

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales

Máster en Ingeniería Mecánica y Materiales



AIMME
INSTITUTO TECNOLÓGICO
METALMECÁNICO

Trabajo Fin de Máster

**PROCESADO DE POLVOS Co-Cr-Mo
MEDIANTE FUSIÓN SELECTIVA POR LÁSER**

Alumno: D. José Ramón Blasco Puchades

Director: Dr. D. Alfonso Cárcel González

Valencia, Septiembre del 2012

El objetivo del presente trabajo de investigación es la optimización de parámetros de procesamiento mediante la tecnología de fabricación aditiva de Fusión Selectiva por Láser o Selective Laser Melting (SLM), para la obtención de piezas de la aleación de uso biomédico Co-Cr-Mo ASTM F75 a partir de la fusión de capas de polvos.

En las instalaciones del Instituto Tecnológico Metalmecánico (AIMME), se dispone de un equipo de fabricación aditiva basado en dicha técnica SLM. La experiencia disponible en AIMME hasta el momento ha permitido adoptar una configuración de condiciones operatorias adecuada para la obtención de componentes a partir de polvos de diferentes aceros como el AISI 316L o el DIN 1.2709.

El objetivo práctico o aplicado del presente trabajo de investigación es la determinación de parámetros de procesamiento del láser de dicho equipo, de modo que pueda procesar adecuadamente polvos de aleación CoCrMo ASTM F75 para aplicaciones en implantes u otros tipos de componentes. Los parámetros de proceso deben permitir la obtención de piezas con adecuada resistencia mecánica e integridad estructural, asegurando al mismo tiempo una elevada productividad del equipo.

Para la obtención de los parámetros se ha empleado un procedimiento de diseño factorial de experimentos, que constituyen una herramienta más potente que los diseños experimentales clásicos en los que se estudia el efecto de cada variable de manera independiente. Este tipo de procedimiento de diseño y análisis estadístico de los resultados experimentales es especialmente apropiado para optimización de procesos en los cuales pueden controlarse varias variables de manera independiente, pero cuyos efectos individuales e interacciones no se conocen con precisión a priori. Los diseños factoriales son también especialmente eficientes en fases iniciales de un proceso de investigación, ya que permiten detectar cuales son las variables que mayores efectos generan, identificar efectos interactivos entre variables, y permiten definir o afinar los rangos de valores en los cuales podría ser de interés un estudio más exhaustivo en fases siguientes de investigación.

En este trabajo se ha evaluado la influencia de los parámetros velocidad de avance del láser, espesor de capa de polvos a fundir, solape entre pasadas del laser y velocidad de avance del láser durante la fusión del contorno de las piezas, con un total de 32 combinaciones diferentes.



Se ha trabajado en todos los casos con una potencia constante del láser de 100W y un tamaño de foco 0.2mm de diámetro, en atmósfera controlada de nitrógeno y con una presión parcial de oxígeno de $7 \cdot 10^{-4}$ atm.

Con estas condiciones de trabajo, se ha obtenido una probeta prismáticas de tamaño 5mm*5mm*10mm por cada configuración de procesado.

La aptitud del proceso para obtener piezas libres de defectos internos se ha evaluado a partir de estudios de la porosidad interna observada en secciones obtenidas de las piezas, tanto en el plano horizontal XY como en el plano vertical XZ. Se ha analizado también la microestructura y las propiedades mecánicas se han estimado a partir de mediciones de microdureza. En las condiciones más desfavorables, correspondiente al procesado a alta velocidad de dos capas de polvo y con bajo solape, la porosidad máxima observada ha sido del orden de 0.2%. La microestructura del material obtenido presenta los componentes típicos de las aleaciones CoCrMo fundidas por procedimientos convencionales, aunque con una estructura mucho más fina, con espaciado interdendrítico inferior a 5 micras. Este importante afino de la estructura lleva asociados muy altos valores de resistencia, con valores de dureza por encima de 50 HRC, superiores a los normalmente obtenidos en piezas coladas por técnicas convencionales que oscilan entre 25 a 35 HRC.

INDICE.

- 1. INTRODUCCIÓN - CONTEXTO..... (Pág. 7)**
 - 1.1. Fabricación Aditiva. Presente y futuro.
 - 1.2. Fabricación por capas.
 - 1.3. Soportes.
 - 1.4. Productividad y calidad superficial.
 - 1.5. Relevancia de la investigación.

- 2. OBJETIVO DEL TRABAJO..... (Pág. 15)**

- 3. MEDIOS..... (Pág. 19)**
 - 3.1. Software:
 - 3.1.1. SolidWorks.
 - 3.1.2. Magics13.
 - 3.1.3. Concept láser machine.
 - 3.1.4. Software statgraphics 5 plus.
 - 3.2. Tecnología de fabricación SLM modelo M3-linear.
 - 3.3. Equipos para preparación de muestras, ensayos y análisis:
 - 3.3.1. Microscopio electrónico de barrido modelo JEOL JSM 6400.
 - 3.3.2. EDM por hilo.
 - 3.3.3. Equipo de embutición.
 - 3.3.4. Equipo de preparación de superficies para metalografía.
 - 3.3.5. Equipo de ensayo de microdureza.
 - 3.3.6. Microscopio óptico.

- 4. MATERIAL.....(Pág. 29)**
 - 4.1. CoCrMo. Generalidades.
 - 4.2. Microestructura y propiedades mecánicas.
 - 4.3. Tratamientos térmicos.
 - 4.4. Formato para ser procesado mediante SLM.
 - 4.5. Análisis físico - químico del material para el ensayo.

- 5. METODOLOGIA: DISEÑO DE EXPERIMENTOS FACTORIALES.....(Pág. 39)**

- 6. DESCRIPCION DEL PROCESO DE FABRICACIÓN SLM y CONTROL DE VARIABLES.(Pág. 43)**
 - 6.1. Parámetros del láser.
 - 6.2. Diseño de las probetas.
 - 6.3. Fabricación de las probetas.



7. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	(Pág. 63)
7.1. Velocidad de procesado.	
7.2. Porosidad.	
7.2.1. Cálculo número de Poros.	
7.2.2. Porcentaje de porosidad.	
7.2.3. Imágenes.	
7.2.4. Análisis experimental.	
7.3. Estructura interna: Fusión y soldadura adecuada del polvo.	
7.4. Propiedades mecánicas: Microdureza según norma UNE-EN ISO 6507-1:2006.	
7.4.1. Cálculo microdureza.	
7.4.2. Análisis experimental.	
8. CONCLUSIONES.....	(Pág. 111)
9. PROPUESTA DE INVESTIGACIONES FUTURAS.....	(Pág. 115)
10. ANEXOS.....	(Pág. 117)
ANEXO 1: Clasificación de las tecnologías de fabricación aditiva (TFA)	
11. BIBLIOGRAFÍA.....	(Pág. 131)

1. INTRODUCCIÓN – CONTEXTO

En la introducción se va a abordar la fabricación aditiva en un sentido amplio y cuál es el espacio que está encontrando en la industria moderna. Como parte introductoria a la investigación se van a explicar conceptos básicos de la fabricación aditiva que van a contribuir a entender cuál es la relevancia del presente estudio y en que va a contribuir los resultados del mismo.

1.1. Fabricación Aditiva. Presente y futuro.

El principio en el que se basan cada unas de las tecnologías de fabricación consolidadas en la industria, las hace ventajosas en determinadas situaciones respecto a las demás, no existe una tecnología de fabricación ideal en sentido absoluto sino que la idoneidad en la utilización de una u otra dependerá específicamente de los particularidades cada fabricación: material a utilizar, número de piezas, tolerancias, complejidad geométrica, propiedades mecánicas, plazos, entre otros factores determinantes.

El moldeo es una tipología de procesos de fabricación muy utilizado en fabricación masiva, donde la inversión en la preforma (molde, matriz, boquilla de extrusión, etc.) está justificada en aras de conseguir una alta producción en poco tiempo lo que implica directamente bajo coste por pieza fabricada. Como contrapartida, este proceso implica tener que invertir en la fabricación de dicha preforma y además de que todas las piezas de la producción serán geoméricamente iguales lo que elimina la posibilidad de personalización.

Cuando la fabricación de piezas no es elevada, la inversión en la preforma puede no estar justificada, es en este caso, aunque el tiempo de fabricación por pieza pueda ser bastante más elevado, los procesos sustractivos se han constituido históricamente como una buena alternativa para la fabricación de productos. No obstante, estos procesos de fabricación estas limitados ya que solo pueden fabricar aquellas geometrías que se puedan obtener mediante la eliminación de material selectivamente a partir de una geometría mayor mediante el uso de herramientas.

En los últimos años, han evolucionado otro concepto de tecnologías de fabricación que desde un CAD 3D pueden fabricar geometrías mediante un

principio de superposición de secciones horizontales de material denominadas “capas”. Estas tecnologías se denominan tecnologías de fabricación aditiva (TFA). La posibilidad de prescindir de utillajes, de reproducir geometrías que no se pueden obtener mediante las otras tecnologías de fabricación, la posibilidad de fabricación en serie de piezas diferentes, el reducido tiempo en la que se pueden tener piezas fabricadas y otra serie de ventajas hacen que estas tecnologías se estén abriendo camino en la industria contemporánea experimentando un crecimiento exponencial en los últimos años.

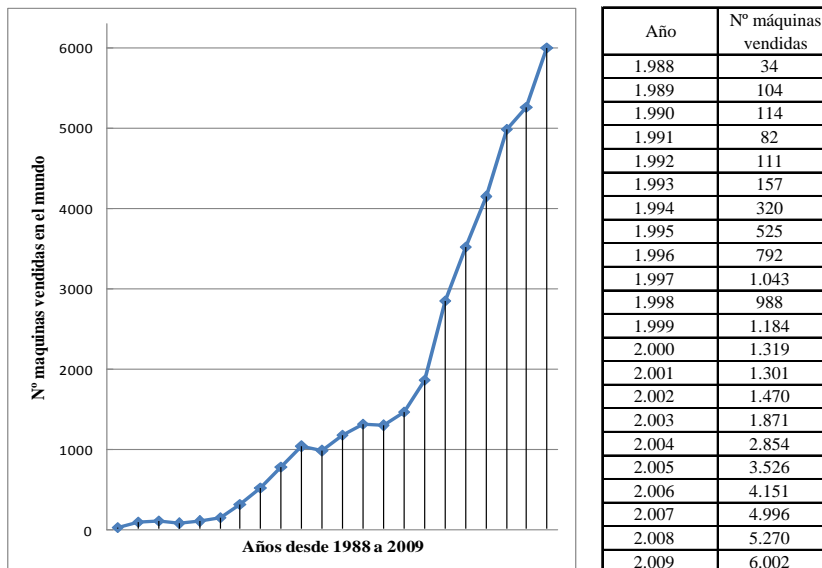


Figura 1: Ref. Wholers Report 2010. El gráfico muestra la tendencia de crecimiento de ventas de máquinas de FA en el mundo cada año desde 1988 hasta 2009.

