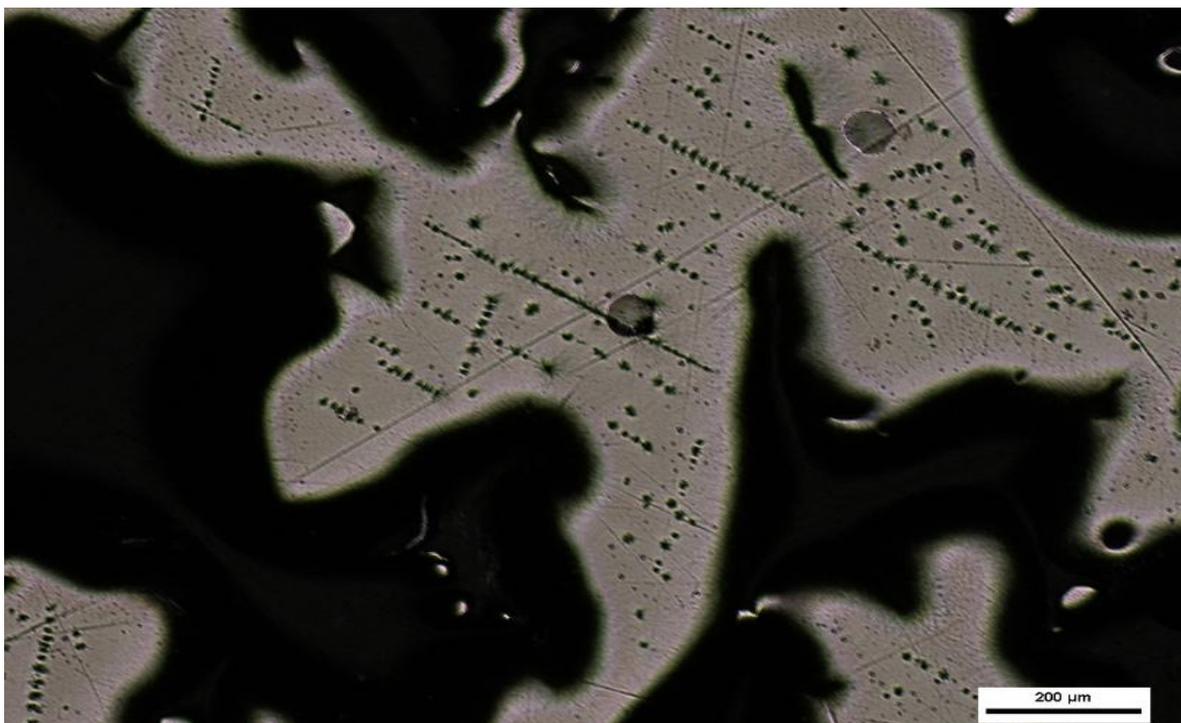


Imagen 68: Cubo 8 a 50 aumentos

Más adelante se detallarán los resultados y conclusiones de manera más explícita, en cambio se debe comentar como se aprecian en las imágenes los diversos poros internos de la estructura.

Dichos poros son concentradores de tensiones, no obstante este fenómeno es común a todos los materiales y es en este caso el nivel bajo de porosidad interna. **De esta manera se puede comentar como este tipo de fabricación aditiva consigue muestras muy densas como se puede apreciar en las imágenes.**

Hay que añadir que se aprecian pequeñas hileras de puntos. Estas hileras son el resultado de la trayectoria del haz de electrones como se explicó en el apartado de procedimiento de fabricación.

De esta manera quedan definidas las características morfológicas de nivel de porosidad, tamaño de poro, espesor de pared así como su composición interna.

Una vez hemos definido las propiedades metalográficas pasaremos a realizar los ensayos de dureza y de compresión que nos determinarán las propiedades mecánicas como Módulo de Elasticidad, Límite elástico, límite de rotura y dureza.

6.4. ENSAYO DE DUREZA.

En este apartado nos centraremos en realizar el ensayo de dureza de nuestras 8 muestras. Con este tipo de ensayo caracterizaremos la dureza del material y veremos si los resultados son los adecuados para su funcionalidad, así como su grado de cumplimiento según la norma ASTMFOR.

Como explicamos en los conceptos teóricos de ensayo vamos a utilizar la dureza vickers como metodología para calcular la dureza de los especímenes.

De esta manera el ensayo consistirá en someter las 8 muestras a una carga en la que produzca una diagonal en el material para poder medirla y así determinar el grado de dureza Vickers mediante la expresión:

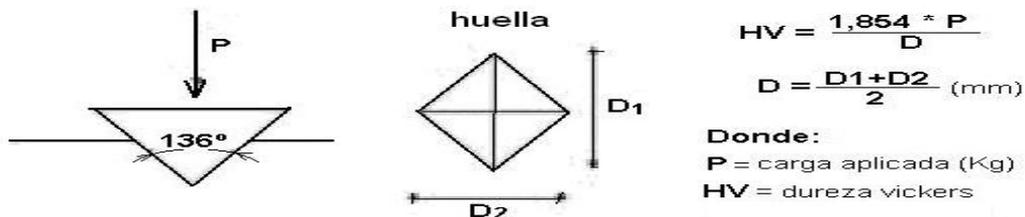


Figura23:Esquema ensayo Vickers

La máquina empleada es la **InnovaTest** y el procedimiento que utiliza es la de aplicar una precarga para poder penetrar hasta la superficie a ensayar para luego aplicar otra carga de 1KgF poder calcular el tamaño de la diagonal y finalmente determinar la dureza Vickers.



Imagen 69:Maquina de ensayo de dureza InnovaTest



Imagen 70:Pantalla máquina de dureza InnovaTest

De esta manera se han ido ensayando cada una de las probetas con una repetitividad de 10 veces por cada una. Finalmente se extraen los datos (Tabla 25,26) que se expondrán en la siguiente tabla para determinar el grado de dureza de cada una de las muestras.

Los resultados de las diagonales son los siguientes:

RESULTADOS DIAGONALES												
Muestra	d1/d2 (μm)	Caga (Kgf)	Media (μm)									
1	70,75	75,75	68,25	67,00	70,75	72,5	70,25	73,00	73,00	68,75	1	70.63
	70.03	72,5	68,25	69,60	69,90	69,93	72,03	70,75	70,75	68,75		
2	72,93	70,75	71,5	71,75	69,75	69,75	69,25	72,5	72,93	69,75	1	71,34
	71,68	72,00	74,88	70,00	69,75	69,75	72,5	70,75	72,93	71,75		
3	72,50	71,00	72,00	69,50	72,00	69,50	73,25	74,50	66,50	66,50	1	71,85
	72,50	73,00	73,75	72,25	75,00	67,00	73,00	72,75	75,24	75,25		
4	71,75	71,15	69,75	72,25	71,25	69,75	71,25	71,25	71,25	71,25	1	70,76
	70,25	70,12	69,75	71,25	69,75	71,25	70,00	71,25	70,50	70,30		
5	72,25	71,15	69,75	69,50	69,50	72,50	73,75	73,75	73,75	71,15	1	70,48
	69,38	70,07	68,00	69,50	69,50	70,75	67,75	67,75	69,75	70,25		
6	72,00	69,75	71,00	70,00	71,00	72,50	70,00	70,00	73,50	72,00	1	70,80
	72,00	69,75	70,50	70,00	72,50	70,00	70,00	68,75	68,75	72,00		
7	70,75	69,75	71,00	70,00	71,00	72,50	70,00	70,00	73,50	72,00	1	70,67
	71,25	69,75	71,00	70,00	72,25	70,00	70,00	68,75	68,00	72,00		
8	73,75	72,25	69,00	72,00	73,75	72,00	75,00	77,85	72,75	72,25	1	72,46
	70,75	72,25	69,75	70,75	73,75	69,00	71,00	77,50	71,50	72,25		

Tabla 25:Resultados Diagonales Vickers

RESULTADOS DUREZA											
Muestra	HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6	HV7	HV8	HV9	HV10	HV
1	313	351,5	398	397,4	374,9	365,6	366,4	358,9	392,3	353,3	367,13
2	354,7	363,9	348,6	346,1	369,1	381,1	381,1	369,1	361,4	370,4	364,55
3	352,7	324,2	357,6	349,1	353,9	343,2	354,5	346,7	342	309,1	343,3
4	367,8	374,3	381,1	360,1	373	373	371,7	365,2	369,1	343,2	367,85
5	369,2	378,4	390,8	383,8	383,8	361,4	370,4	393,7	360,1	343,2	373,48
6	357,6	347,7	370,4	368,4	370,4	303,8	377	365,2	365,2	352,7	357,84
7	385,2	381,1	367,8	378,4	360,1	365,2	378,1	385,2	370,4	357,6	372,91
8	355,2	355,2	385,2	363,9	340,9	373	347,9	307,3	356,4	355,2	354,02

Tabla 26:Resultados Dureza Vickers

6.5 ENSAYO DE DUREZA

Las probetas procedentes de la etapa de corte se sometieron a los ensayos de compresión previstos en el apartado de teoría experimental. Los ensayos de compresión son ampliamente utilizados en el sector metal-mecánico aunque por sus características permiten obtener una menor información respecto a los ensayos de tracción. Sin embargo, en ocasiones la información que suministran puede complementar a otros ensayos en situaciones en las que es difícil o imposible obtener las probetas de tracción necesarias.

Las cargas aplicadas y los desplazamientos fueron registrados mediante ordenador, obteniéndose las características resistentes y compresión de rotura. A partir de estos resultados se analizarán las propiedades mecánicas de las muestras.

Los ensayos se realizaron en una prensa universal de ensayos INSTRON modelo 1343 mostrada en la figura 52, provista de una célula de carga de 50 kN y a una velocidad de cruceta de 1,5 mm/min.

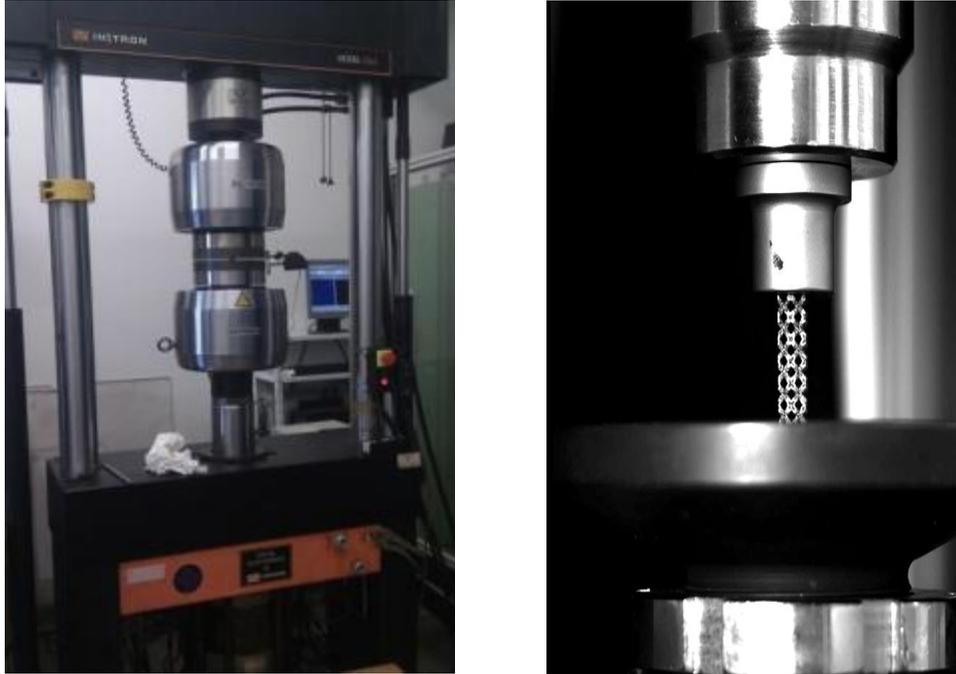


Imagen 71: Prensa universal de ensayos INSTRON modelo 1343

Los resultados que proporcionó la máquina (Tabla 27) de compresión a modo ejemplo son los siguientes:

Nombre	Max.	Max_Fuerza	Max_Tension	Max.
Parametros	5 Puntos	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	_Desplazamiento
Unidad	N/mm2	N	N/mm2	Calc. at Entire Areas
1_1	2547,14	1809,72	19,5350	mm
1_1	1,66315			
Nombre	Max_Deformacion	LE1_Fuerza	LE1_Tension	LE1_Desplazamiento
Parametros	Calc. at Entire Areas	0,2 %	0,2 %	o
Unidad	%	N	N/mm2	0,2 %
1_1	6,95877	1722,91	18,5979	mm
1_1	1,31483			
Nombre	LE1_Deformacion			
Parametros	0,2 %			
Unidad	%			
1_1	5,50140			

Tabla 27: Resultados proporcionados por la prensa ensayo de compresión

Como parámetros a considerar (Tabla 28) importantes son los de Max tensión y Max desplazamiento.

Max_Tension	Max.
Calc. at Entire Areas	_Desplazamiento
N/mm2	Calc. at Entire Areas
19,5350	mm
	1,66315

Tabla 28: Parámetros importantes ensayo de compresión

Con estos datos y en el apartado de resultados podemos caracterizar el límite de elasticidad, límite de rotura así como el módulo de Young .

Además de extraer los resultados la máquina nos proporciona también la gráfica pertinente de ensayos de tracción donde se representa las tensiones-deformaciones.

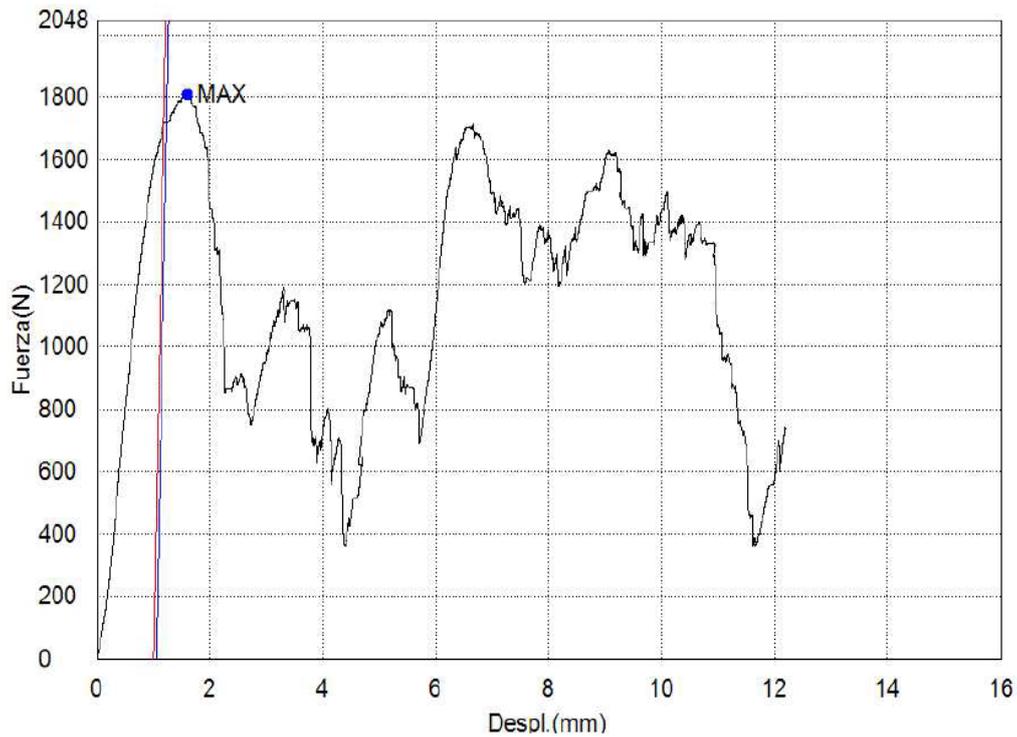


Figura 24: Diagrama de fuerzas desplazamiento

De esta manera se puede ver de manera más explícita las fuerzas necesarias para pasar de la zona elástica donde las deformaciones son proporcionales a las tensiones y la zona plástica después del límite elástico.