Por lo general, la fabricación aditiva puede constituir una buena alternativa como tecnología de fabricación cuando el producto a fabricar tiene una geometría muy compleja, su tamaño es relativamente pequeño y fundamentalmente la producción de dicho producto no es elevada. Estas características no son absolutas sino relativas, es decir, cuanto más compleja, pequeña y de baja producción sea la pieza a fabricar, más sentido va a tener utilizar las tecnologías de fabricación aditiva como proceso de fabricación.

1.2. Fabricación por capas.

El principio de superposición de capas de material no es nuevo, se viene utilizando en el sector de la construcción para construir un muro mediante la superposición de piedras o en sector de la gastronomía para hacer una “lasaña”, este es el mismo principio que utilizan las tecnologías de fabricación aditiva para la fabricación de piezas.

La TFA pretenden que las piezas fabricadas obtengan unas propiedades lo más isotropas posibles, para ello, intentan que la cohesión del material en cada capa y entre las capas sea lo más uniforme y continuo posible para obtener unas buenas propiedades mecánicas.

En la fabricación por capas, cada una de ellas se sustenta sobre la inmediatamente inferior, este hecho hace que en los bordes de las capas pueden aparecer voladizos o simplemente geometría que no va a tener geometría donde apoyarse. En cualquiera de estas circunstancias, de no aportar una solución, la geometría deseada no se fabricaría adecuadamente.

Para resolver esta cuestión existen varias alternativas que son modificar la orientación de pieza, modificar la geometría de la pieza o hacer un diseño de geometría que será de sacrificio y cuya única función es hacer posible la fabricación. Estas geometrías de sacrificio en el mundo de la fabricación aditiva se denominan “soportes”

1.3. Soportes.

Los soportes cumplen una triple función: Fijar las piezas a la placa de fabricación, evitar desprendimientos de parte de las piezas y evacuar el calor desde la capa procesada para que cambie de estado líquido ha sólido rápidamente en el caso de las tecnologías que procesan metal.

Los soportes según su naturaleza pueden clasificarse en cuatro tipos:

Tipo 1: El soporte es del mismo material que la pieza y está procesado de la misma manera: Ej. Estereolitografía y SLM.

Este caso los soportes se eliminan mayoritariamente mediante procesos mecánicos, cortando los soportes y lijando los restos de los mismos en la pieza definitiva.

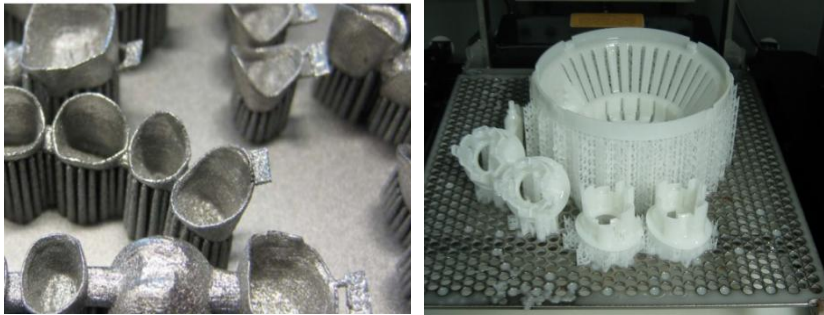


Figura 2: Izquierda: Ejemplo de Coronas y puentes dentales con sus soportes que fijan las piezas a la placa de fabricación. Cortesía EOS GmbH Piezas fabricadas en SLM en acero AISI 316L con sus correspondientes soportes. Derecha: Piezas con soportes fabricadas mediante Estereolitografía (SLA). Cortesía AIMME.

Tipo 2: El soporte es del mismo material que la pieza y está procesado de distinto modo a la pieza: Ej. EBM con soporte semisinterizado.

La tecnología EBM utiliza dos tipos de soporte, uno de tipo 1 que es el más convencional entre las TFA, y un segundo (tipo2) en el que el material, en el propio procesado de fabricación, se le aplica la energía justa para que se convierta en un polvo semisinterizado de manera que pueda contribuir a la transmisión térmica necesaria en el procesado de las capas superiores. Este polvo semisinterizado es plenamente reutilizable para posteriores fabricaciones.



Figura 3: Izquierda; Pieza fabricada en Ti6Al4V con sus soportes tipo 1. Derecha: Restos de soportes semisinterizados. Cortesía AIMME.

Tipo 3: El soporte es del mismo material que la pieza y no está procesado: Ej. SLS.

La tecnología sinterizado selectivo láser SLS, utiliza polvo de polímero termoplástico como materia prima para fabricar las piezas, en esta caso, el mismo polvo repartido y no sinterizado para formar piezas va a ser el soporte de las piezas superiores.

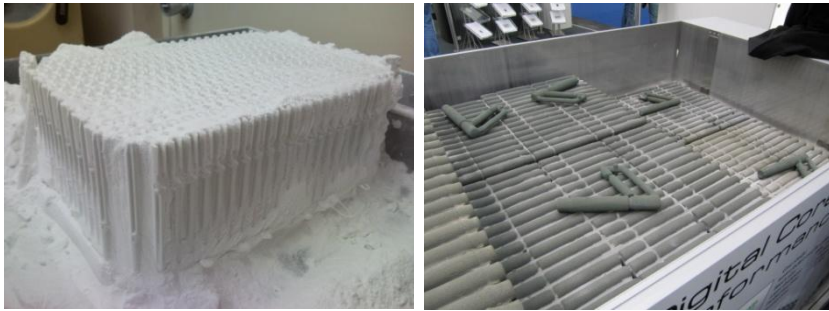


Figura 4: Izquierda: Fabricación de piezas en Poliamida (PA) en tecnología SLS. Derecha: Fabricación de piezas en Arena con aglomerante tecnología inkjet, fabricante Ex one. En ambos casos el soporte es exclusivamente el propio polvo.

Tipo 4: El soporte es de distinto material a la pieza: Ej. FDM

Existen diversas TFA de polímeros que utilizan uno o varios materiales para fabricar las piezas y otro polímero de menor punto de fusión o soluble en agua para los soportes de manera que tras la fabricación se pueda eliminar fácilmente el soporte.

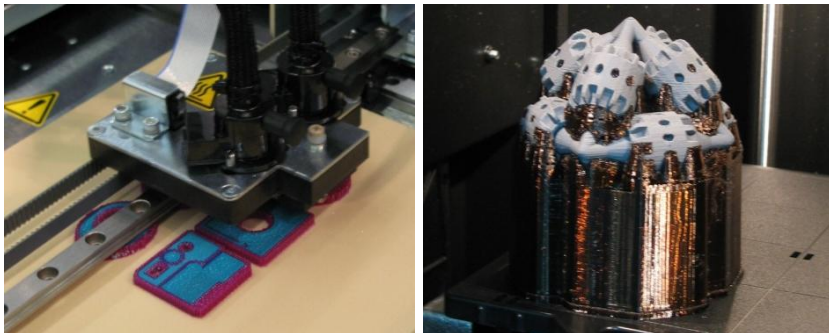


Figura 5: Izquierda: Tecnología Solidscape, trabaja con dos materiales, el material verde es pieza y el color morado es soporte. Feria Euromold celebrada en Frankfurt 2009. Derecha: tecnología Dimension SST: El color gris es pieza y el color marrón oscuro es soporte. Cortesía de AIMME. En ambos casos el soporte es soluble.

Los soportes son geometrías de sacrificio y por tanto, tras la fabricación, han de ser eliminados de las piezas soportadas. Es por ello que es muy importante que se tenga en cuenta este fenómeno en el posicionamiento de las piezas para la fabricación, en la elección de la tecnología de fabricación y en el propio diseño de la pieza. Empresas como Materialise HQ han desarrollado software que semiautomatizan el diseño de soportes con la finalidad de que cumplan su función en el propio proceso de fabricación y que posteriormente sean lo más sencillos posible de eliminar.

1.4. Productividad y calidad superficial.

El hecho que hayan evolucionando tanto las tecnologías de fabricación aditiva en los últimos años: Procesando más variedad de materiales, consiguiendo mayor isotropía en los materiales procesados y mejorando su fiabilidad, ha promovido que cada vez más se consideren como tecnologías de producción consolidadas.

En las tecnologías de fabricación aditiva, la velocidad de fabricación depende casi exclusivamente de la velocidad en que cada tecnología sea capaz de procesar material y esta velocidad depende de la potencia de la fuente de energía y del espesor de capa que se utilice.

Por lo general, cualquier tecnología de fabricación aditiva tiene la posibilidad de modificar el espesor de capa para aumentar la velocidad de procesado y con ello su productividad. Este hecho implica normalmente obtener un empeoramiento de la calidad superficial. De entre las tecnologías de menor velocidad de fabricación se encuentra precisamente las de Selective Láser Melting (SLM) ya que el aporte energético ha de ser muy elevado para fundir metal y a la vez, el diámetro de fusión ha de ser muy pequeño para poder obtener detalles finos. Estos hechos hacen de la SLM una de las tecnologías de menor productividad que cuya velocidad de procesado puede oscilar entre 2 a 10 cm³/h cuando se utiliza un láser de 100W. Esta productividad puede doblarse en el caso que se utilice una tecnología dotada de un láser de fibra de 200W. (Referencias del fabricante Concept láser GmbH.)

Existen tecnologías de SLM en desarrollo de alta resolución donde su productividad es mucho menor, no existen datos publicados de su productividad pero se puede intuir que será muy baja ya que el espesor de

capa aportada de metal llega a ser de $2\mu\text{m}$ respecto a las $30\mu\text{m}$ de una SLM convencional.

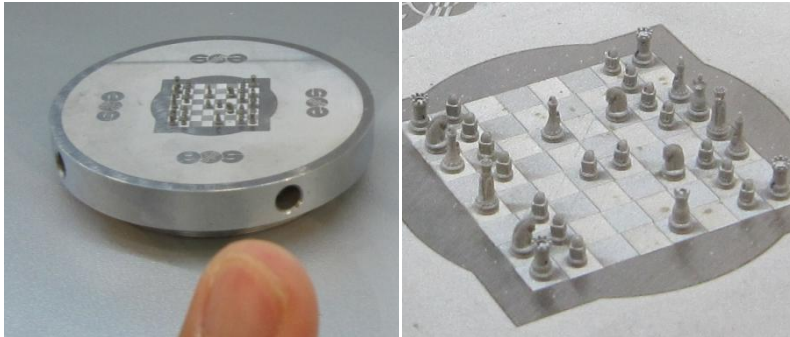


Figura 6: Piezas de ajedrez producidas mediante tecnología de micro láser sintering por la empresa EOS GmbH. El tablero tiene un tamaño de $16\times 16\text{mm}$, las piezas tienen una altura de 3.5mm y están fabricadas en capas de $2\mu\text{m}$ de espesor.

Como objetivo, en el procesado de cualquier material hay que aportar la energía necesaria para conseguir buenas prestaciones mecánicas pero no dejando de lado que aportar más energía de la necesaria va a penalizar la productividad.

Cuando se quiere fabricar una pieza en SLM, el objetivo es que la pieza tenga la mejor calidad superficial y densidad posible a la vez que se minimice el tiempo de la producción, para conseguir estos objetivos, se ha diseñado el programa de gestión del láser de modo que se puedan asignar unos parámetros al perímetro de la pieza y otros parámetros para el interior de la misma. Por lo anterior, para diseñar los parámetros de proceso de un material se puede tener en cuenta hasta tres configuraciones de procesado en la misma pieza en función de si la geometría a procesar es soporte o pieza, distinguiendo en la pieza entre contorno de la misma y material interior.

1.5. Relevancia de la investigación.

En la actualidad, la máquina m3-linear, se puede utilizar exclusivamente para procesar de manera aditiva distintas aleaciones de acero y ello limita la cantidad de aplicaciones industriales fabricables mediante dicha tecnología.

El hecho de poder procesar CoCrMo ASTM f75 mediante dicha tecnología puede aportar al mercado la posibilidad de utilizar las ventajas de dicha aleación con las ventajas intrínsecas a la Fabricación Aditiva.

Específicamente el tándem CoCrMo y SLM, puede implicar para el sector salud la posibilidad de producir eficientemente implantes de pequeño tamaño con dicha aleación como ya ocurre con la aleación de CoCrW con la que se pueden fabricar hasta 380 fundas y puentes dentales en un plazo de 20 horas en una tecnología de SLM similar a la utilizada en el presente trabajo.

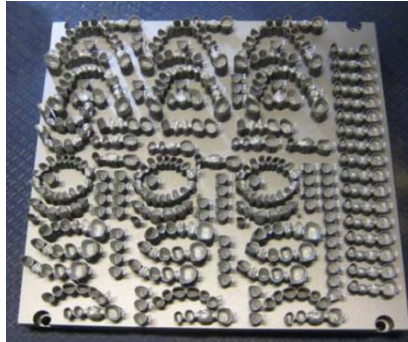


Figura 7: Imagen cortesía de del fabricante EOS GmbH. Piezas fabricadas con tecnología de SLM M270.

2. OBJETIVO DEL TRABAJO.

El objetivo del trabajo es determinar unos parámetros de procesado para la aleación CoCrMo ASTM F75 de modo que se pueda procesar mediante una tecnología de fabricación aditiva de metal denominada fusión selectiva por láser (SLM) que ya está ajustada de fábrica para procesar distintos aceros como el AISI 316L y el DIN 1.2709. Para cumplir dicho objetivo se van a analizar las variables que rigen el proceso de fabricación de dicha tecnología, se van a seleccionar los más influyentes y con ellas se va a realizar un diseño de experimentos con la finalidad de determinar la influencia de cada una de las variables en la obtención de unas óptimas propiedades en el material transformado en dicha tecnología desde polvo a material cohesionado y con una densidad cercana al 100%.

La obtención de piezas con adecuada resistencia es un aspecto que implica varios tipos de propiedades o medidas de parámetros independientes. En la práctica, dado que se trata de fundir sucesivamente capas de polvo metálico en un proceso similar a los recargos por soldadura, son aplicables los principios generales que afectan a las propiedades mecánicas de aleaciones procesadas por procesos de fusión-solidificación. De modo resumido, para que el material o la pieza procesada posean unas propiedades mecánicas finales adecuadas se deben cumplir los siguientes aspectos [1].

1º. Debe lograrse una adecuada continuidad física, con ausencia de poros o grietas. Para lograr este efecto debe garantizarse:

- Un suficiente aporte energético, que asegure la fusión de las capas inferiores con el polvo aportado. El aporte energético se cuantifica por la variable ENA o Heat Input, que mide la energía por unidad de longitud de cada pasada de la fuente de fusión. Su cálculo se obtiene al dividir la potencia real aportada por la velocidad de avance de la fuente calorífica. La sección de la zona fundida es directamente proporcional a esta variable. Entre las variables controlables del proceso, afecta directamente al valor del aporte energético la variable “velocidad de avance de la fuente láser”, de modo que el aporte se reduce linealmente conforme aumenta la velocidad de avance, dado que se trabaja en condiciones de potencia constante. Otra variable de interés en este caso es el número de capas de polvo a fundir en cada pasada. Las recomendaciones del fabricante del equipo sugieren la fusión capa a capa. Este factor, sin embargo, es

junto con la velocidad de avance un factor que afecta directamente a la productividad, por lo que se ha decidido explorar el efecto de fundir una y dos capas de polvo de manera simultánea. La fusión o soldadura entre cordones adyacentes es también otro factor que afecta a la zona fundida y a la productividad, y que se controla por la variable “Overlap” o “Solape” entre pasadas del láser.

- Una baja contaminación por gases, que evite la formación de poros. En el equipo empleado, esta variable se controla con la concentración de O₂ presente en la cámara de fusión, que se mantiene en los valores mínimos posibles del equipo.
- La aleación debe ser intrínsecamente resistente a la fisuración en caliente o por transformaciones durante su enfriamiento, ya que se producirán inevitablemente tensiones internas durante el proceso de fabricación.

2º. Debe lograrse una microestructura metalúrgica adecuada, sin pérdida de aleantes por evaporación o por reacción con los gases del entorno, sin formación de inclusiones y sin que se produzcan transformaciones microestructurales indeseables. Este factor exige que se procese el material en una atmósfera suficientemente inerte y que, por otro lado, el material a procesar sea adecuado para el proceso de fusión. La aleación Co-Cr-Mo empleada se considera a priori adecuada, ya que normalmente se emplea para obtener piezas fundidas por procedimientos convencionales: microfusión, inyección, colada a la cera perdida. No obstante, en los procedimientos convencionales suelen darse fenómenos de segregación que obligan a aplicar tratamientos posteriores de homogenización a las piezas.

3º. Finalmente, es aconsejable lograr un acabado superficial apropiado, con una rugosidad controlada. En este tipo de proceso, la rugosidad superficial es difícil de controlar. Depende de la granulometría del polvo empleado y de las condiciones de fusión de los contornos de la pieza. En aplicaciones o piezas que van a trabajar en condiciones de fatiga, en las que la rugosidad superficial (Ra) debe reducirse a valores bajos, del orden de unas pocas micras, las piezas en bruto resultarán inadecuadas y normalmente serán necesarias operaciones adicionales de pulido posterior. Este aspecto relativo al acabado superficial, aún siendo relevante en la aplicación final de las piezas, no se ha incluido entre los objetivos a optimizar del presente estudio.



La aptitud del proceso para obtener piezas libres de defectos internos se plantea evaluar a partir de estudios de la porosidad interna que se obtenga en secciones obtenidas de las piezas, tanto en el plano horizontal XY como en el plano vertical XZ. La fusión adecuada del polvo y la estructura y microestructura de la aleación obtenida se analizará por técnicas convencionales metalográficas. Dadas las limitadas dimensiones de las piezas a fabricar, las propiedades mecánicas se estimarán a partir de mediciones de microdureza. Los valores estándar de dureza obtenidos en las aleaciones F75 son del orden de 25-35 HRC. Se espera obtener valores iguales o superiores mediante la fusión selectiva por láser.

3. MEDIOS.

Los medios utilizados van a ser softwares que se van a utilizar para el diseño, preparación de la fabricación y para el análisis de los resultados obtenidos, la propia máquina de M3-linear que dispone de una tecnología de SLM y equipamiento de laboratorio para preparación, ensayos y análisis de las muestras.

3.1. Softwares

3.1.1. Solidworks.

Solidworks es un Software de diseño mecánico que va a ser utilizado para el diseño en 3D de las 32 probetas del presente estudio y para exportar dichas geometrías al formato *.stl necesario para que lo puedan entender los software de preparación para fabricación aditiva.

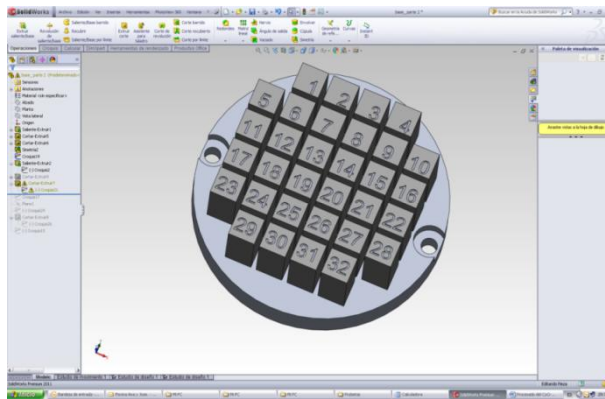


Figura 8: Interface del software Solidworks.

3.1.2. Magics 13.

Este es el software más extendido como herramienta de verificación y preparación de la fabricación para tecnologías de fabricación aditiva.

En este trabajo se va a utilizar para importar los ficheros *.stl de las 32 probetas a fabricar. El formato *.STL se ha convertido en el formato estándar de transmisión de datos para la industria de la fabricación aditiva. La mayoría de los actuales sistemas CAD 3D son capaces de exportar en este tipo de formato.

Con magics se realizan fundamentalmente 4 operación que son verificación del Fichero 3D, orientación de la piezas a fabricar, diseño de soportes y conversión de toda la geometría resultante a un fichero *.cls que tiene toda la información de la fabricación separada por capas. Esta información es la que utilizan las Tecnologías de fabricación Aditiva (TFA) para fabricar.

3.1.3. Concept láser machine software.

La máquina de M3-linear, dispone de un software de control de los parámetros y estrategias denominado “Conceptláser machine Software” desde donde se asignan todos los parámetros relacionados con el láser, y es por tanto, con estos parámetros mediante los cuales se diseñan las estrategias para conseguir procesar un material.

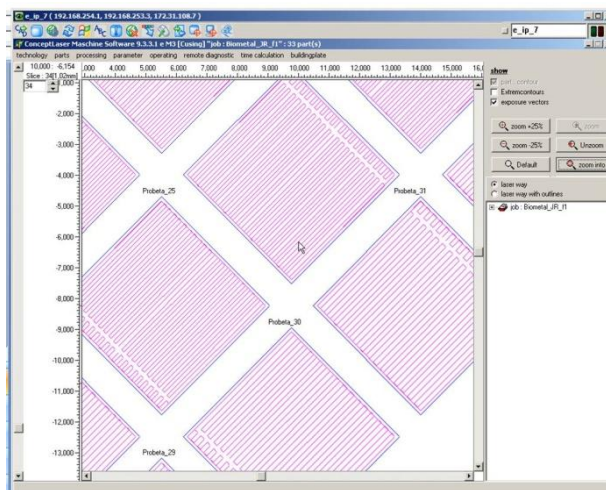


Figura 9: Interface del Conceptláser machine Software.

Este software de control permite asignar en cada fabricación hasta tres tipos distintos de estrategia de procesado para su láser. Estas estrategias de proceso tienen la misión de fundir el polvo de la geometría a procesar en cada una de las capas consecutivas que formarán la geometría final de la pieza en función de si se trata de:

- Parte interior de la capa, denominado “SKIN” en el software, que será el material que configurará el interior de las piezas.