De cara a trabajar los datos nos quedaremos hasta la primera bajada después del primer máximo ya que a partir de ese momento la estructura ya había fallado.

De esta manera caracterizamos las muestras y podemos extraer conclusiones suficientes para nuestras probetas echas por fabricación aditiva.

7. RESULTADOS.

El presente apartado reúne los resultados más reseñables de cada uno de los ensayos a los que ha sido sometida la aleación Ti6Al4V Eli procesado bajo las condiciones definidas en la planificación experimental.

Los resultados mostrados corresponden a los resultados procedentes de los ensayos de compresión, dureza y los ensayos metalográficos.

Toda esta información será plasmada mediante datos o gráficas que expongan la información de la forma más clara. A demás se indicarán brevemente los cálculos implicados en la obtención de dichos datos o gráficas para una mayor comprensión de los mismo y su reproducibilidad.

7.1. RESULTADOS ENSAYOS METALGRÁFICOS:

Para la consecución de los resultado del ensayo metalográfico se han analizado todas las muestras a través de una lupa y un microscópio optico como se ha comentado en el apartado experimental.

Los resultados nos demuestran el tipo de estructura interna que tienen las mestras procesadas por EBM. De esa manera pretendemos comprobar que el resultado del proceso de fabricación se obtienen muestras densas si grandes porosidades internas.

Parra la muestra 1 observada con lupa:

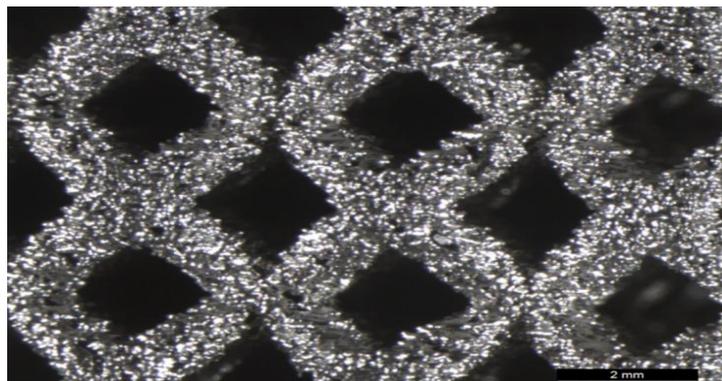


Imagen 72: Muestra 1 con lupa

Vemos que la estructura tiene una rugosidad superficial que a su vez se utiliza para el injerto de tejidos orgánicos.

La diagonal del poro se puede regular a distintos tamaños siempre y cuando se alcance el límite máximo de fabricación.

De esta manera podemos concluir que la fabricación aditiva por EBM mediante polvos de Titanio tiene la capacidad de reproducir geometrías de varias dimensiones y de un acabado superficial rugoso ideal para el injerto orgánico.

A continuación, la misma muestra será observada por un microscopio óptico (Imagen 73). El objetivo de esto es determinar si las muestras tienen una estructura compacta sin grandes porosidades que puedan producir fracturas a bajas cargas.

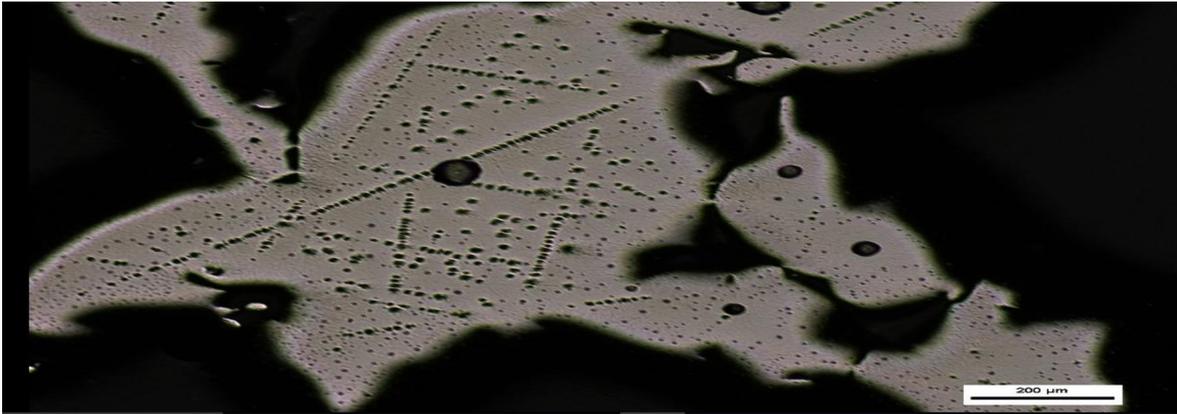


Imagen 73: Muestra 1 a microscopio óptico

Como se aprecia en la imagen 74, se consiguen estructuras de una gran densidad interna. Esto es de gran importancia ya que en el proceso de fabricación de estas muestras mediante aleaciones de titanio parten de polvos metálicos.

Se puede comprobar como durante el proceso de fabricación se consigue fundir los polvos creando estructuras densas y compactas.

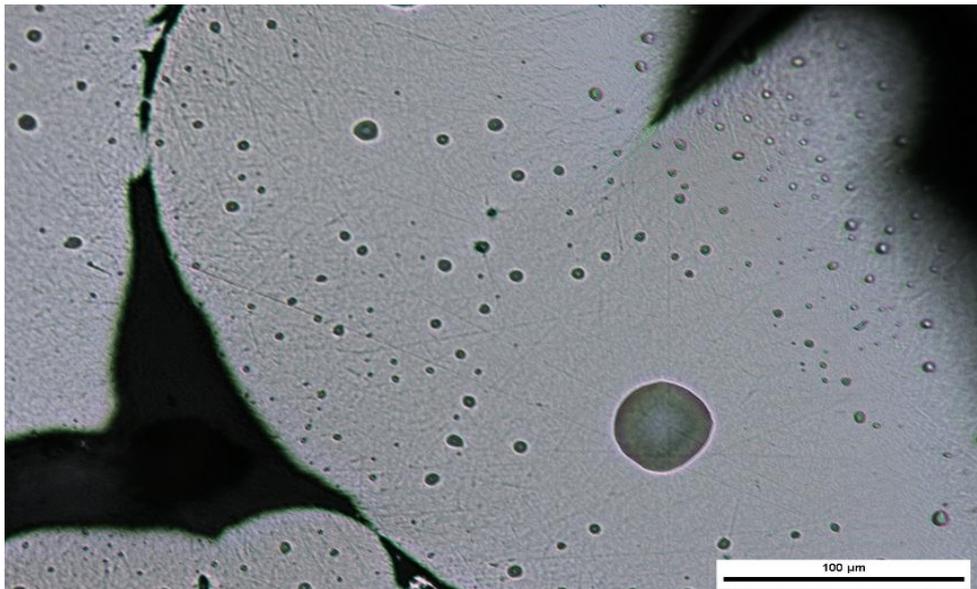


Imagen 74: Ejemplo de estructura densa procesada por EBM

7.2. RESULTADOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN:

Para la realización de los ensayos de compresión se prepararon ocho probetas por cada cubo obteniendo sus gráficos correspondientes de tensión-deformación .

Se han tratado los datos obtenidos de los ensayos de compresión, de forma que se obtengan gráficos por cada ensayo y se han calculado los valores medios del módulo de Young, Límite Elástico y Máximo Desplazamiento por cada probeta.

En las siguientes gráficas y tablas (Tabla 29) podemos observar la tendencia (Figura 25) para los desplazamientos, límites elásticos y rigidez en función de la muestra ensayada:

DIMENSIONES-DESPLAZAMIENTO		
MUESTRA	DIAGONAL DEL PORO (μm)	MAX. DEPLAZAMIENTO (mm)
1	1864 \pm 41	1,66315
2	1727 \pm 66	1,28233
3	1371 \pm 50	1,30067
4	1191 \pm 120	1,19533
5	1372 \pm 92	0,631869
6	914 \pm 80	0,96383
7	810 \pm 73	0,762
8	520 \pm 79	1,00385

Tabla 29: Máximo desplazamiento para las muestras ensayadas a compresión

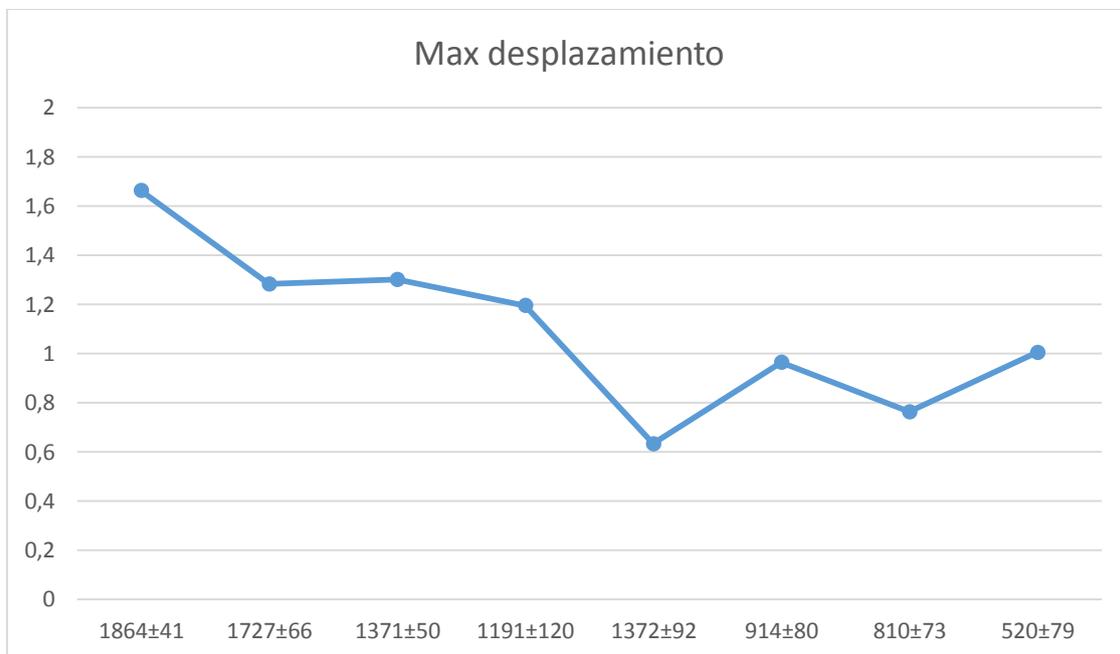


Figura 25: gráfica desplazamientos para cada muestra

DIMENSIONES-LÍMITE ELÁSTICO		
MUESTRA	DIAGONAL DEL PORO	LÍMITE ELÁSTICO
1	1864±41	19,535
2	1727±66	27,4638
3	1371±50	24,7941
4	1191±120	32,9987
5	1372±92	17,1364
6	914±80	71,7291
7	810±73	61,1125
8	520±79	135,425

Tabla 30:Límite elástico para las muestras ensayadas a compresión

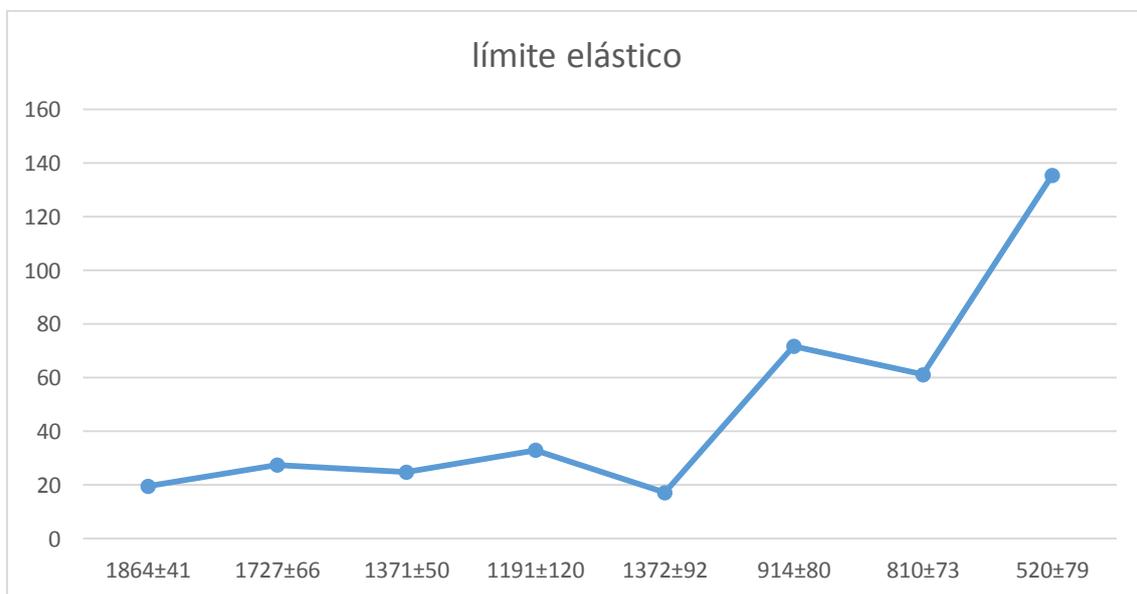


Figura 26:Gráfica Límite elástico para cada muestra

Con los resultados de Límite Elástico y Máximo Desplazamiento se han calculado su rigidez (Módulo de Young) a través de una expresión matemática. Normalmente las rigideces se calculan como la razón entre una fuerza aplicada y el desplazamiento obtenido por la aplicación de esa fuerza.

En nuestro caso se ha relacionado la fuerza máxima de cada muestra por cada desplazamiento máximo obtenido con la siguiente expresión:

$$K_i = \frac{F_i}{\delta_i}$$

Esta relación entre el límite elástico con el desplazamiento máximo de las muestras se le conoce como el módulo de young o lo que es lo mismo su rigidez. Propiedad mecánica elemental para caracterizar nuestros cubos fabricados por EBM.

Por lo tanto los resultados de la rigidez de cada muestra en función de sus dimensiones (Tabla 31) son los siguientes:

DIMENSIONES-RIGIDEZ		
MUESTRA	DIAGONAL DEL PORO	RIGIDEZ
1	1864±41	11,745
2	1727±66	21,417
3	1371±50	19,062
4	1191±120	27,606
5	1372±92	27,12
6	914±80	74,42
7	810±73	80,2
8	520±79	134,9

Tabla 31: Rigidez para las muestras ensayadas a compresión

La tendencia (Figura 27) que sigue la rigidez de las muestras es la siguiente:

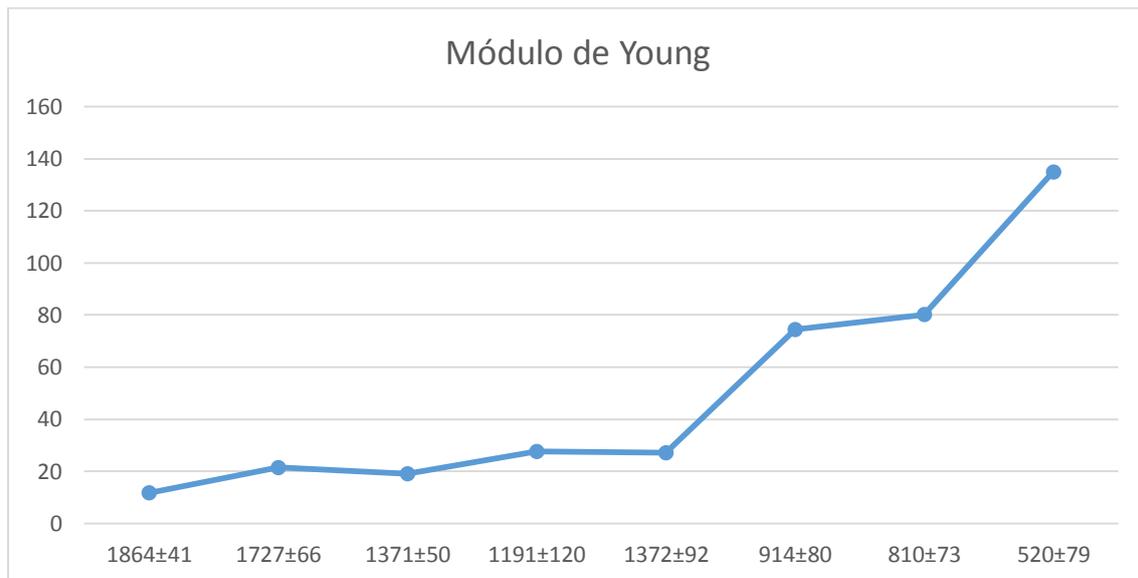


Figura 27: Gráfica Módulo de Young para cada muestra

Como podemos analizar, cuanto menor es el tamaño de la muestra mayor es su rigidez. Por lo tanto, se puede regular la rigidez del material según el tamaño generado en el proceso de fabricación.