- El borde a procesar de cada capa denominado “CONTURES” en el software, este será el material que configurará el acabado superficial de las piezas.
- SUPPORT: Configurara el soporte cuya función es favorecer la fabricación y no la función de la pieza final, dicho material será separado en un proceso posterior a la fabricación de la piezas.

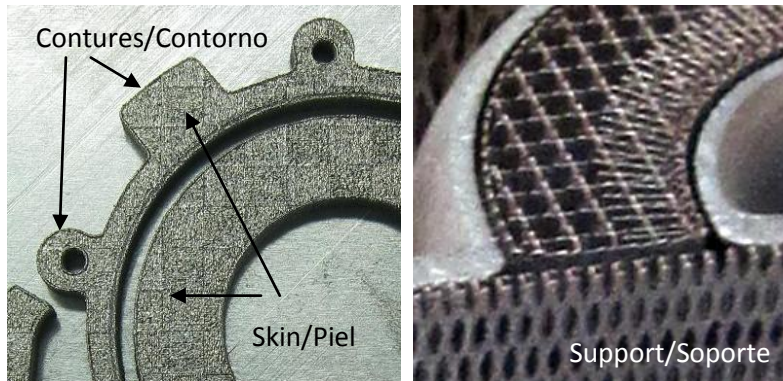


Figura 10: Imágenes en detalle de piezas fabricadas en SLM donde se aprecian la geometría que se fabrica en cada una de las tres configuraciones que el software de control permite variar (contorno, piel y soportes).

3.1.4. Software statgraphics 5 plus.

Statgraphics 5 plus es un software estadístico que se va a utilizar en este estudio para realizar un diseño de experimentos a partir de unas variables y un niveles de modificación por cada variable. Este software va a elaborar las configuraciones de procesado para cada una de las 32 probetas y tras la fabricación de las mismas y haber obtenido resultados medibles, el software va a aportar datos numéricos y en gráficos que relacionan los resultados con las variables del proceso.

3.2. Tecnología de fabricación SLM modelo M3-linear.

Se va a utilizar para el presente estudio de la máquina M3-linear del fabricante Concept láser gmbH. Esta máquina está disponible en AIMME, Instituto Tecnológico Metalmeccánico.



Figura 11: Máquina M3-linear del fabricante Concept láser gmbH en las instalaciones de AIMME

Esta máquina es capaz de realizar tres procesos de fabricación distintos mediante el uso del láser: Marcado, erosión 3D y fabricar geometrías de forma aditiva mediante la tecnología SLM.



Figura 12: Ejemplos de erosión 3D (imagen izquierda) y marcado láser 2D (imagen derecha).Figura: Ejemplos de erosión 3D (imagen izquierda) y marcado láser 2D (imagen derecha).

Los tres procesos de fabricación se pueden alternar mediante el cambio de dos módulos, un módulo se utiliza para SLM, y el otro módulo para Marcado y erosión 3D.



Figura 13: Izquierda: Módulo de SLM. Derecha; módulo de Marcado y erosión 3D

El módulo de SLM es el que se va a utilizar para la ejecución del presente trabajo.

Esta máquina de origen, está configurada para poder procesar mediante SLM, distintos aceros como son el acero Inoxidable CL20 (AISI 316L DIN1.4404), CL50 (acero DIN 1.2709) y Acero CL90 (similar DIN 1.2083).

Esta tecnología está dotada de un generador de Nitrógeno que consigue durante el proceso reducir en la cámara de trabajo el porcentaje de Oxígeno entorno al 0.8% de media. El porcentaje de Oxígeno residual en la cámara de procesado limita la tipología de metales a procesar a los poco reactivos ya que sigue existiendo un porcentaje de oxígeno que podría producir problemas de seguridad en caso de procesar otras aleaciones más reactivas como aleaciones de Ti, de Al o de Mg.

Technical data		
LaserCUSING® materials	Stainless steel Hot-work steel	CL 20ES (1.4404) CL 50WS (1.2709) CL 60DG (1.2709) CL 90RW (comparable 1.2083) CL 91RW (comparable 1.2083)
Number of axles	5 mec.	
Positioning precision of the linear motors	15 µm	
Build envelope LaserCUSING®	250 x 250 x 250 mm up to 300 x 350 x 300 mm (x, y, z)	
Layer thickness LaserCUSING®	20 - 80 µm	
Production speed LaserCUSING®	2 - 20 cm ³ /h (depending on material)	
Working platform	450 x 450 mm	
3D Material erosion	450 x 450 mm	
Size of workpiece	max. 800 x 500 x 400 mm	
3D Material erosion	max. 800 x 500 x 400 mm	
Weight of workpiece	up to 500 kg	
3D Material erosion	450 x 450 mm	
Work area Laser marking	450 x 450 mm	
Laser system	Diode-pumped solid state laser 100W (cw + pulsed) Fibre laser 200W (cw) (optional)	
Max. scanning speed	7 m/s	
Focus diameter	70 - 200 µm	
Reference clamping system	EROWA, System 3R / others on request	
Connected loads	Power consumption 7.4 kW Power supply 3/N/PE AC 400V, 32A Compressed air 7-8 bar	
Inert gas supply	N2 generator external (optional)	
Inert gas consumption	approx. 2,5 m ³ /h	
Dimensions laser station	2670 x 1990 x 2180 mm (W x D x H)	
Weight laser station	2300 kg	
Weight LaserCUSING® module	550 kg	
Weight 3D Erosion module	500 kg	
Operating conditions	15 - 35°C	

Figura 14: Ficha técnica de la Tecnología M3-linear.

3.3. Equipos para preparación de muestras, ensayos y análisis:

3.3.1. Microscopio electrónico de barrido modelo JEOL JSM 6400.

Para el análisis del polvo de CoCrMo se va a utilizar un Microscopio electrónico de barrido modelo JEOL JSM 6400. Cortesía AIMME.



Figura 15: Microscopio electrónico de barrido modelo JEOL JSM 6400. Cortesía AIMME.

3.3.2. EDM por hilo.

Se ha determinado utilizar esta técnica para cortar las probetas porque la dureza del material se espera muy elevada y porque se va a ejecutar una trayectoria de corte muy compleja para otro tipo de sistema.

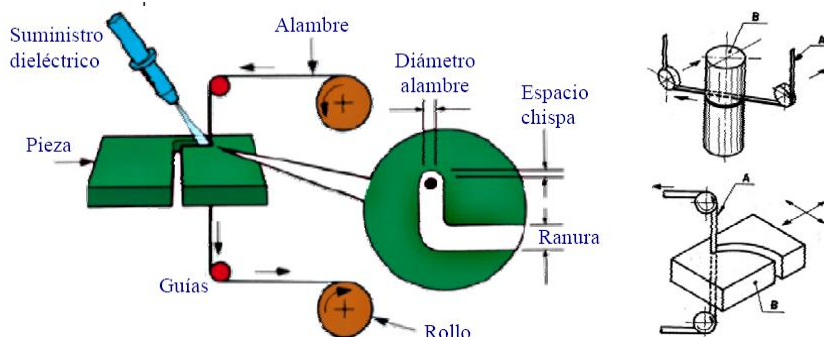


Figura 16: Esquema del proceso EDM por hilo o electroerosión por hilo. Asignatura Técnicas avanzadas de fabricación, máster universitario de ingeniería mecánica y los materiales UPV. Tema: Procesos de mecanizado no convencionales, pág 20 y 21.

3.3.3. Equipo de embutición.

Para poder ser analizadas las muestras tras el corte, se han de embutir en un polímero, para ello se va a utilizar un equipo de embutición de muestras marca Struers, modelo labopress – 3.



Figura 17: Equipo de embutición de muestras marca Struers, modelo labopress – 3. Cortesía AIMME.

3.3.4. Equipo de preparación de superficies para metalografía.

Las muestras, tras la embutición, requieren de un pulido superficial para poder observar la adecuadamente superficie objetivo, esta tarea va a ser ejecutada mediante un equipo de preparación superficial marca Struers modelo tegrapol-15.



Figura 18: Equipo de preparación superficial de las muestras marca Struers, modelo tegrapol-1. Cortesía AIMME.

3.3.5. Equipo de ensayo de microdureza.

Para el ensayo se va a utilizar un microdurómetro Wolpert. Cortesía AIMME. Este equipo puede medir dureza en distintas escalas entre ellas está la microdureza en Vickers (VH1). Escala que se va a utilizar en el presente trabajo.



Figura 19: Durómetro Wolpert.. Cortesía AIMME.

3.3.6. Microscopio óptico.

Para fotografiar las secciones de las probetas fabricadas se va a utilizar un microscopio óptico de la marca Nikon, modelo eclipse LV100.



Figura 20: Microscopio óptico Nikon, modelo eclipse LV100. Cortesía AIMME.

4. MATERIAL.

4.3. CoCrMo ASTM F75. Generalidades.

Lo más característico de las aleaciones de CoCr es su buena resistencia mecánica y a la corrosión a elevadas temperaturas si lo comparamos con otras aleaciones que habitualmente se usan como biomateriales. Esta aleación se ha usado habitualmente para aplicaciones aeronáuticas pero desde los años 30 se empezaron a utilizar para aplicaciones biomédicas debido a la salida comercial de la aleación Vitallium, a las que han seguido aleaciones como Co-Cr-Mo, Co-Ni-Cr-Mo-W-Fe y Co-Ni-Cr-Mo.

El molibdeno en la aleación mejora el afino del grano e incrementa la resistencia a la corrosión. El níquel se añade para mejorar la conformación y la fluidez en la colada, sin embargo su porcentaje debería estar limitado para asegurarnos la mínima toxicidad en el cuerpo. La fundición se mejora con un pequeño porcentaje de carbono (0.2-0.3%) disminuyendo así el punto de fusión entorno a 100°C. La distribución de carburos $M_{23}C_6$ ricos en cromo y el endurecimiento por deformación ayuda a incrementar la resistencia por desgaste, esto hace que sean unas aleaciones excelentes para aplicarlas en zonas donde se necesitan sustituir articulaciones, aunque también van acompañadas de partes poliméricas [3].

Actualmente las cuatro principales aleaciones aplicadas para materiales biomédicos son:

- ASTM F75, Co-28Cr-6Mo aleación fundida.
- ASTM F90, Co-20Cr-15W-10Ni aleación forjada.
- ASTM F799, Co-28Cr-6Mo aleación procesada termomecánicamente con una composición parecida a la F75.
- ASTM F562, Co-35Ni-20Cr-10Mo aleación forjada.

ASTM designation	UNS No.	Composition(a), wt%										
		Cr	Mo	Ni	Fe	C	Si	Mn	W	P	S	Others
F 75	R30075	27.0–30.0	5.0–7.0	1.00	0.75	0.35	1.00	1.00	0.20	0.020	0.010	0.25 N; 0.30 Al; 0.01 B
F 90	R30605	19.0–21.0	...	9.0–11.0	3.00	0.05–0.15	0.40	1.00–2.00	14.00–16.00	0.040	0.030	...
F 562	R30035	19.0–21.0	9.0–10.5	33.0–37.0	1.00	0.025	0.15	0.15	...	0.015	0.010	1.0 Ti
F 563	R30563	18.00–22.00	3.00–4.00	15.00–25.00	4.00–6.00	0.05	0.50	1.00	3.00–4.00	...	0.010	0.50–3.50 Ti
F 799	R31537	26.0–30.0	5.0–7.0	1.00	0.75	0.35	1.00	1.00	0.25 N
F 1058 grade 1	R30003	19.0–21.0	6.0–8.0	14.0–16.0	Bal(b)	0.15	1.20	1.5–2.5	...	0.015	0.015	0.10 Be; 39.0–41.0 Co
F 1058 grade 2	R30008	18.5–21.5	6.5–7.5	15.0–18.0	Bal(b)	0.15	1.20	1.00–2.00	...	0.015	0.015	0.001 Be; 39.0–42.0 Co

(a) Single values are maximum values unless otherwise indicated. (b) The iron content is approximately equal to the difference between 100% and the sum percentage of the other specified elements. ASTM F 1058 grade 1 contains between 39.0 and 41.0 wt% Co; ASTM F 1058 grade 2 contains between 39.0 and 42.0 wt% Co.

Figura 21: Composiciones químicas de las aleaciones base cobalto utilizadas para implantes quirúrgicos [4].

El endurecimiento de las aleaciones de cobalto se producen mediante mecanismos de solución sólida. En el caso de las aleaciones producidas por forja, el porcentaje de carbono debe ser reducido comparado con las coladas (0.05% frente a las 0.25%). Para mejorar la conformación el contenido de cromo se reduce y se añade níquel. Los límites de resistencia varían con el tamaño del grano o con el grado de trabajo en frío. Los procesos de colada generan una resistencia a tracción y tenacidad máxima pero no suelen producir granos de tamaño uniforme.

La dificultad de trabajar con esta aleación se encuentra en los mecanizados posteriores. La forja de matriz cerrada puede minimizar estos mecanizados, pero por lo general los productos forjados requieren más rectificado que las piezas fabricadas por colada. Por lo tanto, las coladas se usan para desarrollar implantes de cobalto más baratos, a pesar de obtener un tamaño de grano más grande de lo normal. De la misma forma la porosidad también puede ser un problema en estas aleaciones, por lo que la aplicación de un postratamientos como el HIP “Hot isostatic pressing” mejora sustancialmente la aleación. De esta rama ha surgido con fuerza la fabricación de estos materiales mediante pulvimetalurgia, con un resultado excelente en cuanto al tamaño de grano y sus propiedades, aunque mucho más caro [4].

ASTM designation	Condition	Young's modulus		Yield strength		Tensile strength		Fatigue endurance limit (at 10 ⁷ cycles, R = -1)	
		GPa	10 ⁶ psi	MPa	ksi	MPa	ksi	MPa	ksi
F 75	As-cast/annealed	210	30	448-517	65-75	655-889	95-129	207-310	30-45
	P/M HIP(a)	253	37	841	122	1277	185	725-950	105-138
F 799	Hot forged	210	30	896-1200	130-174	1399-1586	203-230	600-896	87-130
F 90	Annealed	210	30	448-648	65-94	951-1220	138-177	Not available	
	44% cold worked	210	30	1606	233	1896	275	586	85
F 562	Hot forged	232	34	965-1000	140-145	1206	175	500	73
	Cold worked, aged	232	34	1500	218	1795	260	689-793(b)	100-115(b)

(a) P/M, powder metallurgy; HIP, hot isostatic pressing. (b) Axial tension, R = 0.05, 30 Hz. Source: Ref. 5

Figura 22: Propiedades típicas de aleaciones base cobalto coladas y forjadas. [4].

4.4. Microestructura y propiedades mecánicas.

El ASTM F75 es una aleación obtenida por colada, con nombres comerciales como Vitallium o Haynes 21. La principal características de esta aleación es su alta resistencia a la corrosión en ambiente clorados debido a la acción de la capa de Cr₂O₃ que nos encontramos en su superficie. Cuando se cuele el F75 por moldeo por inversión o a la cera perdida, la aleación se funde a 1350 a 1450 °C, en un molde cerámico [9]. Una aleación F75 consiste en una matriz rica en cobalto (fase alfa) y carburos interdendríticos en borde de grano (principalmente M₂₃C₆, donde la M suele ser Co, Cr o Mo), existiendo también interdendríticos sigma ricos en cobalto y molibdeno y fase gamma base cobalto.

Si ocurre un enfriamiento poco equilibrado durante la solidificación, puede aparecer una aglomeración con microestructura con carburos. En esta circunstancia, las regiones interdendríticas llegan a ser solutos ricos en cromo, molibdeno, carbono y que contienen carburos, mientras que las dendritas llegan a ser empobrecidas en cromo y enriquecidas en cobalto. Esta es una solución desfavorable electroquímicamente, con zonas empobrecidas de cromo (regiones anódicas) con respecto al resto de la microestructura. Por lo que para evitar estas asociaciones suelen realizarse recocidos [9].

La solidificación durante los procesos de colada no solo originan la formación de dendritas, sino al mismo tiempo se generan unos tamaños de grano muy grandes, lo que hace, según la relación de Hall-Petch que las propiedades mecánicas disminuyan, como son el límite elástico. Al mismo tiempo defectos durante la colada pueden surgir, como partes cerámicas procedentes del proceso de moldeo que pueden quedarse atrapadas en el interior, lo que contribuye significativamente a una reducción en cuanto a la resistencia a fatiga. Para evitar este tipo de problemas se ha tomado el camino de la fabricación mediante pulvimetalurgia, siendo muy usado el F75 y

acompañado de un proceso de HIP (aprox. 100 MPa a 1100°C durante 1 hora), contribuyendo así a la formación de un tamaño de grano mucho menor de las coladas [9].

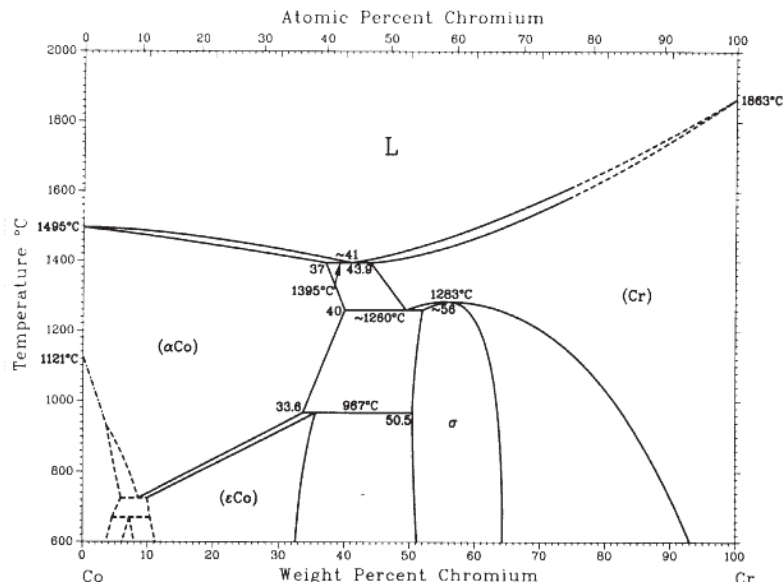


Figura 23: Diagrama de fases del CoCr.

Table 2 Co-Cr crystal structure data

Phase	Composition, wt% Cr	Pearson symbol	Space group
(αCo)	0–40	<i>cF4</i>	<i>Fm</i> $\bar{3}m$
(εCo)	0–36	<i>hP2</i>	<i>P6</i> $\bar{3}/mmc$
(αCr)	43.9–100	<i>cI2</i>	<i>Im</i> $\bar{3}m$
σ	50.5–63	<i>tP30</i>	<i>P4</i> $\bar{2}/mmm$
Metastable phases			
(α'Cr)	~16	<i>cI2</i>	<i>Im</i> $\bar{3}m$
(α'Co)	40–62.9	<i>cF4</i>	<i>Fm</i> $\bar{3}m$
(δCr)	54–100	<i>cP8</i>	<i>Pm</i> $\bar{3}n$
Co ₃ Cr	23	<i>hP8</i>	<i>P6</i> $\bar{3}/mmc$

Figura 24: Datos de la estructura del CoCr.

Table 5 Compositions of cobalt-base surgical implant alloys

ASTM specification	Composition, wt%								
	Co	Cr	Ni	Mo	Fe	C	Mn	Si	Other
F75	bal	27.0–30.0	1.0	5.0–7.0	0.75	0.35	1.0	1.0	...
F90	bal	19.0–21.0	9.0–11.0	...	3 (max)	0.05–0.15	1.0–2.0	0.4	14.0–16.0 W
F562	bal	19.0–21.0	33.0–37.0	9.0–10.5	1 (max)	0.025 (max)	0.15 (max)	0.15 (max)	1.0 Ti (max)

Table 6 Mechanical properties of cobalt-base surgical implant alloys

ASTM specification	Alloy system	Condition	Yield strength		Tensile strength			Elastic modulus	
			MPa	ksi	MPa	ksi	Elongation, %	GPa	10 ⁶ psi
F75	Co-Cr-Mo	Cast	450	65	655	95	8	248	36
F799	Co-Cr-Mo	Thermomechanically processed	827	120	1172	170	12
F90	Co-Cr-W-Ni	Wrought	379	55	896	130	...	242	35
F562	Co-Ni-Cr-Mo	Annealed	241–448	35–65	793–1000	115–145	50	228	33
		Cold-worked and aged	1586	230	1793	260	8

Figura 25: Composiciones de varias aleaciones de cobalto destinadas a implantes quirúrgicos y sus propiedades mecánicas.

Las aleaciones de CoCrMo pueden poseer diferentes microestructuras dependiendo de los tratamientos termo-mecánicos que se le apliquen. Como elementos que adquieren gran importancia se encuentra el cromo, que mejora la resistencia a la corrosión y aumenta su resistencia debido a la formación de M_7C_3 y $M_{23}C_6$, el molibdeno aumenta las capacidades mecánicas a través de la formación de Co_3M y M_6C , el níquel estabiliza la matriz centrada en caras, y mejora la fluidez, y el carbono que es el principal elemento para crear todos los carburos mencionados anteriormente [10]. Principalmente la matriz está formada, en el caso de las coladas, de una estructura dendrítica rica en cobalto con una estructura α -cobalto cúbica centrada en caras, acompañada de una segregación de carburos del tipo $M_{23}C_6$ que predominan principalmente en borde de grano con una morfología que puede ser de tipo laminar y en forma de aglomeraciones. Mediante los diferentes tratamientos posteriores que se pudieran realizar sería posible principalmente distribuir los aglomerados en toda la matriz, y disminución de granos que originará cambios importantes en las propiedades mecánicas de la matriz.