Esta conclusión es de gran interés puesto que somos capaces de obtener estructuras con baja densidad y con la rigidez que deseamos. Es por ese motivo por el cual se utiliza la fabricación aditiva para componentes protésicos o “scaffoldings”, ya que podemos regular la rigidez de la muestra de forma voluntaria.

Como resumen, los resultados obtenidos en el ensayo de compresión son los siguientes:

RESULTADOS ENSAYO DE COMPRESIÓN			
MUESTRA	LÍMITE ELÁSTICO	MAX DESPLAZAMIENTO	MÓDULO DE YOUNG
1	19,535	1,66315	11,745
2	27,4638	1,28233	21,417
3	24,7941	1,30067	19,062
4	32,9987	1,19533	27,606
5	17,1364	0,631869	27,12
6	71,7291	0,96383	74,42
7	61,1125	0,762	80,2
8	135,425	1,00385	134,9

Tabla 31: Cuadro resumen de las muestras ensayadas a compresión

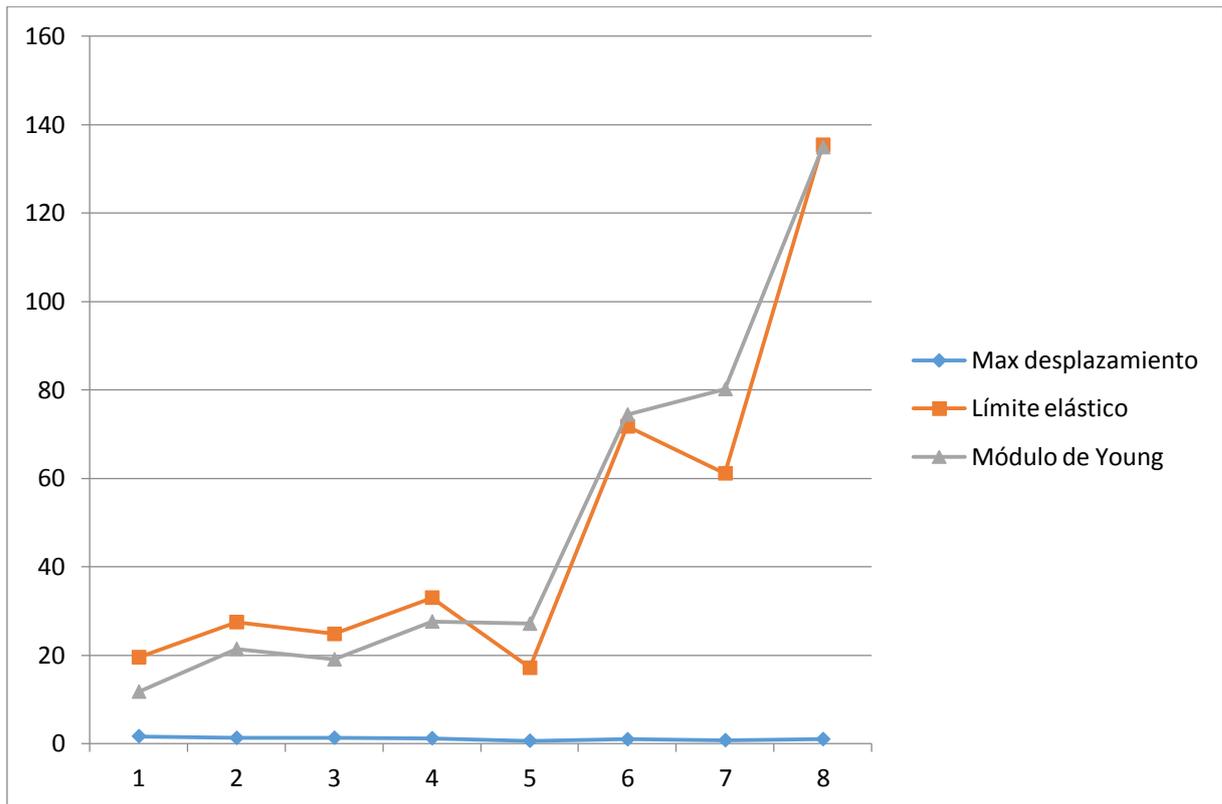


Figura 28: Resumen gráficas para cada muestra

7.3. RESULTADOS ENSAYOS DE DUREZA

Referente al ensayo de dureza fueron analizadas 8 muestras cada una de un tamaño diametro de poro distinto.

Se hicieron 10 tomas de datos por cada muestra y se extrajeron el tamaño de las diagonales (Tabla 26) para luego calcular la dureza Vickers. Con estos resultados se pueden caracterizar las propiedades mecánicas de nuestro material con respecto a su dureza.

Los resultados fueron los siguientes:

RESULTADOS DUREZA											
Muestra	HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6	HV7	HV8	HV9	HV10	HV
1	313	351,5	398	397,4	374,9	365,6	366,4	358,9	392,3	353,3	367,13
2	354,7	363,9	348,6	346,1	369,1	381,1	381,1	369,1	361,4	370,4	364,55
3	352,7	324,2	357,6	349,1	353,9	343,2	354,5	346,7	342	309,1	343,3
4	367,8	374,3	381,1	360,1	373	373	371,7	365,2	369,1	343,2	367,85
5	369,2	378,4	390,8	383,8	383,8	361,4	370,4	393,7	360,1	343,2	373,48
6	357,6	347,7	370,4	368,4	370,4	303,8	377	365,2	365,2	352,7	357,84
7	385,2	381,1	367,8	378,4	360,1	365,2	378,1	385,2	370,4	357,6	372,91
8	355,2	355,2	385,2	363,9	340,9	373	347,9	307,3	356,4	355,2	354,02

Como conclusión a llegar después de observar los resultados, es que conseguimos muestras realizadas por fabricación aditiva con una dureza media de 362,64 HV.

La dureza propia del Ti6Al 4V está entorno a 352,95 HV.

	CPTi T1 *	CPTi T2	CPTi T3	Ti-6Al-4V T1 *
Tensile strength	486.10	501.16	498.14	961.33
Standard deviation	(58.87)	(26.74)	(61.01)	(11.96)
Vickers hardness (VHN)	198.06	197.85	202.58	352.95
Standard deviation	(19.23)	(21.85)	(29.12)	(17.58)

* Control groups

Tabla 32: Dureza para el Ti6Al 4V comercial

Lo que se deduce que las muestras procesadas por EBM consiguen una dureza similar a la propia del material.

No hay una pérdida considerable de la dureza de las muestras comparada con la del propio material. Por lo tanto la propiedad mecánica de la dureza no se ve afectada por el proceso de fabricación.

En modo resumen y observando las conclusiones vistas en este apartado de nuestro trabajo de fin de grado, se puede concluir que se obtienen muestras compactas y densas cuya rigidez se puede regular modificando el tamaño del poro y con unas buenas propiedades mecánicas.

8. CONCLUSIONES

En este apartado se recogen las conclusiones más destacables de nuestro TFG “desarrollo de estructuras porosas de aleaciones de titanio mediante técnicas de fabricación aditivas” a partir de los ensayos realizados:

- La fabricación aditiva por EBM mediante polvos de Titanio tiene la capacidad de reproducir geometrías de varios tamaños de poros.
- La tecnología aditiva por EBM tiene la capacidad de reproducir geometrías de varias dimensiones y de un acabado superficial rugoso ideal para el injerto orgánico.
- Observando las imágenes a lupa se demuestra que este tipo de tecnología tiene la capacidad de crear geometrías imposibles para los procesos convencionales.
- Se puede comprobar como durante el proceso de fabricación se consigue fundir las partículas de polvo creando estructuras densas, ligeras y compactas.
- Debido a la densidad generada en el proceso de fabricación, las muestras tienen buenas propiedades mecánicas como rigidez y dureza.
- Se puede regular la rigidez del material variando el tamaño del poro generado en el proceso de fabricación.
- No hay una pérdida considerable de la dureza de las muestras comparada con la del propio material. Por lo tanto la propiedad mecánica de la dureza no se ve afectada por el proceso de fabricación.