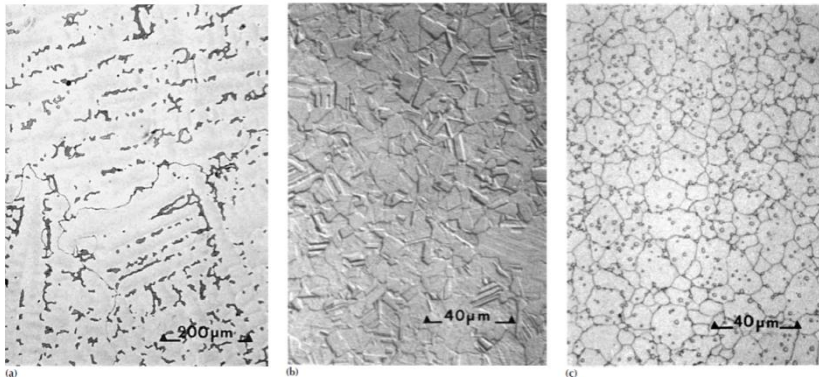


Figura 26: Izquierda: Microestructura de Co-Cr-Mo de izquierda a derecha mediante proceso de microfusión, forja y HIP.

4.5. Tratamientos térmicos.

Adicionalmente a la pulvimetalurgia, las aleaciones de CoCrMo para implantes ortopédicos son principalmente coladas y forjadas. Las aleaciones fundidas muchas veces son complicadas de mecanizar, por lo que se intenta minimizar esta operación al máximo fabricando geometrías más simples. Pero el proceso de colada de estas aleaciones tiene el problema de que no todas la pieza posee un microestructura similar en todas las partes debido a la influencia de las velocidades de enfriamiento. Esto hace que las aleaciones coladas puedan ser posteriormente forjadas dando unas mejores propiedades estructurales y mecánicas. En el caso de la colada debido a los defectos inherentes a la colada como porosidad, falta de homogeneidad y su particular microestructura, las empresas fundidoras se encargan de dar un tratamiento posterior de solubilización, con el que se busca mejorar la estructura de colada provocando la rotura de los granos dendríticos y una redisolución de los carburos. Posteriormente a la solubilización el proceso se completa por algunas empresas fundidoras con un tratamiento de prensado isostático en caliente (hot isostatic press, HIP) con el fin de disminuir la porosidad característica proveniente del proceso de colada [11].

Como hemos mencionado los procesos de fabricación y los diferentes procesos térmicos y de solidificación pueden dar lugar a muchas diferentes transformaciones en la aleación. Estas variaciones de microestructuras se traducen en unos comportamientos diferentes en cuanto a su resistencia, elongación o resistencia a la corrosión. Los tratamientos térmicos de estas aleaciones pueden variar según la compañía de fabricación. Por ejemplo, uno

habitual es un doble tratamiento que consiste en una recocido por disolución a 1200°C durante 4 horas (en una atmosfera de vacío 5×10^{-1} Pa), seguido de un temple en nitrógeno de 1200°C a 800°C mediante una velocidad de enfriamiento de 50°C/min mínimo, y posteriormente enfriado al aire. El recocido de los materiales a temperaturas por debajo del eutéctico previene la formación de carburos y una homogenización de las concentraciones en las segregaciones dendríticas sin importantes pérdidas en las propiedades mecánicas.

Como segundo tratamiento, se emplea un HIP a $1200 \pm 10^\circ\text{C}$ durante 4 horas a una presión de aproximadamente 100 ± 5 MPa, con un enfriamiento en argón a una velocidad de 8-10 °C/min. Este Hip es suficiente para eliminar las porosidades existentes, y con el lento enfriamiento se pretende dar tiempo a la microestructura para que puedan acomodarse los carburos precipitados en la matriz. Una temperatura cercana a la del solidus, que es cercana a los 1230°C, en donde parte de la solución sólida empieza a fundirse, es la que favorece los movimiento de difusión [12]. En este proceso de calentamiento los precipitados pasan a predominar en el borde de grano, incluso consiguiendo un aumento del tamaño de estos, esto se debe al lento enfriamiento que se produce en el HIP debido a la velocidad de despresurización, en esta fase se pueden evidenciar carburos laminares en borde de grano [13]. En estas condiciones las propiedades mecánicas no son acordes con la ISO-5832 parte 4, y se emplea un siguiente tratamiento de solubilización final con una velocidad rápida de enfriamiento las condiciones deseadas, esto incrementa la ductilidad del material. Los típicos parámetros usados en este proceso son a 1200°C durante 4 horas en atmosfera inerte seguido de un rápido enfriamiento con ventilación a 800°C (50°C/min). Como su temperatura es parecida a la del HIP los efectos es que los carburos continúan difundiendo dentro de la matriz, y con el posterior enfriamiento por aire frío, las precipitaciones quedan restringidas, quedando gran parte de los carburos en la matriz, y dando como resultado una reducción drástica de los carburos en la matriz, y al mismo tiempo se produce una disminución del tamaño del grano.

4.6. Formato para ser procesado mediante SLM.

Para poder ser procesado un metal en cualquier tecnología de SLM, es imprescindible tener la aleación del material en un formato esférico para favorecer su fluidez y reducir su propensión al apelmazamiento, todo ello para conseguir un manto de polvo homogéneo en el proceso de reparto del material en capas.

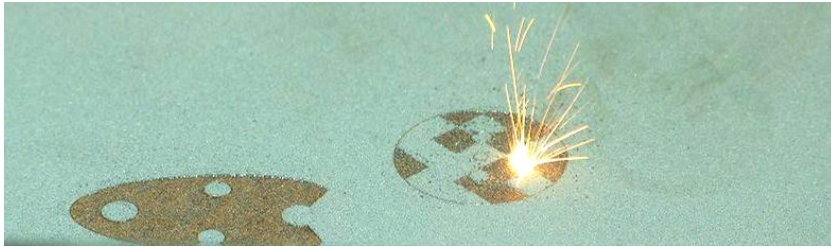


Figura 27: Imagen de fabricación de piezas en tecnología SLM con un buen reparto del polvo, no se aprecian defectos de apelmazamiento ni arrastres producidos por el repartidor o “coater”.

La atomización por gas es el proceso más utilizado para la fabricación de polvos para SLM. El metal se funde en un crisol por inducción y se hace pasar por el fondo del mismo en estado líquido, es entonces cuando es atomizado con un gas inerte a alta presión. La fuerza del gas de atomización desintegra la columna de metal fundido en pequeñas gotas las cuales solidifican rápidamente en partículas en polvo mientras caen a través de la torre de refrigeración. El gas transporta el polvo a un colector cíclico y después este es recogido [14].

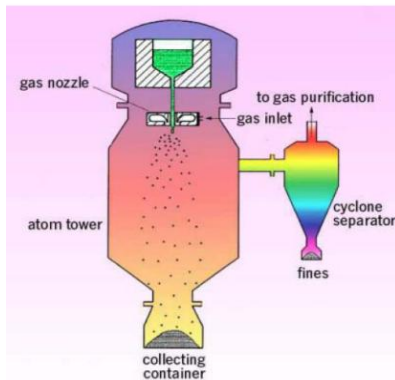


Figura 28: Izquierda: Esquema del proceso de atomización por gas [14]. Derecha: Muestra de polvos de CoCrMo ASTM F75 fabricado mediante atomización por gas.

4.7. Análisis físico - químico del material para el ensayo.

El polvo fabricado atomización por gas para el estudio, tiene una morfología esférica y su tamaño está comprendido entre 10 μm y 38 μm de diámetro. (Según especificaciones del fabricante).

Para analizar la composición de los polvos utilizados y obtener los elementos que componen la aleación, se ha utilizado un microscopio electrónico de

barrido modelo JEOL JSM 6400 provisto de microanálisis por fluorescencia de rayos-X mediante discriminación de energías INCA disponible en las instalaciones de AIMME.

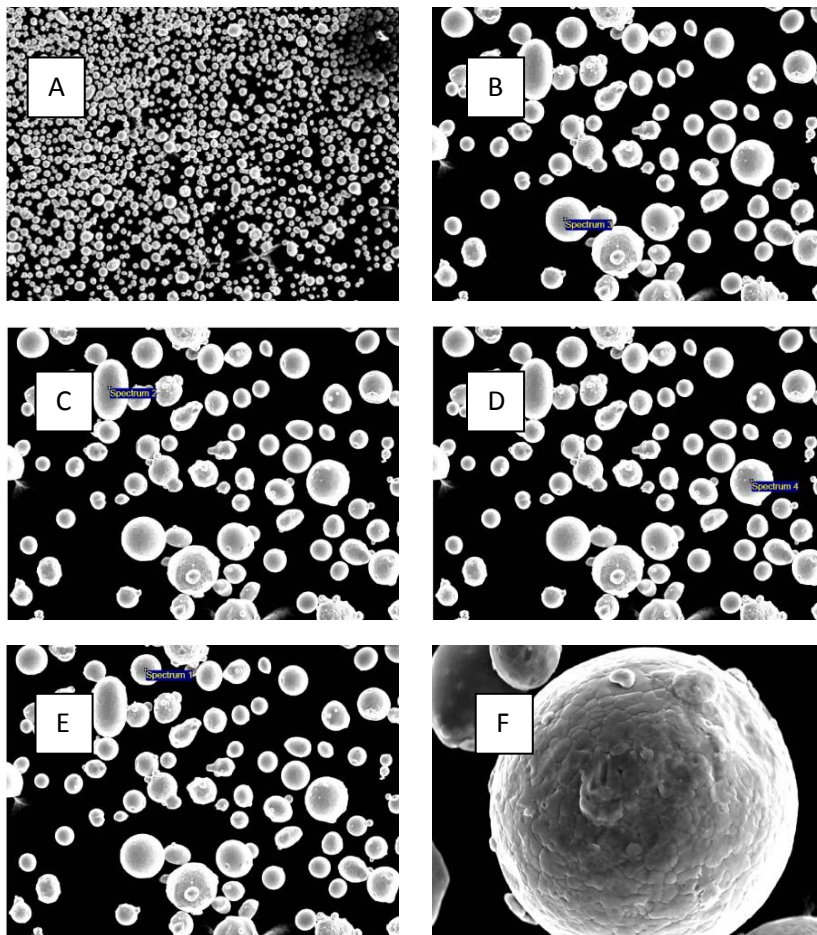


Figura 29: A: Imagen SEM mostrada a X100, B, C, D y E: Imágenes SEM mostradas a X400. F: Imagen SEM mostrada a X2500.

Element	Weight (%)	Weight (%)	Weight (%)	Weight (%)	Media (%)
Si	0,22	0,64	0,37	0,7	0,48
Cr	33,13	29,12	28,55	28,43	29,81
Mn	2,37	1,08	0,79	1,13	1,34
Fe	0,21	0,27	0,15	0,21	0,21
Co	61,86	64,03	63,73	63,55	63,29
Mo	2,4	5,05	6,76	5,84	5,01

Figura 30: Tabla resumen de los elementos que conforman la aleación de CoCrMo ASTM75 preparada para ser procesada mediante SLM.

TABLE 1 Chemical Composition

Element	Composition, % (Mass/Mass)	
	min	max
Chromium	27.00	30.00
Molybdenum	5.00	7.00
Nickel	...	0.50
Iron	...	0.75
Carbon	...	0.35
Silicon	...	1.00
Manganese	...	1.00
Tungsten	...	0.20
Phosphorous	...	0.020
Sulfur	...	0.010
Nitrogen	...	0.25
Aluminum	...	0.10
Titanium	...	0.10
Boron	...	0.010
Cobalt ⁴	balance	balance

Figura 31: Tabla de composición de la aleación CoCrMo según la norma ASTM F75-07 [15].

Según los resultados de composición obtenidos del polvo de CrCrMo, se puede concluir, que se ajusta a la composición marcada por la norma ASTM F75 en el porcentaje de todos sus aleantes a excepción del Mn que se excede de la cuantía marcada por la norma. Según dicha norma la cantidad máxima de Mn debe ser como máximo del 1% y se ha obtenido un valor promedio de 1.34%.

5. METODOLOGÍA: DISEÑO DE EXPERIMENTOS FACTORIALES.

El método planteado para alcanzar los objetivos, consiste en realizar un diseño de experimentos donde se varíen las cuatro variables estimadas como más influyentes en el proceso de fusión de la tecnología SLM de la máquina M3-linear disponible en AIMME. Se fabricará una probeta de dimensiones adecuadas para los estudios de estructura y porosidad, de tamaño 5mm*5mm*10mm, por cada una de las configuraciones resultantes y se analizarán los resultados obtenidos en dicha fabricación.

Para ello se ha empleado un procedimiento de diseño factorial de experimentos, que constituye una herramienta más potente que los diseños experimentales clásicos en los que se estudia el efecto de cada variable de manera independiente.

Este tipo de procedimiento de diseño y análisis estadístico de los resultados experimentales, es especialmente apropiado para optimización de procesos en los cuales se precisa controlar varias variables de manera independiente, pero cuyos efectos individuales e interacciones no se conocen con precisión a priori. Los diseños factoriales son también especialmente eficientes en fases iniciales de un proceso de investigación, ya que permiten detectar cuales son las variables que mayores efectos generan, identificar efectos interactivos entre variables, y permiten definir o afinar los rangos de valores en los cuales podría ser de interés en un estudio más exhaustivo en fases siguientes de investigación [4].

En un diseño de experimentos factorial, el número total de experiencias crece conforme se incrementa el número de variables o factores “f” y los niveles de cada variable “n”, de modo que se cumple la relación:

$$N = n*f$$

En dicha tecnología de fabricación, se pueden llegar a modificar más variables que pueden llegar a influir en el procesado de polvo metálico en SLM pero en este trabajo se van a abordar exclusivamente las cuatro que a priori se consideran más influyentes después de haber hecho un trabajo de análisis de todas las disponibles. (ver apartado 6. Descripción del proceso de fabricación SLM y control de variables).

Estudiando los efectos de las cuatro variables consideradas como más incluyentes, $f=4$ a 3 niveles, se obtiene un número total de experimentos muy elevado: $N = 81$ experimentos. Si se estudian a 2 niveles, el número de experiencias es mucho menor $N=16$, pero se tiene la limitación de que algunas variables de interés, de las que se conoce a priori su efecto directo sobre el aporte térmico, varíen limitando el estudio de sus efectos. Por esta razón se ha decidido incrementar el número de niveles de la variable “velocidad de avance del láser” a 4, lo que permite tener un rango mayor de esta variable. En realidad, lo descrito anteriormente, es similar a realizar dos diseños completos a dos niveles de tipo 24. En un experimento se cubren dos niveles de la variable y en otro se estudian otros dos niveles. Este tipo de diseños se denominan experimentos factoriales complejos y el análisis matemático de los efectos es bastante más complicado que cuando se emplean diseños factoriales simples. Afortunadamente, mediante el empleo de paquetes informáticos como Statgraphics es posible el diseño y análisis rápido de conjuntos de experimentos de este tipo.

Los niveles por cada variable han sido seleccionados de manera que la combinación de variables y niveles se obtuviera una cantidad suficientemente representativa.

Los valores de cada variable han sido seleccionados de manera que con la combinación de los mismos se obtuviera un rango de aporte energético que fuera capaz de fundir el metal a estudio, basándonos en experiencias previas de procesado de AISI 316L DIN1.4404 y acero DIN 1.2709.

Las variables seleccionadas para el estudio han sido:

- Velocidad de avance del láser (Var 1): Modificada en cuatro niveles (150, 200, 250 y 300 mm/s). Esta variable afecta de modo inverso a la energía aportada y a la sección fundida, y en sentido contrario, afecta directamente a la productividad.
- Solape entre pasadas (Var 2): Modificada en dos niveles (0.12 y 0.16 mm).
- Espesor de capa de polvos a fundir (Var 3): Modificada en dos niveles (fusión en cada capa $30\mu\text{m}$ y cada dos capas $60\mu\text{m}$).
- Velocidad de avance del láser durante la fusión del perímetro de las piezas: Modificada en dos niveles (300 y 500 mm/s).

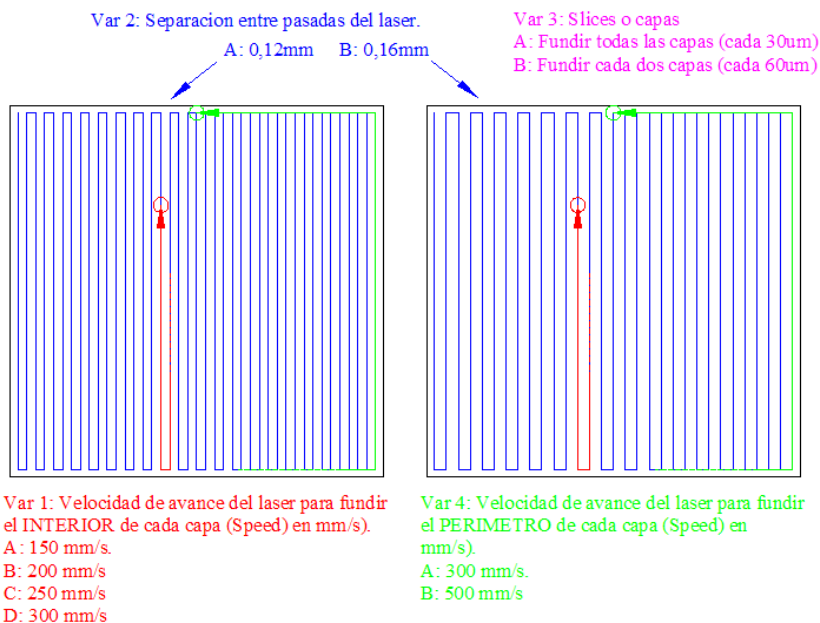


Figura 32: Esquema de las variables y niveles por cada variable que van a definir diferentes configuraciones de procesado para el mismo material.

El diseño experimental obtenido, con valores codificados de cada factor o variable a estudiar, se indica en la siguiente tabla (figura 31). El valor -1 corresponde a la variable en su nivel más bajo, y el valor +1 a la variable en su valor más alto.

NIVEL EN EXPERIMENTOS	-1	-0,33	0,33	1
Var1: Speed (mm/s)	150	200	250	300
Var2: a1	0.6d			0.8d
Var3: slices	1			2
Var4: contour speed (mm/s)	300			500

Figura 33: Diseño experimental factorial empleado

Para cada una de las 32 condiciones de procesado, se ha fabricado una pieza prismáticas de tamaño 5mm*5mm*10mm. Se ha trabajado en todos los casos con una potencia constante del láser de 100W y un diámetro de láser 0.2mm, en atmósfera controlada de nitrógeno, con una presión parcial de oxígeno de $7 \cdot 10^{-4}$ atm.

Configuración	Var 1: Velocidad de avance del láser para fundir el INTERIOR de cada capa (Speed) en (mm/s).	Var 2: Separación entre pasadas del láser. (d=0,2mm)	Var 3: Slices o capas	Var 4: Velocidad de avance del láser para fundir el PERÍMETRO de cada capa (Speed) en (mm/s).
1	-1	-1	-1	-1
2	-0,333333	-1	-1	-1
3	0,333333	-1	-1	-1
4	1	-1	-1	-1
5	-1	1	-1	-1
6	-0,333333	1	-1	-1
7	0,333333	1	-1	-1
8	1	1	-1	-1
9	-1	-1	1	-1
10	-0,333333	-1	1	-1
11	0,333333	-1	1	-1
12	1	-1	1	-1
13	-1	1	1	-1
14	-0,333333	1	1	-1
15	0,333333	1	1	-1
16	1	1	1	-1
17	-1	-1	-1	1
18	-0,333333	-1	-1	1
19	0,333333	-1	-1	1
20	1	-1	-1	1
21	-1	1	-1	1
22	-0,333333	1	-1	1
23	0,333333	1	-1	1
24	1	1	-1	1
25	-1	-1	1	1
26	-0,333333	-1	1	1
27	0,333333	-1	1	1
28	1	-1	1	1
29	-1	1	1	1
30	-0,333333	1	1	1
31	0,333333	1	1	1
32	1	1	1	1

Configuración	Var 1: Velocidad de avance del láser para fundir el INTERIOR de cada capa (Speed) en (mm/s).	Var 2: Separación entre pasadas del láser. (d=0,2m)	Var 3: Slices o capas	Var 4: Velocidad de avance del láser para fundir el PERÍMETRO de cada capa (Speed) en (mm/s).
1	150	0.6d	1	300
2	200	0.6d	1	300
3	250	0.6d	1	300
4	300	0.6d	1	300
5	150	0.8d	1	300
6	200	0.8d	1	300
7	250	0.8d	1	300
8	300	0.8d	1	300
9	150	0.6d	2	300
10	200	0.6d	2	300
11	250	0.6d	2	300
12	300	0.6d	2	300
13	150	0.8d	2	300
14	200	0.8d	2	300
15	250	0.8d	2	300
16	300	0.8d	2	300
17	150	0.6d	1	500
18	200	0.6d	1	500
19	250	0.6d	1	500
20	300	0.6d	1	500
21	150	0.8d	1	500
22	200	0.8d	1	500
23	250	0.8d	1	500
24	300	0.8d	1	500
25	150	0.6d	2	500
26	200	0.6d	2	500
27	250	0.6d	2	500
28	300	0.6d	2	500
29	150	0.8d	2	500
30	200	0.8d	2	500
31	250	0.8d	2	500
32	300	0.8d	2	500

Figura 34: Izquierda: Diseño experimental del que se obtienen 32 configuraciones diferentes de procesado mediante el software estadístico statgrafs plus 5.1. Derecha: 32 Configuraciones diferentes para procesar CoCrMo ASTM F75, las demás variables del proceso van a mantenerse fijas en los valores predeterminados del software.