9. ANEJOS

9.1. ANEJO 1: IMÁGENES LUPA

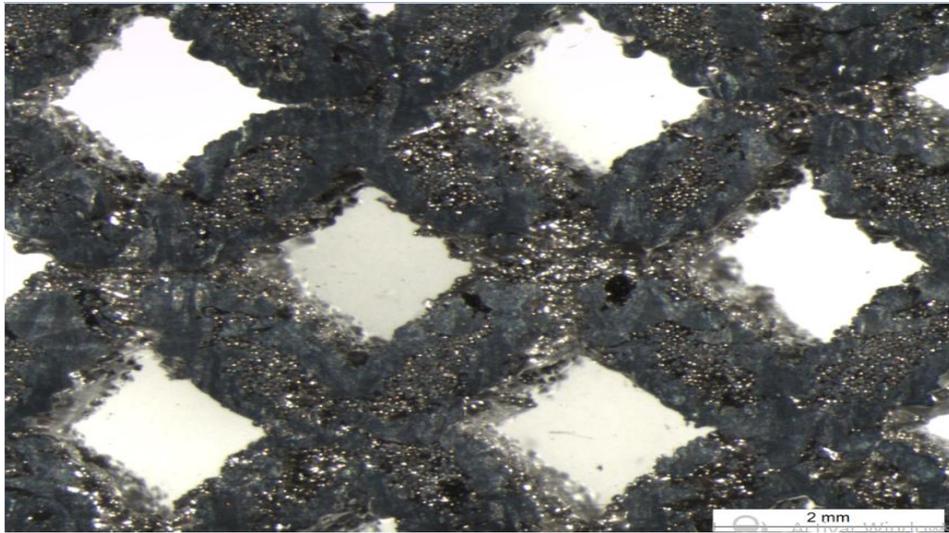


Imagen 75: Muestra 1 a 16 aumentos

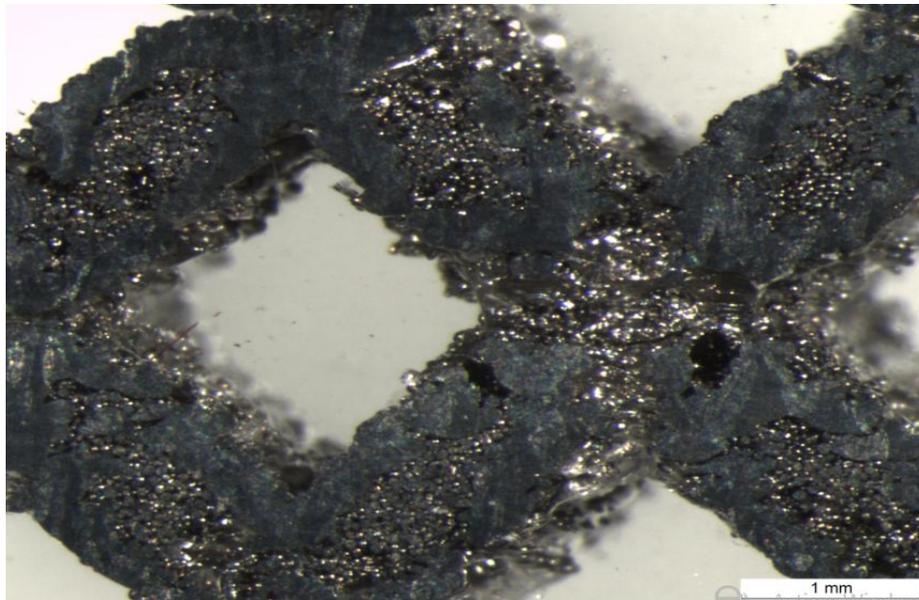


Imagen 76: Muestra 1 a 20 aumentos

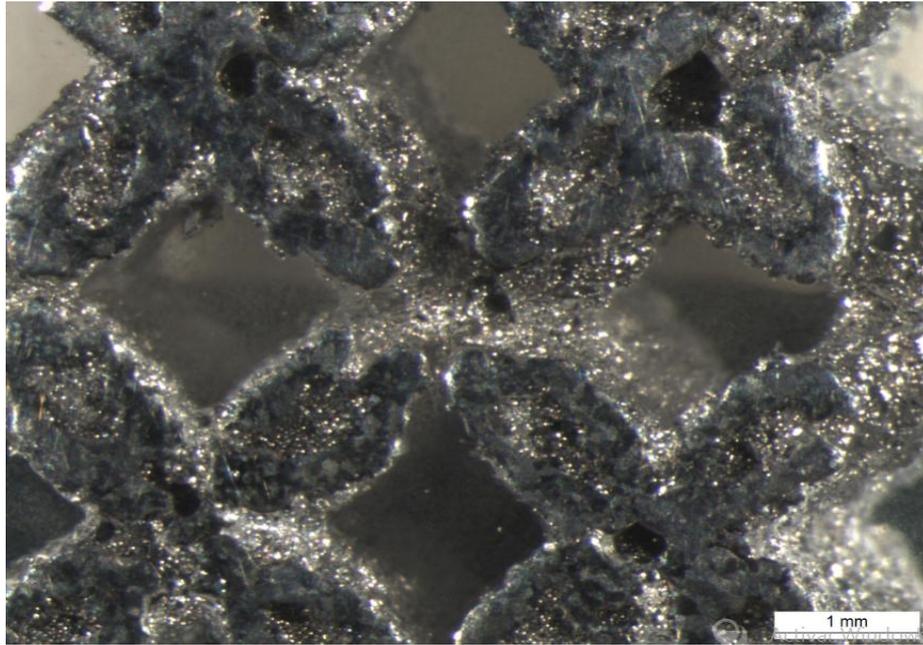


Imagen 77:Muestra 2 a 16 aumentos

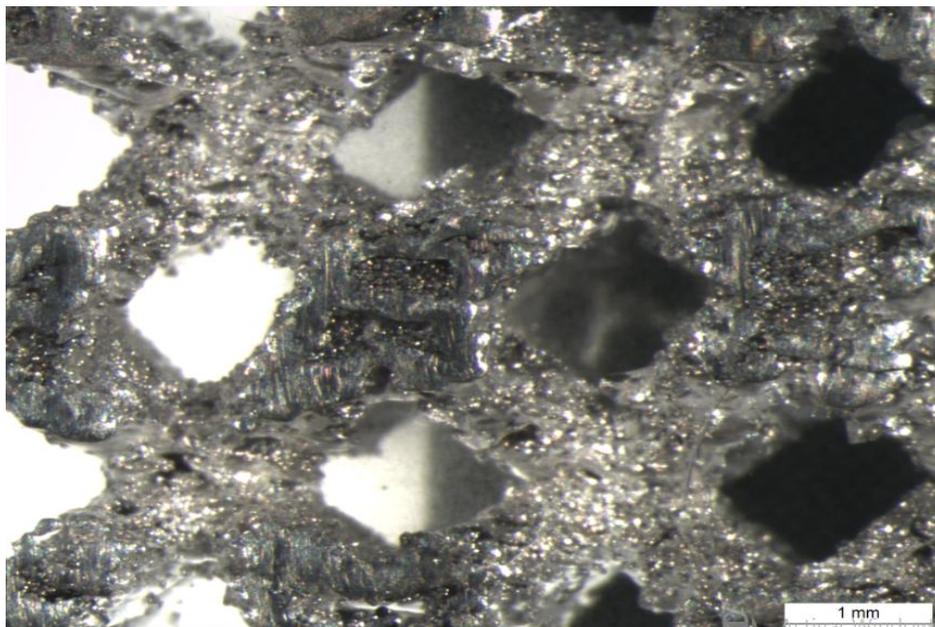


Imagen 78:Muestra 3 a 16 aumentos

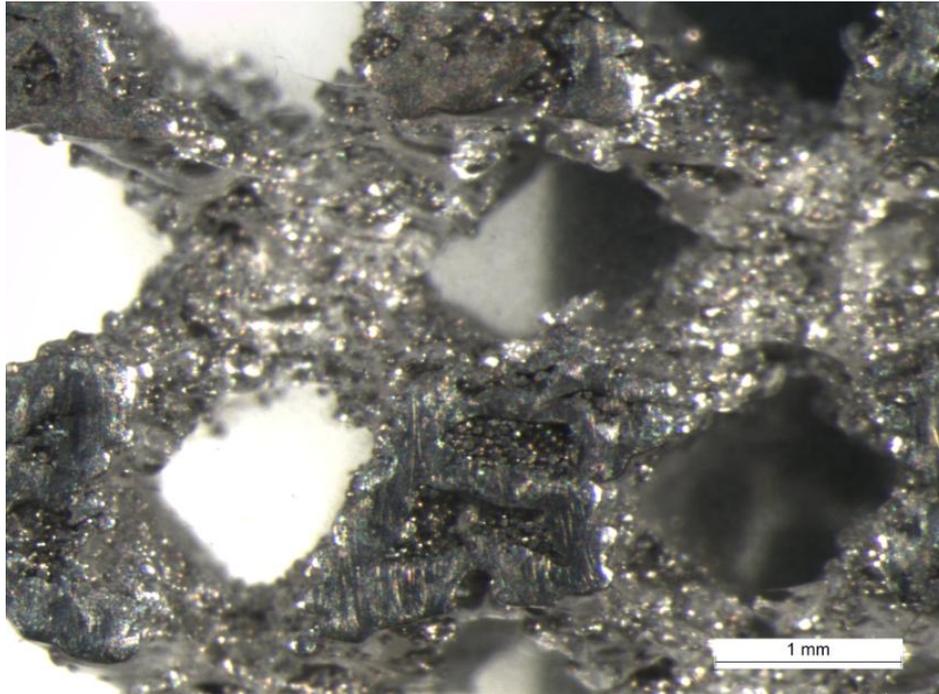


Imagen 79: Muestra 3 a 20 aumentos

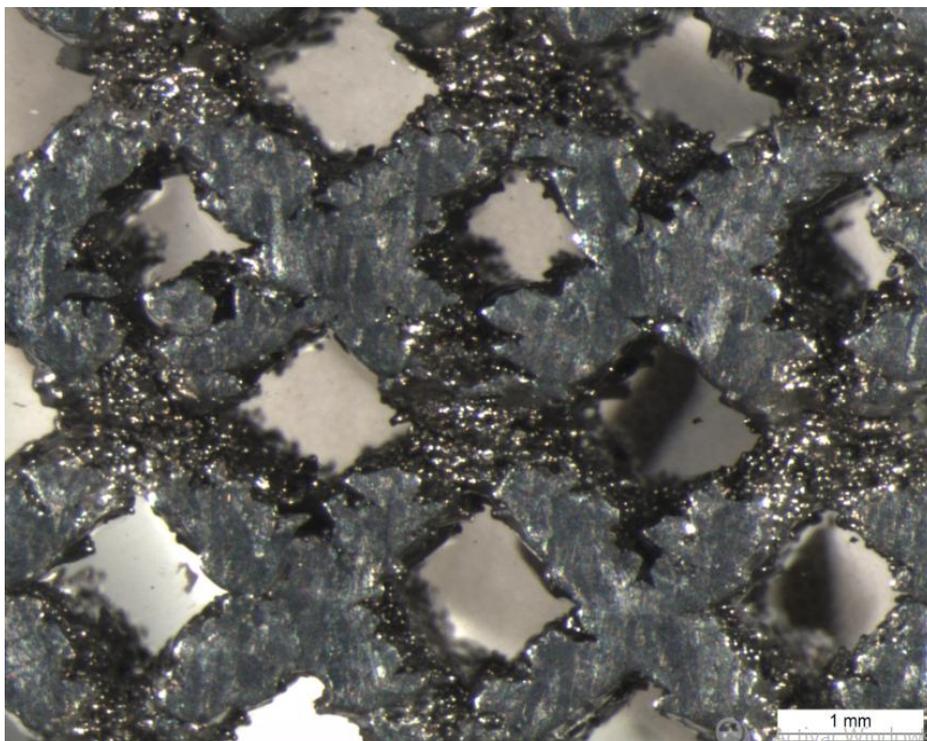


Imagen 80: Muestra 4 a 16 aumentos

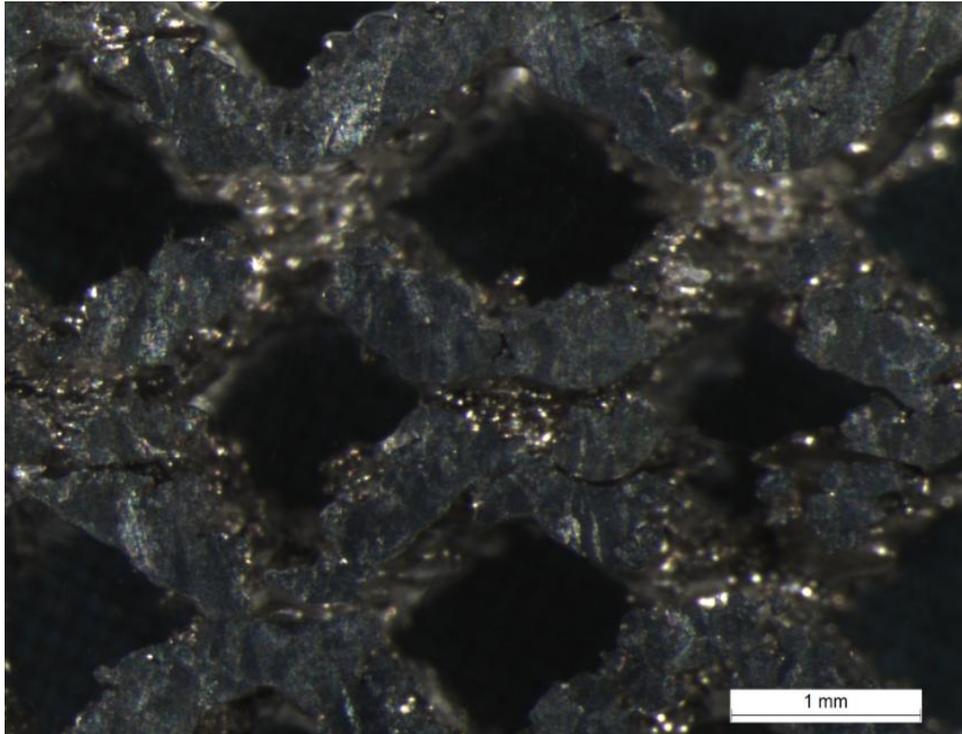


Imagen 81:Muestra 5 a 20 aumentos

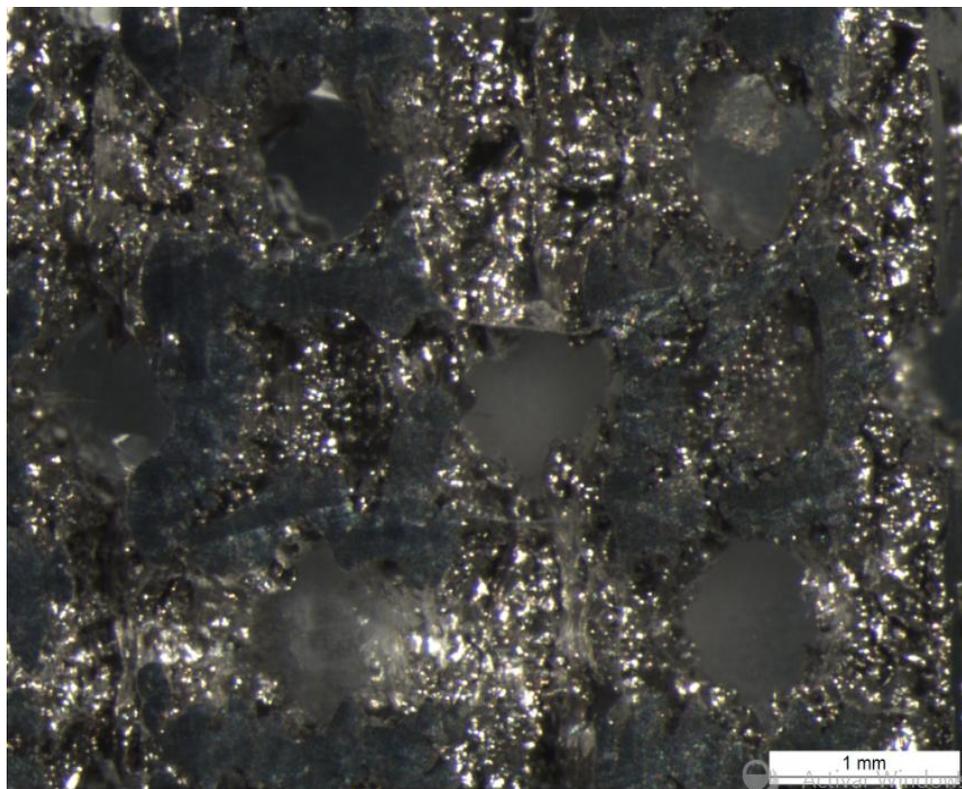


Imagen 82:Muestra 6 a 20 aumentos

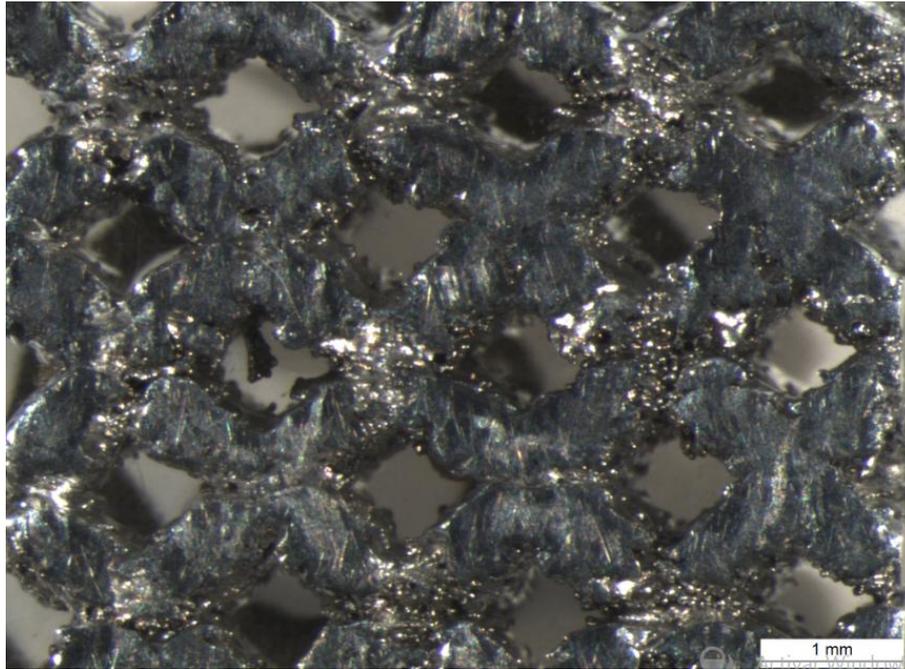


Imagen 83:Muestra 7 a 16 aumentos

9.2. ANEJO 2 :IMÁGENES MICROSCÓPIO ÓPTICO

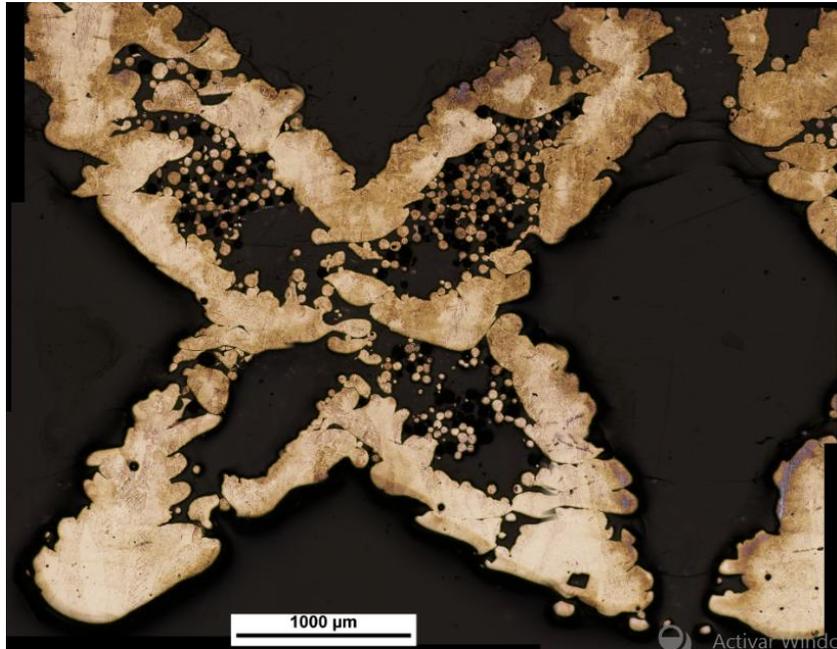


Imagen 84:Muestra 1 a 50 aumentos

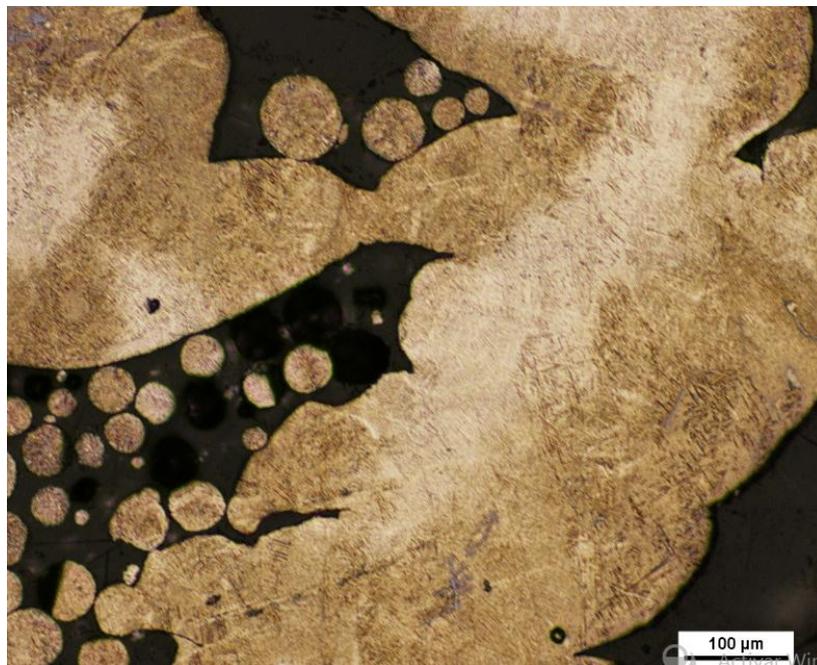


Imagen 85: Muestra 1 a 100 aumentos

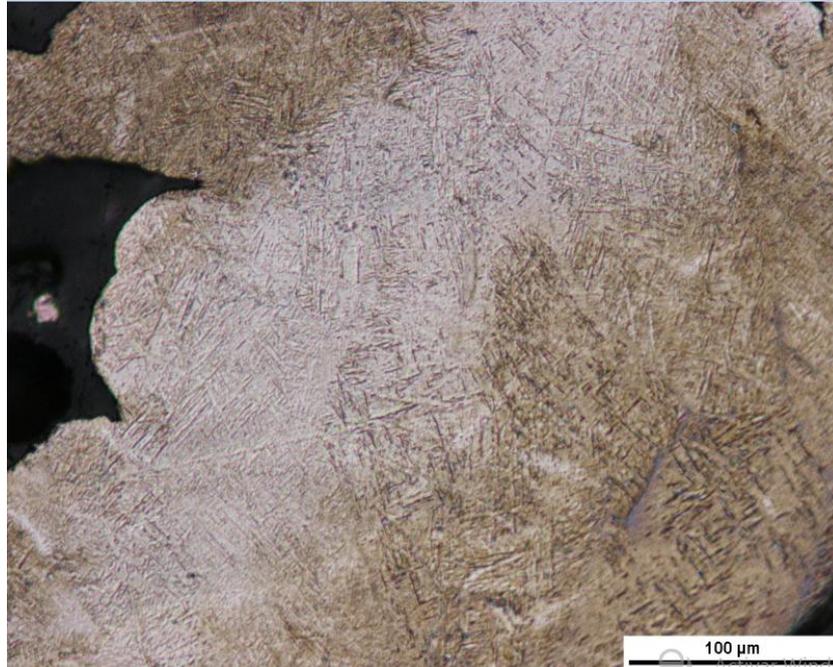


Imagen 86:Muestra 1 a 200 aumentos

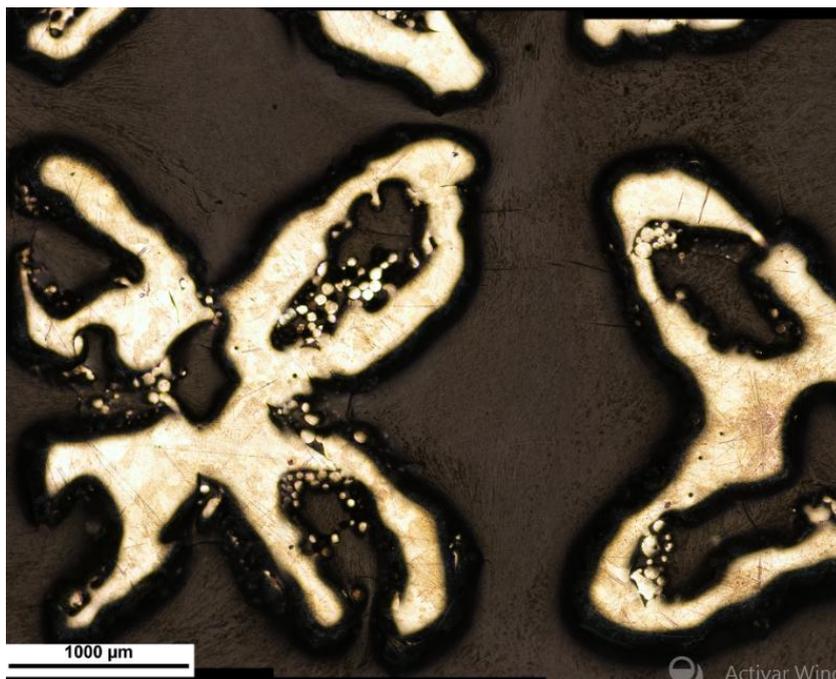


Imagen 87:Muestra 2 a 50 aumentos

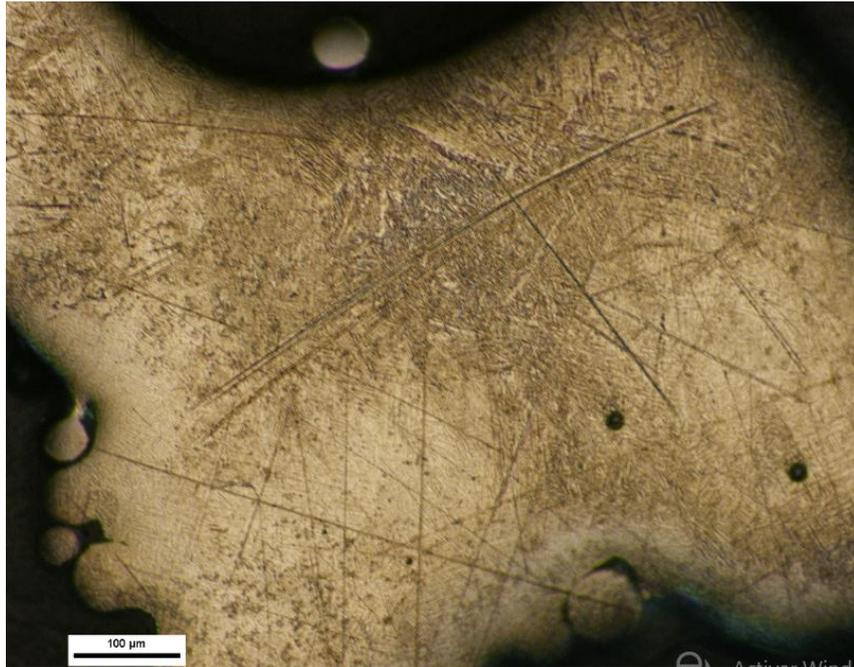


Imagen 88:Muestra 2 a 100 aumentos

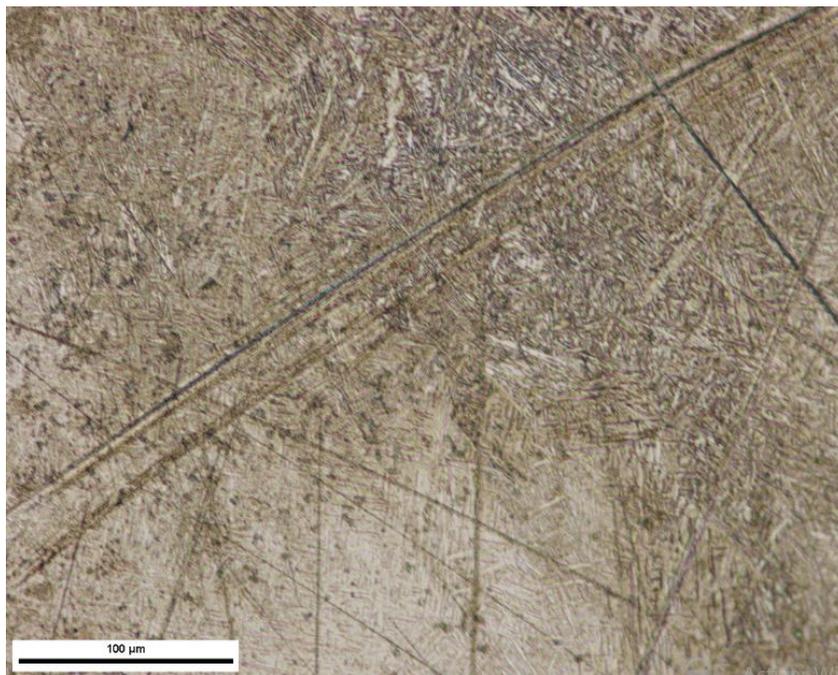


Imagen 89:Muestra 2 a 200 aumentos



Imagen 90: Muestra 3 a 50 aumentos



Imagen 91: Muestra 3 a 100 aumentos

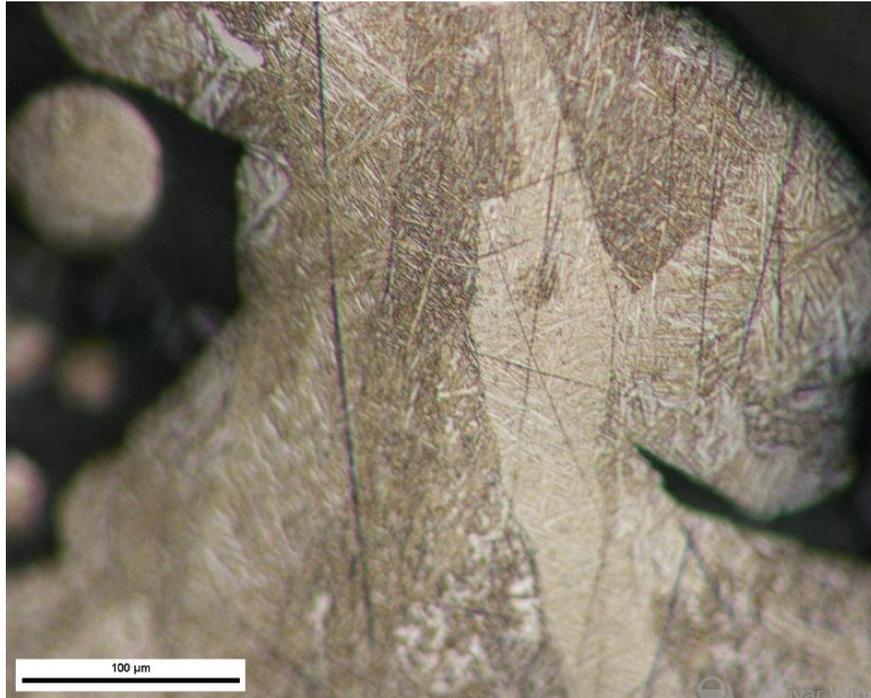


Imagen 92:Muestra 3 a 200 aumentos

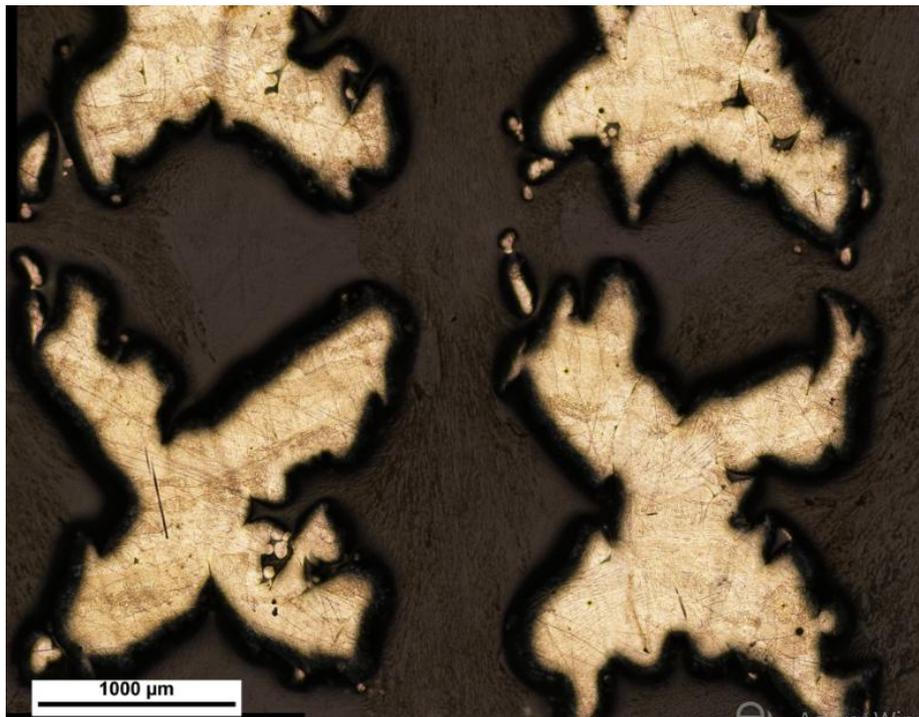


Imagen 93:Muestra 4 a 50 aumentos

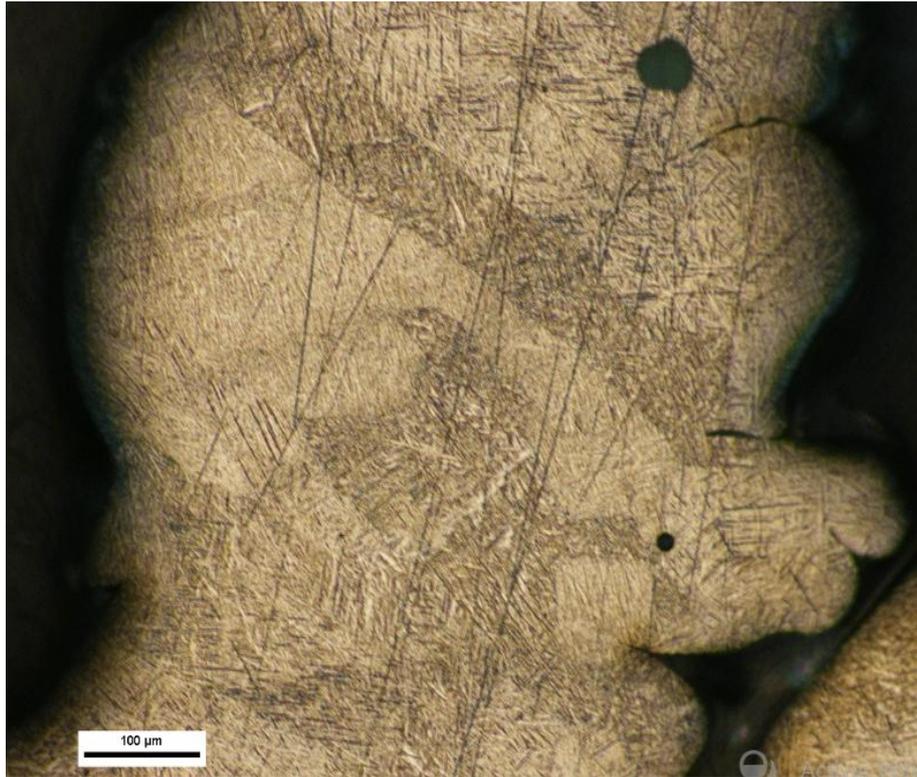


Imagen 94:Muestra 4 a 100 aumentos

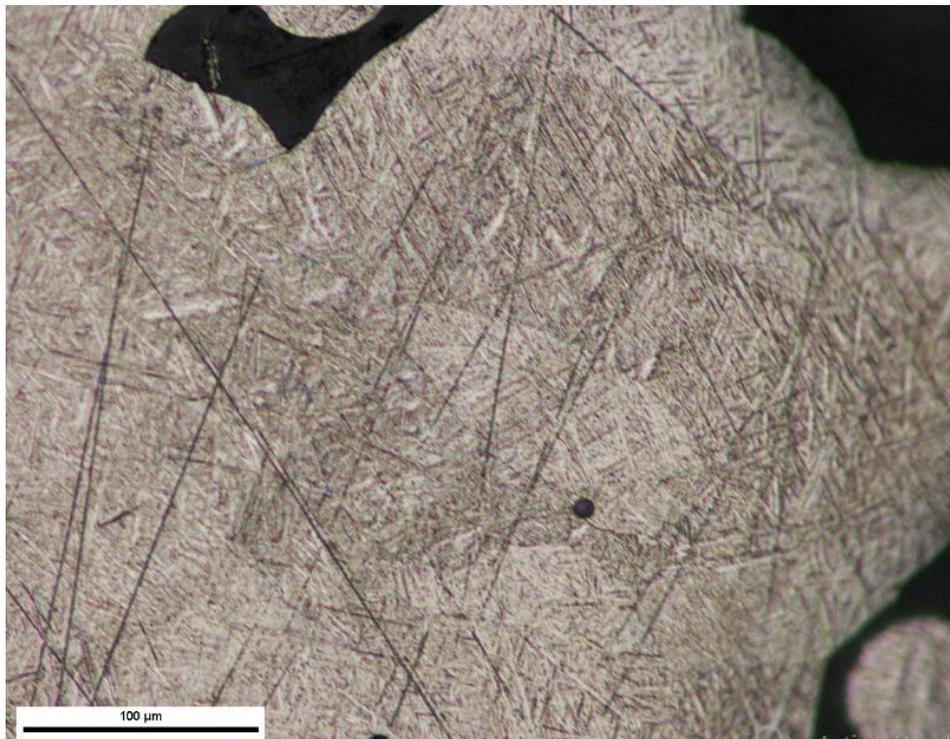


Imagen 95:Muestra 4 a 200 aumentos

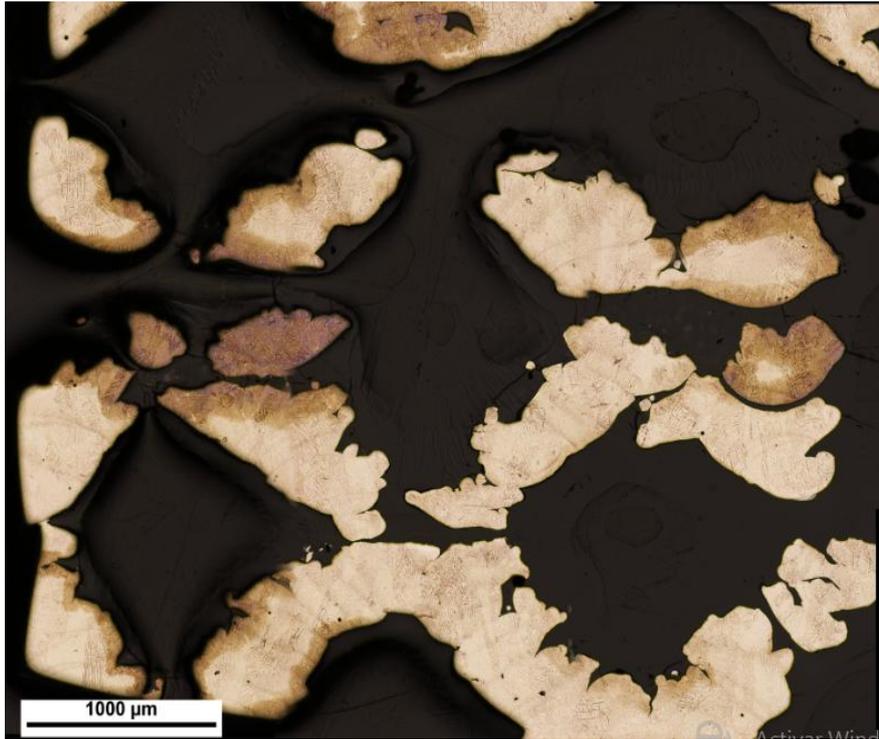


Imagen 96:Muestra 5 a 50 aumentos

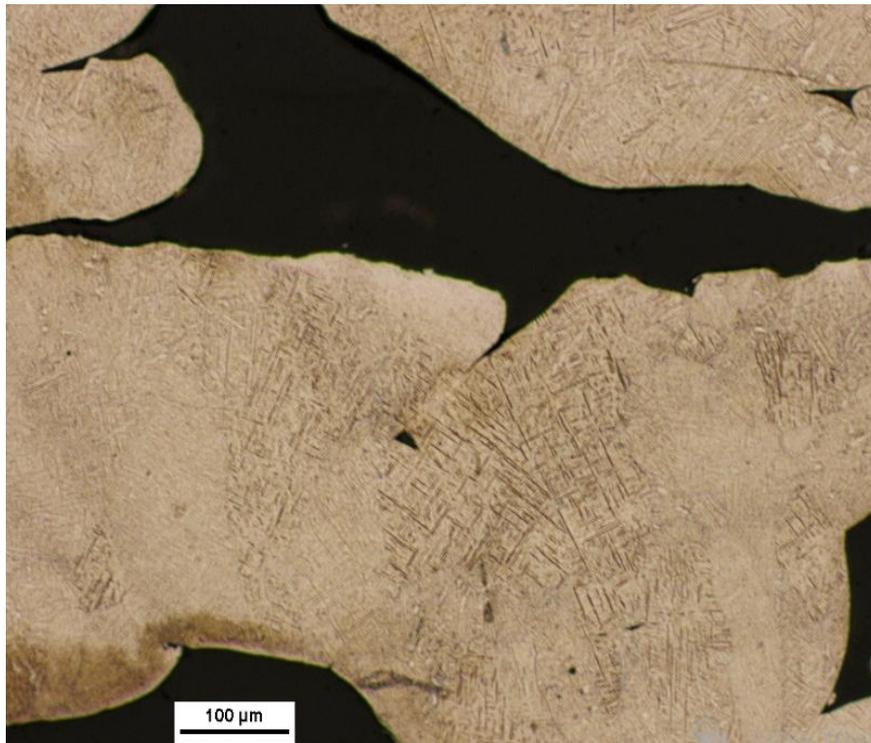


Imagen 97:Muestra 5 a 100 aumentos

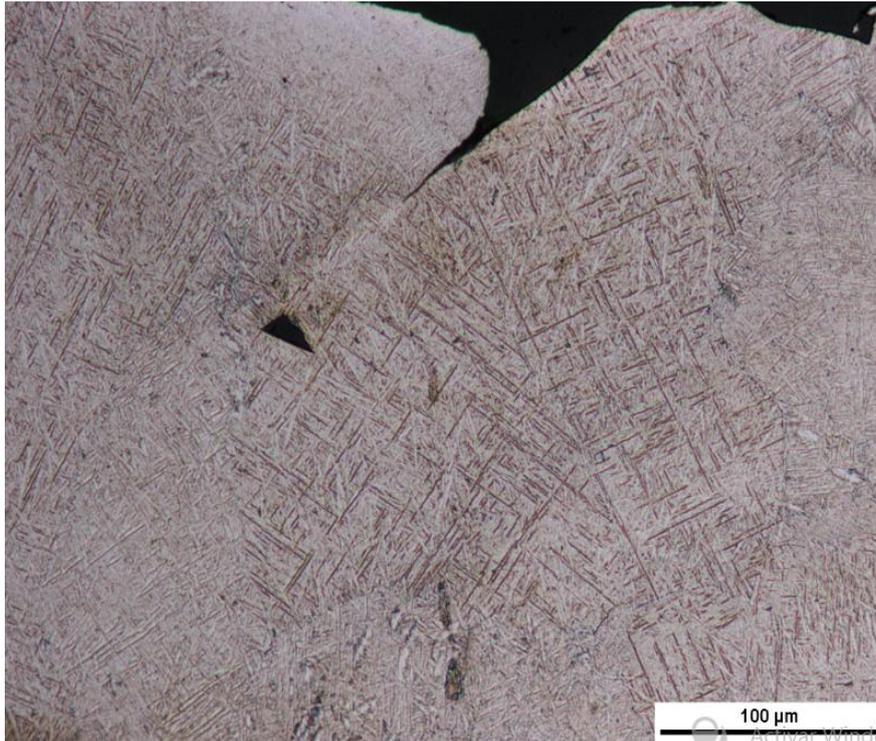


Imagen 98:Muestra 5 a 200 aumentos



Imagen 99:Muestra 6 a 50 aumentos



Imagen 100:Muestra 6 a 100 aumentos

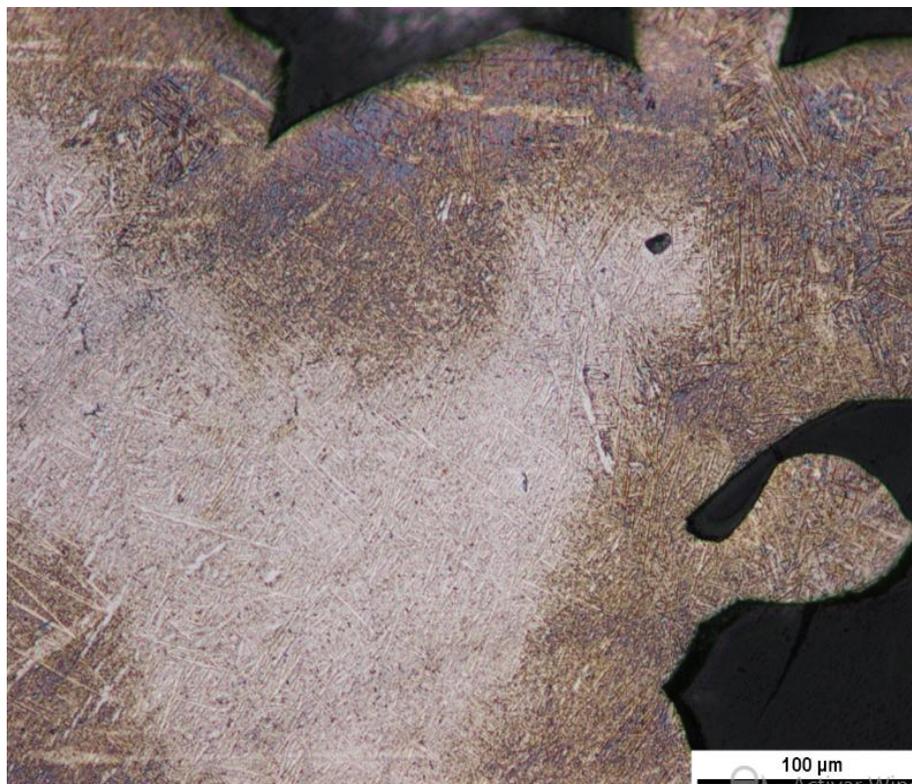


Imagen 101:Muestra 6 a 200 aumentos

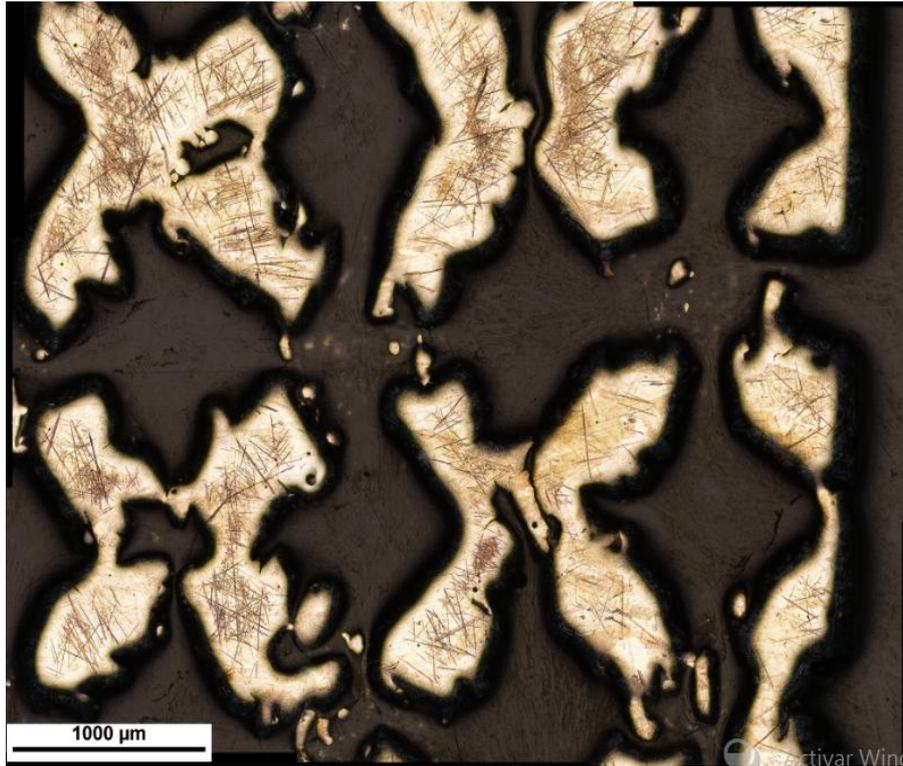


Imagen 102: Muestra 7 a 50 aumentos

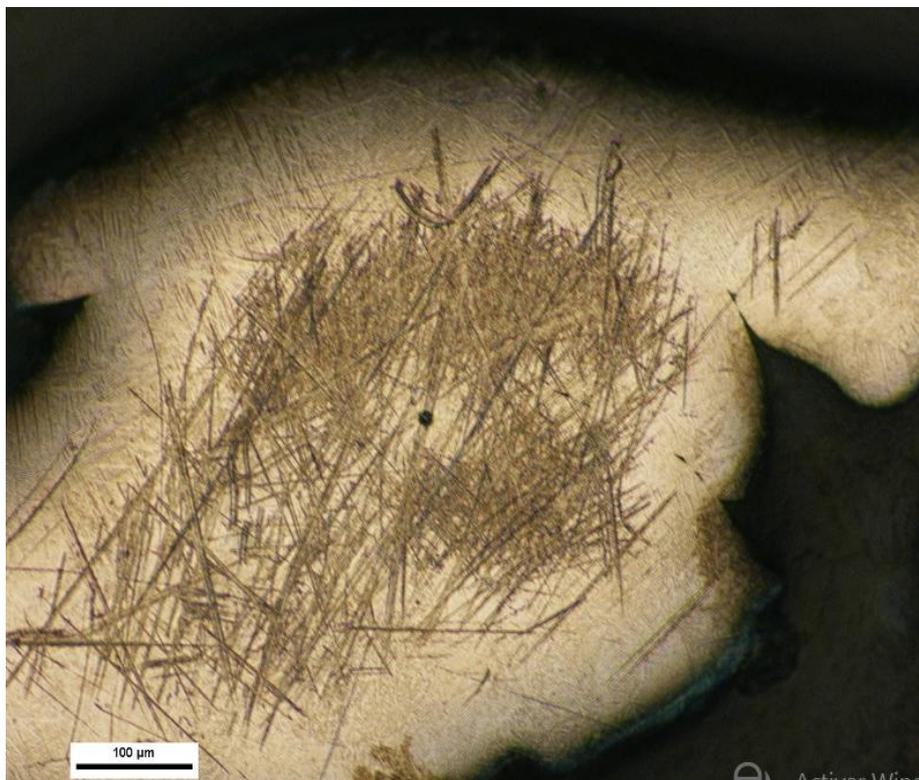


Imagen 103: Muestra 7 a 100 aumentos

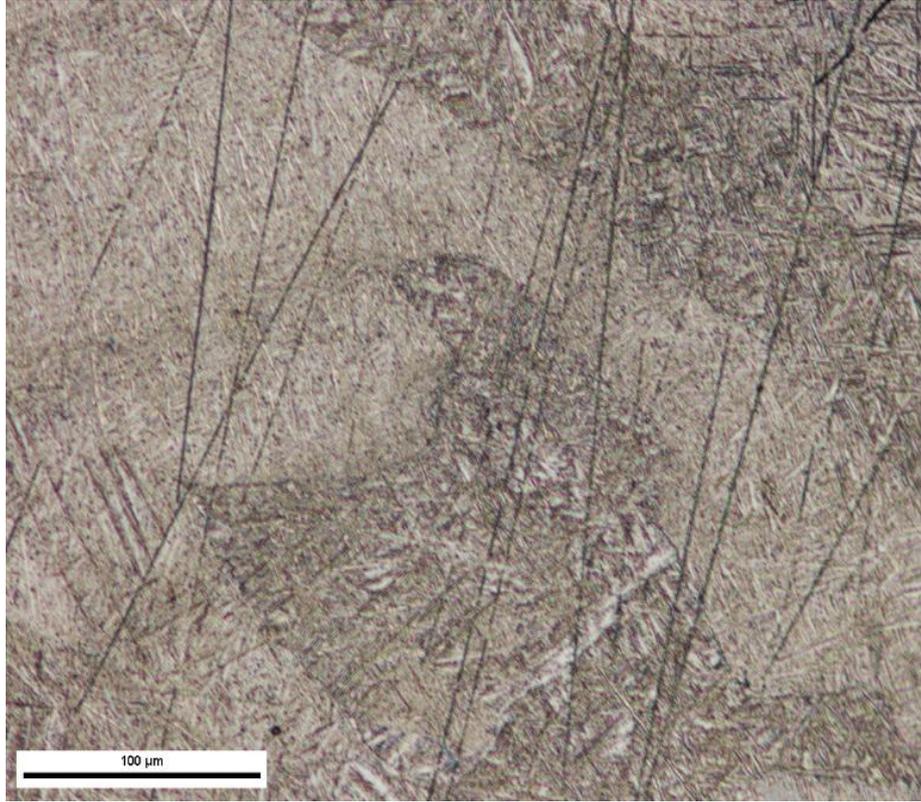


Imagen 104: Muestra 7 a 200 aumentos

9.3. ANEJO 3:GRÁFICAS ENSAYO DE COMPRESIÓN.

Palabra llave	Nombre de producto		
Nombre de archivo de ensayo	Porosas01_20160527_095 4.xtak	Nombre de metodo de ensayo	Porosas.xmak
Fecha de informe	27/05/2016	Fecha de ensayo	27/05/2016
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Compresion
Velocidad	1mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	1

Nombre Parametros	Max. 5 Puntos	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas	Max_Tension Calc. at Entire Areas	Max. Desplazamiento Calc. at Entire Areas
Unidad	N/mm2	N	N/mm2	mm
1_1	2547,14	1809,72	19,5350	1,66315

Nombre Parametros	Max_Deformacion Calc. at Entire Areas	LE1_Fuerza	LE1_Tension	LE1_Desplazamiento
Unidad	%	N	N/mm2	mm
1_1	6,95877	1722,91	18,5979	1,31483

Nombre Parametros	LE1_Deformacion
Unidad	%
1_1	5,50140

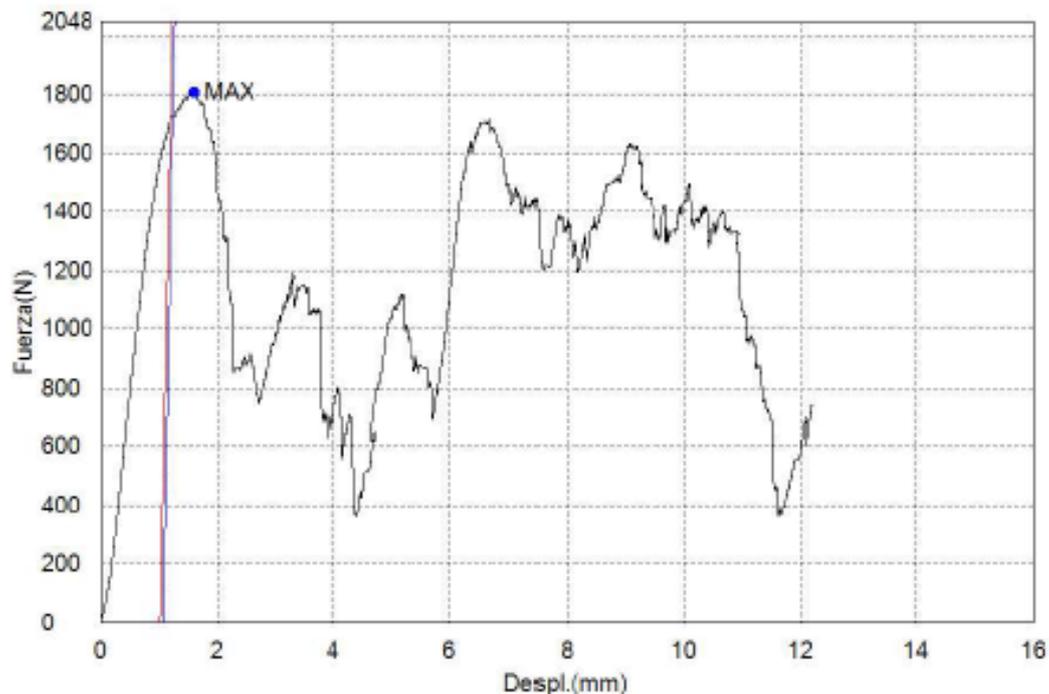


Figura 29:Gráficos fuerza desplazamiento ensayo de compresión muestra 1.

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Porosas02_20160527_101 1.xtak	Nombre de metodo de ensayo	Porosas.xmak
Fecha de informe	27/05/2016	Fecha de ensayo	27/05/2016
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Compresion
Velocidad	1mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	1

Nombre	Max.	Max_Fuerza	Max_Tension	Max._Desplazamiento
Parametros	5 Puntos	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	N/mm2	N	N/mm2	mm
1_1	1847,58	1241,64	27,4638	1,28233

Nombre	Max_Deformacion	LE1_Fuerza	LE1_Tension	LE1_Desplazamient o
Parametros	Calc. at Entire Areas	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unidad	%	N	N/mm2	mm
1_1	12,1548	736,602	16,2929	0,43900

Nombre	LE1_Deformacion
Parametros	0,2 %
Unidad	%
1_1	4,16114

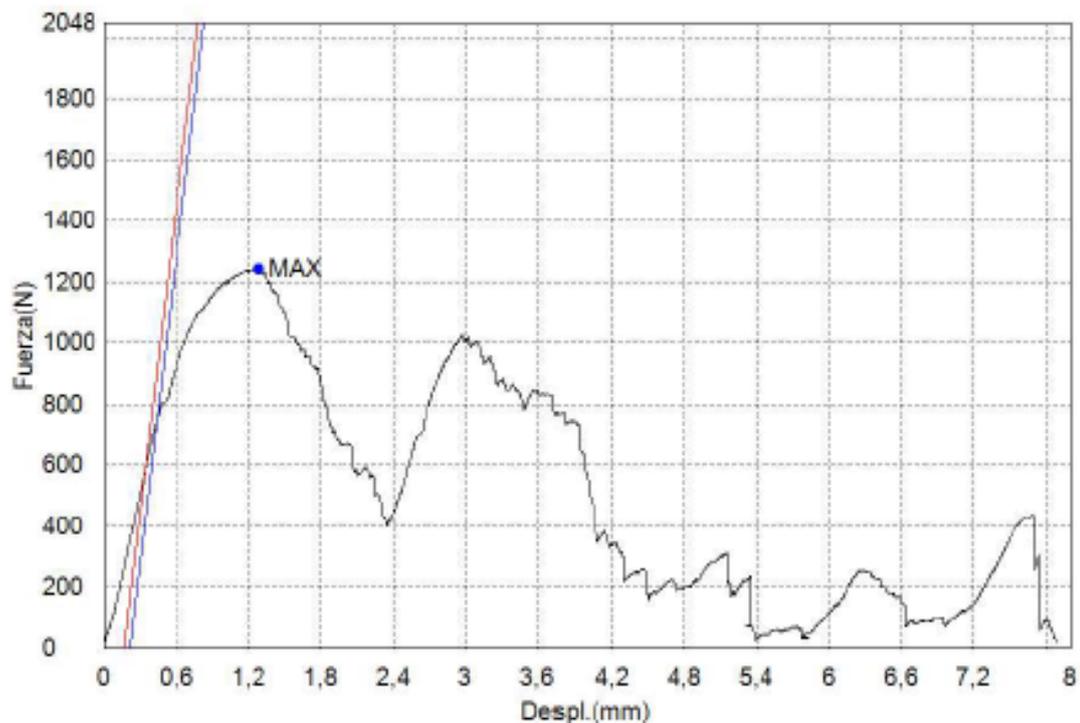


Figura 30: Gráficos fuerza desplazamiento ensayo de compresión muestra 2.

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Porosas03_20160527_102 1.xtak	Nombre de metodo de ensayo	Porosas.xmak
Fecha de informe	27/05/2016	Fecha de ensayo	27/05/2016
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Compresion
Velocidad	1mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	1

Nombre	Max.	Max_Fuerza	Max_Tension	Max._Desplazamiento
Parametros	5 Puntos	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	N/mm2	N	N/mm2	mm
1_1	2777,34	1253,19	24,7941	1,30067

Nombre	Max_Deformacion	LE1_Fuerza	LE1_Tension	LE1_Desplazamiento
Parametros	Calc. at Entire Areas	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unidad	%	N	N/mm2	mm
1_1	7,30712	389,036	7,69697	0,37065

Nombre	LE1_Deformacion
Parametros	0,2 %
Unidad	%
1_1	2,08228

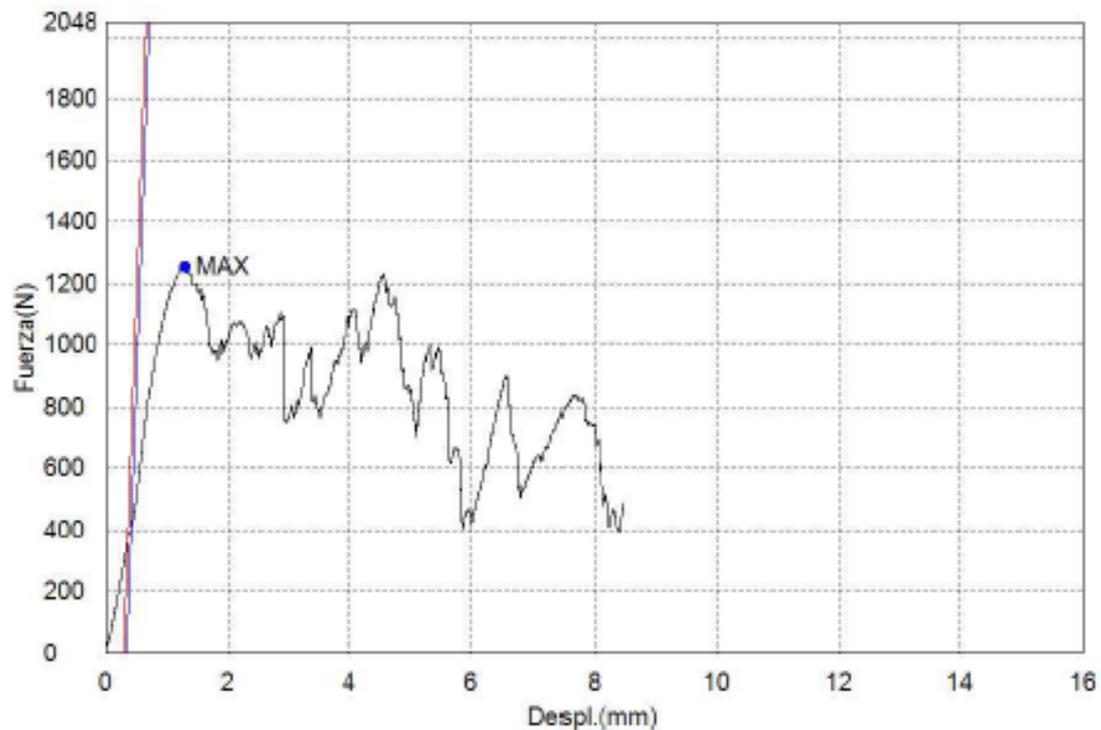


Figura 31: Gráficos fuerza desplazamiento ensayo de compresión muestra 3.

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Porosas04_20160527_103 2.xtak	Nombre de metodo de ensayo	Porosas.xmak
Fecha de informe	27/05/2016	Fecha de ensayo	27/05/2016
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Compresion
Velocidad	1mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	1

Nombre Parametros	Max. 5 Puntos	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas	Max_Tension Calc. at Entire Areas	Max._Desplazamiento Calc. at Entire Areas
Unidad	N/mm2	N	N/mm2	mm
1_1	5318,67	1758,42	32,9987	1,19533

Nombre Parametros	Max_Deformacion Calc. at Entire Areas	LE1_Fuerza	LE1_Tension	LE1_Desplazamient o
Unidad	%	N	N/mm2	mm
1_1	7,91611	1266,85	23,7738	0,58367

Nombre Parametros	LE1_Deformacion
Unidad	%
1_1	3,86534

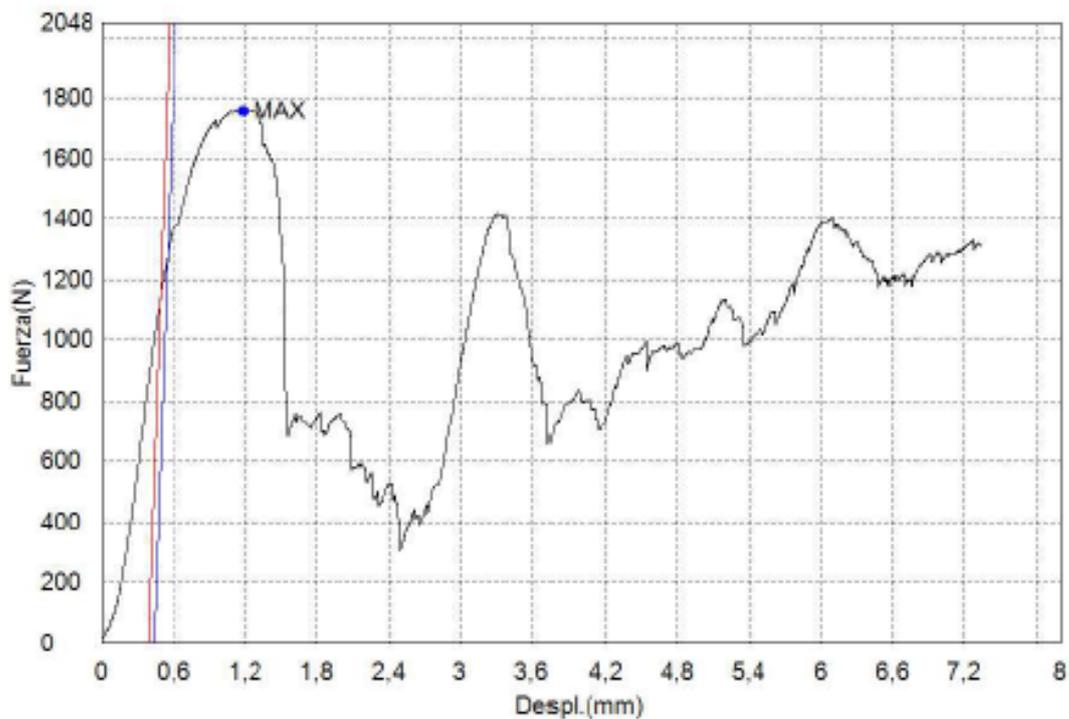


Figura 32: Gráficos fuerza desplazamiento ensayo de compresión muestra 4.

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Porosas05_20160527_104 3.xtak	Nombre de metodo de ensayo	Porosas.xmak
Fecha de informe	27/05/2016	Fecha de ensayo	27/05/2016
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Compresion
Velocidad	1mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	1

Nombre Parametros Unidad	Max. 5 Puntos N/mm2	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas N	Max_Tension Calc. at Entire Areas N/mm2	Max. _Desplazamiento Calc. at Entire Areas mm
1_1	2678,27	642,872	17,1364	6,31869

Nombre Parametros Unidad	Max_Deformacion Calc. at Entire Areas %	LE1_Fuerza 0,2 % N	LE1_Tension 0,2 % N/mm2	LE1_Desplazamient o 0,2 % mm
1_1	42,9843	461,006	12,2886	5,95202

Nombre Parametros Unidad	LE1_Deformacion 0,2 % %
1_1	40,4899

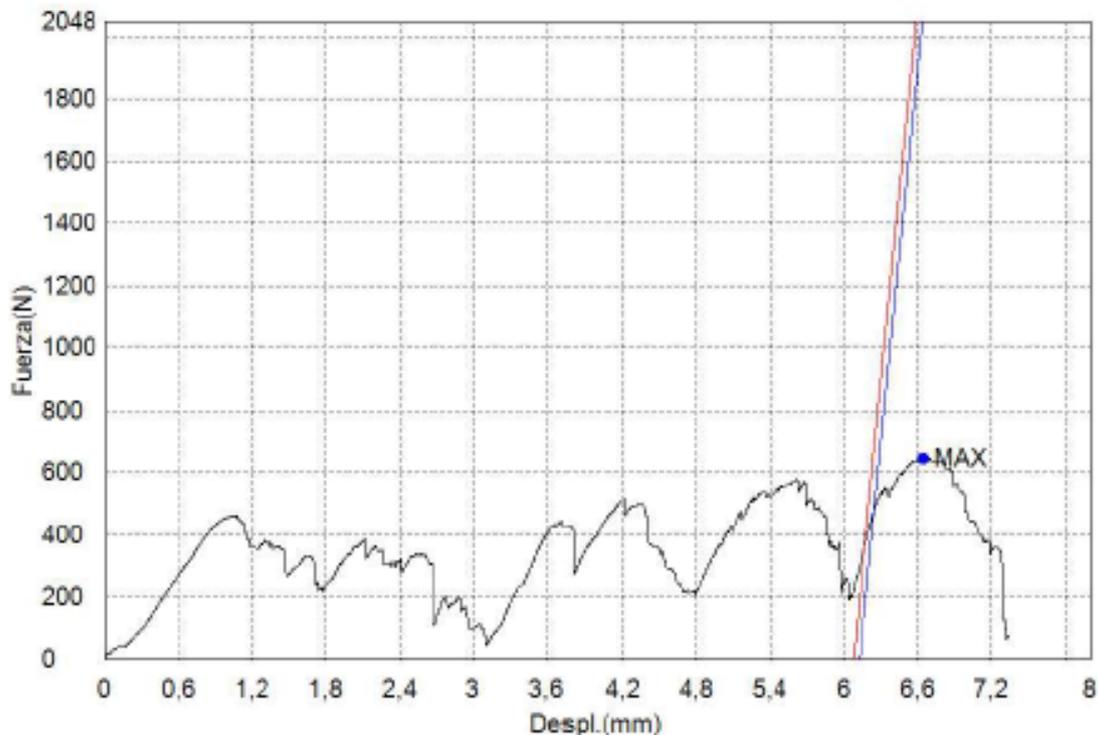


Figura 33: Gráficos fuerza desplazamiento ensayo de compresión muestra 5.

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Porosas06_20160527_1053.xtak	Nombre de metodo de ensayo	Porosas.xmak
Fecha de informe	27/05/2016	Fecha de ensayo	27/05/2016
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Compresion
Velocidad	1mm/min	Forma	Plana
Nºde partidas:	1	Nºde muestras:	1

Nombre	Max.	Max_Fuerza	Max_Tension	Max_Desplazamiento
Parametros	5 Puntos	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	N/mm2	N	N/mm2	mm
1_1	8574,19	2757,09	71,7291	0,96383

Nombre	Max_Deformacion	LE1_Fuerza	LE1_Tension	LE1_Desplazamiento
Parametros	Calc. at Entire Areas	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unidad	%	N	N/mm2	mm
1_1	6,34101	1746,97	45,4497	0,41715

Nombre	LE1_Deformacion
Parametros	0,2 %
Unidad	%
1_1	2,74438

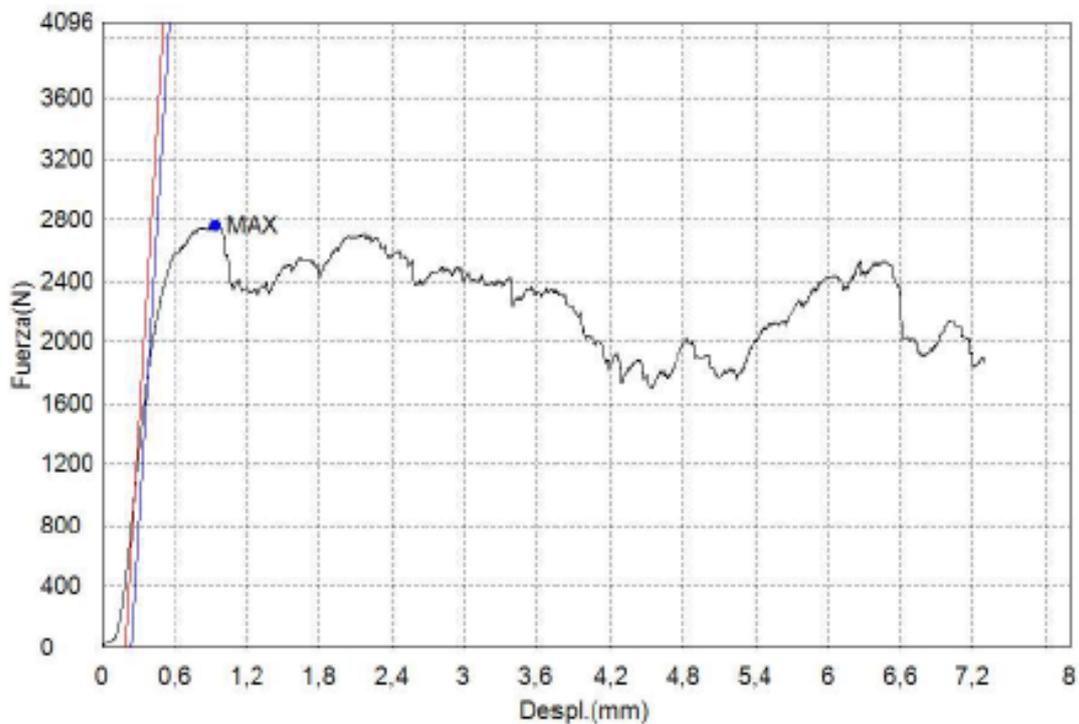


Figura 34 :Gráficos fuerza desplazamiento ensayo de compresión muestra 6.

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Porosas07_20160527_1103.xtak	Nombre de metodo de ensayo	Porosas.xmak
Fecha de informe	27/05/2016	Fecha de ensayo	27/05/2016
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Compresion
Velocidad	1mm/min	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	1

Nombre	Max.	Max_Fuerza	Max_Tension	Max_Desplazamiento
Parametros	5 Puntos	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	N/mm2	N	N/mm2	mm
1_1	2290993	1603,29	61,1125	0,76200

Nombre	Max_Deformacion	LE1_Fuerza	LE1_Tension	LE1_Desplazamiento
Parametros	Calc. at Entire Areas	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unidad	%	N	N/mm2	mm
1_1	6,19512	1545,18	58,8975	0,64367

Nombre	LE1_Deformacion
Parametros	0,2 %
Unidad	%
1_1	5,23306

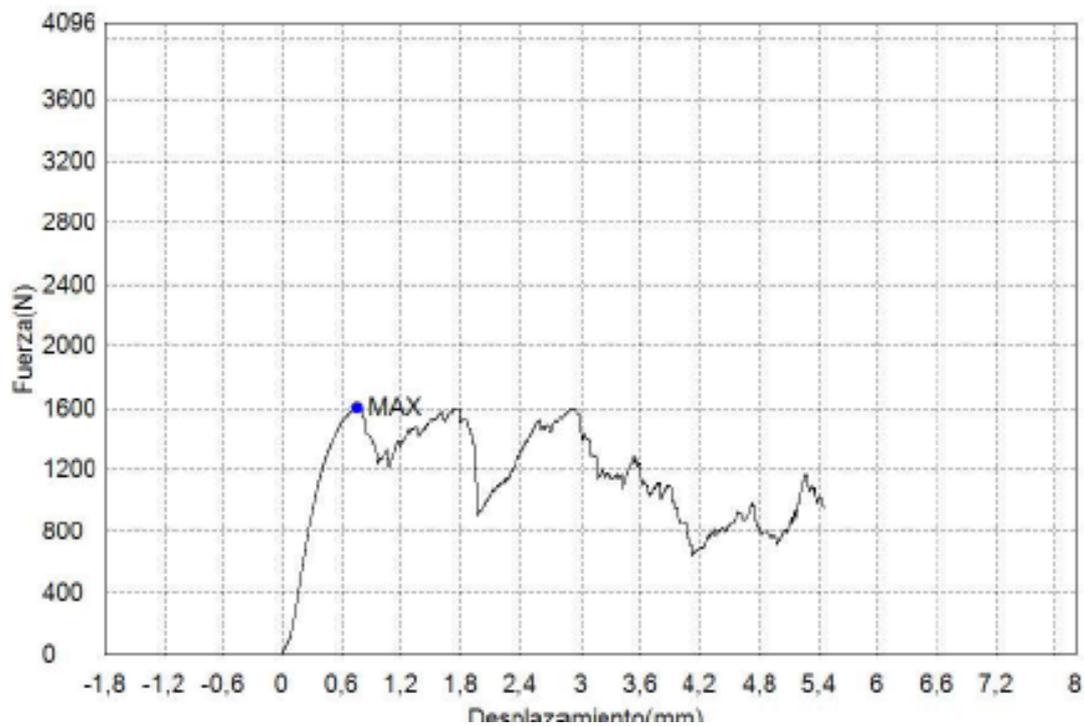


Figura 35: Gráficos fuerza desplazamiento ensayo de compresión muestra 7.

Palabra llave		Nombre de producto	
Nombre de archivo de ensayo	Porosas08_20160527_111 1.xtak	Nombre de metodo de ensayo	Porosas.xmak
Fecha de informe	27/05/2016	Fecha de ensayo	27/05/2016
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Compresion
Velocidad	1mm/min	Forma	Plana
Nºde partidas:	1	Nºde muestras:	1

Nombre	Max.	Max_Fuerza	Max_Tension	Max._Desplazamiento
Parametros	5 Puntos	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	N/mm2	N	N/mm2	mm
1_1	204797	5850,36	135,425	1,00385

Nombre	Max_Deformacion	LE1_Fuerza	LE1_Tension	LE1_Desplazamient o
Parametros	Calc. at Entire Areas	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unidad	%	N	N/mm2	mm
1_1	6,35351	3352,37	77,6012	0,40385

Nombre	LE1_Deformacion
Parametros	0,2 %
Unidad	%
1_1	2,55604

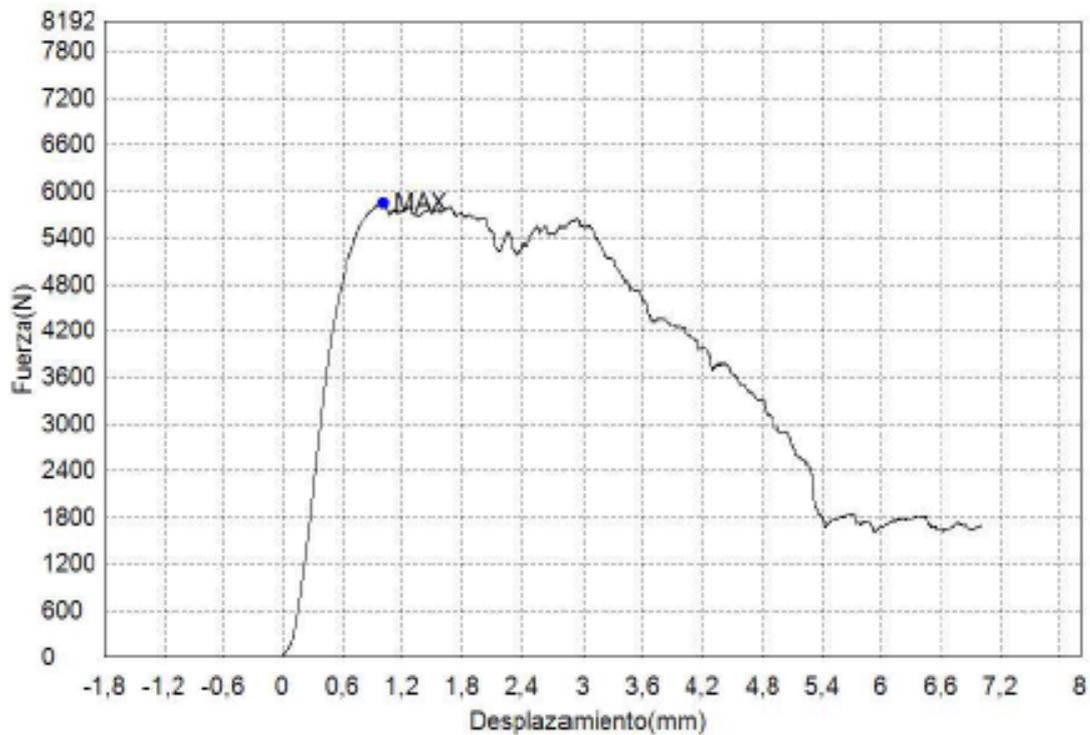


Figura 30: Gráficos fuerza desplazamiento ensayo de compresión muestra 8.

10. PRESUPUESTO

COSTES AMORTIZACION		
DATOS		NOTAS
Maquina (eur)	700.000	Este precio incluye la máquina Arcam Q10(incluye impuestos, transporte, curso y montaje.) + coste de la recuperadora de polvo (PRS), + la aspiradora por aire comprimido
Periodo de Amortización (años)	10,00	Periodo standard de amortización
TIEMPO DE FABRICACIÓN		
Amortización anual	70.000,00	
Tiempo funcionamiento (horas)		Se estimaron en base a 48 semanas de trabajo al año, una fabricación por semana y una media de fabricación de 15 horas
Semanas	48,00	
Media Fabricación (Mensual)	60,00	
Media Fabricación (Semanal)	15,00	
Media Fabricación (Diaria)	3,00	
Tiempo Total	720,00	Numero de horas estimadas en la que trabaja la máquina al año
CALCULOS		
Amortización anual	70.000,00	
Amortización mensual	5.833,33	
Amortización SEMANAL	1.458,33	
Amortización (hora)	97,22	El coste por hora para amortizar la máquina en un periodo de 10 años

COSTES CONSUMIBLES		
DATOS		NOTAS
Luz(KW/Hora)	0,127	Iberdrola
Filamentos	60	Los filamentos tienen un coste de unos 60 eur la unidad y una vida útil de 60 horas
Vida útil filamento (horas)	60	
Placa de fabricación	105	se puede usar por ambas caras y el precio oscila entre los 45 y los 120 €/ud., en este caso sacamos la media. Vida útil 1 cada 2 meses
Vida útil placa fabricación (horas)	120,00	
CALCULOS		
Luz (hora)	0,13	
Filamentos (hora)	1,00	
Placa de fabricación (hora)	0,88	
Consumibles (h)	2,002	Este es el coste de los consumibles básicos necesarios a la hora

COSTES PREPARACION		
DATOS		NOTAS
Limpieza (horas)	5	lo que se tarda en rescatar la fabricación, recuperar el polvo, preparar la máquina para fabricar
Precio_hora_ingeniero (€/hora):	33,00	Según convenio
CALCULOS		
Coste preparacion máquina	165	Este es el coste de la preapracion de la máquina antes de cada fabricación
Coste preparacion anual	23.760,00	El coste de la limpieza,, al año sin contar las horas de fabricación

Coste_operación_hora (€/hora):	132,22
---------------------------------------	---------------

COSTES MATERIAL Ti-6Al-4V ELI		
DATOS		NOTAS
Precio_ Ti-6Al-4V ELI (eur/Kg)	165	Precio según mercado actual sin impuestos
IVA	0,21	Impuesto de valor añadido
Densidad (Kg/cc)	4,42E-03	Densidad del Titanio Ti-6Al-4V ELI
Volumen (cc)	9,26	Volumen de nuestra muestra de 21 mm x 21 mm x 21 mm
CALCULOS		
Masa (kg)	0,0409292	Masa total de la muestra a fabricar
Coste material (eur)	6,753318	Este es el coste total del material de nuestra muestra.

TIEMPOS FABRICACIÓN		
DATOS		NOTAS
Tiempo_Limpieza (horas)	5	Como hemos comentado anteriormente lo que se tarda en rescatar la fabricación, recuperar el polvo y preparar la máquina para fabricar.
Tiempo_Preparación CAM (horas)	5,00	Este es el tiempo q se tarda de media en la elaboración del archivo CAM
Tiempo_fabricación CAM (horas):	10,00	Este es el tiempo de fabricación dentro de la cámara en base al programa que simula la operación
Tiempo enfriamiento	5,00	Tiempo que tarda en enfriarse la pieza antes de manipular con ella.
CALCULOS		
Tiempo total en fabricar la muestra (h)	25	Tiempo total considerando: limpieza, preparación, elaboración archivo CAM, fabricación según programa y enfriamiento.

COSTES FABRICACIÓN		
DATOS		NOTAS
Precio_hora_ingeniero (€/hora):	33	Hora ingeniero según convenio
Potencia de la máquina (KW)	7	Potencia de la máquina en Kilowatios
Luz(KW/Hora)	0,127	Iberdrola
Gastos Material (horas)	1,88	Gastos como el filamento y placa base en los que la máquina opera sola.
CALCULOS		
Costes_máquina funcionando sola (eur/hora)	2,764	Se distingue entre el tiempo en el que es necesaria la presencia de un técnico y el tiempo en el que la máquina fabrica sola.
Costes_máquina con técnico(eur/hora)	33,889	Costes de la hora de fabricación con un técnico considerando consumibles(Filamentos,placa y luz) y precio ingeniero

Precio /Pieza (eur)

505,51

El precio final es la suma de los costes de;

- Material empleado para nuestra muestra.
- Preparacion de la máquina (Elaboración CAM,Calibrar Haz de electrones) elaborado por un ingeniero
- Limpieza de la máquina elaborado por un ingeniero
- Tiempo total de fabricación en base a la simulación que nos da el programa sin que precise de un ingeniero
- Tiempo total de fabricación X el coste de la operación(Amortizacion,mantenimiento,consumibles..)

- **EL TOTAL SALE LOS 505,51 EUR**