Los resultados a evaluar se van a obtener de medir la porosidad, la dureza y estudiar la estructura metalográfica de las 32 probetas fabricadas en dos planos perpendiculares, una sección paralela a las capas, en el plano horizontal XY, y otra sección perpendicular a esta y alineada en la dirección de crecimiento de las capas, plano vertical XZ. El análisis estadístico de los resultados experimentales se llevará a cabo con ayuda del software Statgraphics Plus 5.1. [16].

6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN SLM y CONTROL DE VARIABLES.

6.1. Parámetros del láser.

Los parámetros de procesado de la tecnología para fundir el material, se configuran en el software de control del láser “concept láser machine software”. De las variables modificables, se va a realizar una valoración pormenorizada de su influencia para obtener un material 100% denso, con la finalidad de identificar las cuatro variables más influyentes tenidas en cuenta en el diseño de experimentos realizado en el apartado anterior. Las variables se van a clasificar en:

FIJA: Significa que no se va a incluir en el diseño de experimentos y por tanto el valor de dicha variable será el predeterminado del software y por tanto el mismo en las 32 configuraciones resultantes.

A MODIFICAR: Significa que se va a incluir en el diseño de experimentos y por tanto el valor de dicha variable será modificada en varios niveles. El número mínimo de niveles es de 2 en el número máximo de niveles se va a fijar en 4.

DESACTIVADA: Significa que dicha variable o variables no son modificables para SLM, solo están activas en marcado láser o erosión 3D. Las probetas que se van a fabricar en el presente estudio no van a necesitar soportes por ello, en este caso, los parámetros de modificación del soportes también van a estar desactivados.

A continuación se va a explicar el significado de cada una de las variables del proceso y su influencia en el mismo para terminar concretando si dicha variable se considera Fija, a modificar o desactivada para el diseño de experimentos. Adicionalmente en el caso de las variables a modificar, se va a especificar los niveles de dicha variable.

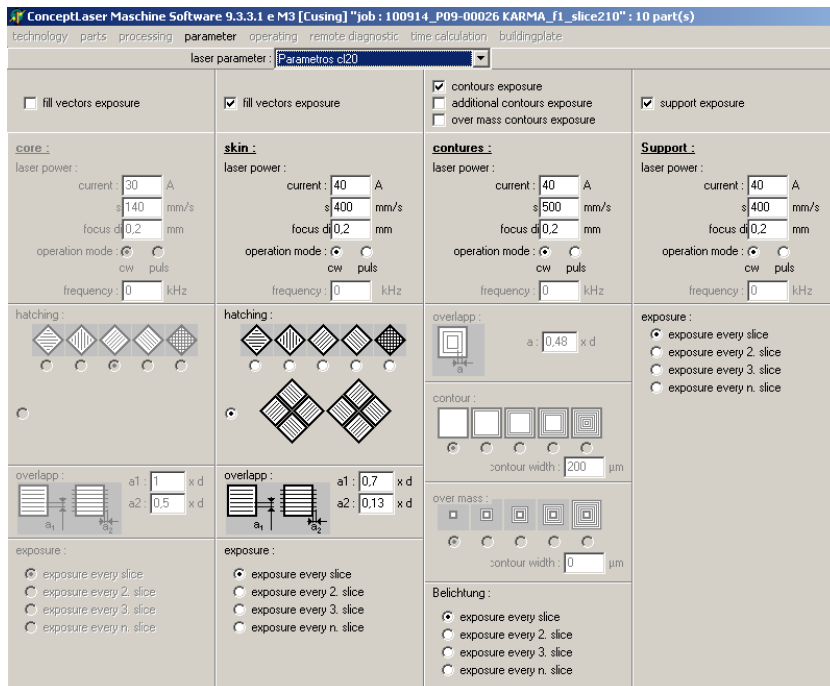


Figura 35: Presentación de interface del “concept láser machine software” de la máquina M3-linear del fabricante concept-láser GMBH desde donde se modifican los parámetros relacionados con el láser.

1. Skin/ láser power/ Current:

La potencia máxima teórica del láser es de 100W, la potencia se asigna directamente mediante el amperaje de modo que hay que ajustarlo para que la potencia de trabajo esté cerca de los 100W aconsejables para tener máxima productividad sin llegar a producir inestabilidad en el láser. Con 40A se consiguen potencias de 100W +/- 2 watios. Este dato se va a considerar como fijo ya que no conviene ni subirlo (inestabilidad del láser y menor duración del mismo) ni bajarlo (se reduciría la productividad), Por todo lo anterior, todo el estudio se va a realizar a 40 A que con ellos la máquina obtiene una potencia medida con el software de la máquina de **100W**.

Esta variable va a ser considerada como FIJA.

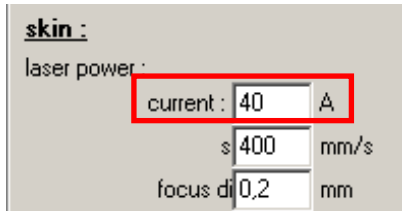


Figura 36: Skin/ láser power/ Current

2. Skin/ láser power/ s:(speed)

Para fundir el metal en el interior de cada pieza, el láser va a describir trayectorias lineales de ida y vuelta de modo que va a barrer de manera continua el polvo de dicha capa. Este parámetro mide la velocidad de avance del láser en mm/s. La velocidad del láser es modificable al valor que se desee no siendo posible asignar aceleraciones.

La variable “s: speed” va a ser considerada como A MODIFICAR a cuatro niveles que son 150, 200, 250 y 300mm/s.

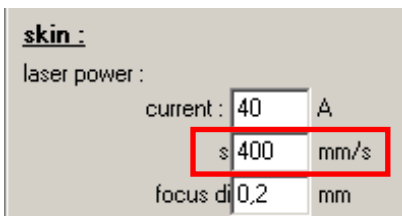


Figura 37: Skin/ láser power/ s:(speed).

3. Skin/ láser power/ Focus diameter:

Es posible modificar el valor del diámetro del láser, el mínimo es 0.2mm de diámetro cuando se consigue el máximo enfoque, subiendo dicho diámetro se obtiene menor intensidad por unidad de área además de menor precisión por lo que en este estudio se va a dejar como fijo el diámetro del láser en **0.2mm**. Esta variable va a ser considerada como FIJA.

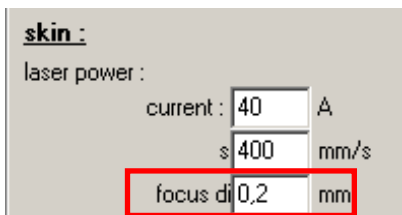


Figura 38: Skin/ láser power/ Focus diameter.

4. Skin/ láser power/ Operation mode:

Es posible que el láser actúe en continuo (CW) o mediante arco pulsado (PULS) (aporte de energía discontinua), en este estudio se va a trabajar en modo CW ya que se pretende tener una fusión continua y homogénea.

Esta variable va a ser considerada como FIJA en CW.

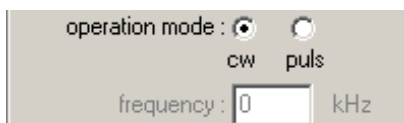


Figura 39: Skin/ láser power/ Operation mode.

5. Hatching:

Se pueden utilizar distintas estrategias denominadas “**Hatching**” para fundir el material. Esta variable rige cual va a ser la estrategia de barrido que va a seguir el láser para fundir todo el polvo del interior de cada capa.

La tecnología subdivide el área a fundir en subáreas de 5x5mm que va a poder fundir en varias estrategias que se seleccionan en esta variable.

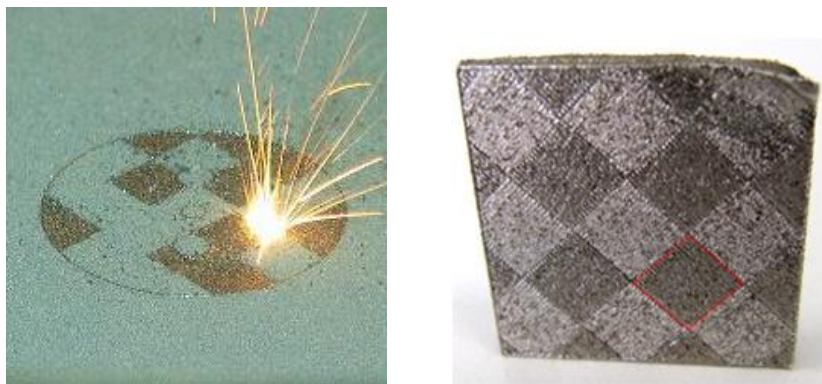


Figura 40: Izquierda: Imagen del láser procesado las áreas de 5x5mm mediante u estrategia de dámero. Derecha: Resultado visual obtenido mediante estrategia de damero.

Por lo general, el fabricante de la tecnología recomienda utilizar una estrategia de “hatching” denominada en “damero” palabra heredada del tablero

del ajedrez por el resultado visual que se obtiene. Esta estrategia minimiza las deformaciones por tensiones generadas en la fusión del material ya que se funden las subáreas de 5x5mm en un recorrido no consecutivo sino aleatorio lo que implica un reparto térmico más homogéneo en la capa a procesar.

La estrategia de fusión del material en el presente estudio se realiza con un avance paralelo a la cara de las probetas sin dámero ya que se quiere obtener la misma dirección de la fusión en la todas las muestras.

Esta variable va a ser considerado como FIJA en la estrategia marcada en la figura 39 con un círculo rojo.

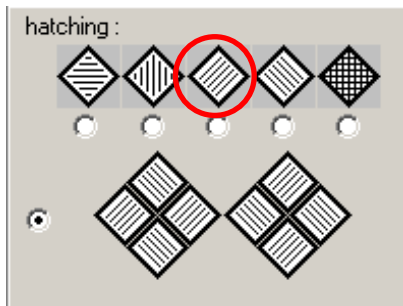


Figura 41: Hatching.

6. Overlapp o Solape:

Está compuesto por dos variables. a1 y a2.

La variable (a1) mide la distancia entre centros de las pasadas de láser. Esta medida es dependiente al diámetro del láser, por tanto, para saber la medida real que se va aplicar hay que multiplicar el dato de a1 x diámetro del láser (0.2mm). Como ejemplo, si introducimos en el campo a1 el valor de 0.7, obtendremos un valor de separación entre pasadas del láser de (a1) = $0.7 * 0.2\text{mm} = 0.14\text{mm}$.

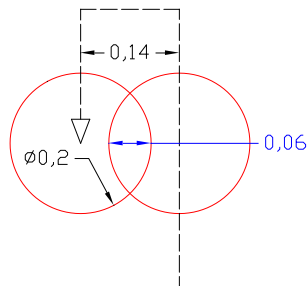


Figura 42: Esquema que muestra la separación entre pasadas paralelas del láser y que están regidas por el parámetro a1. Esta sería la distancia entre los centros de dos trayectorias consecutivas del láser de manera que habría un solape de 0.06mm.

La variable (a2) rige la distancia entre las pasadas del láser de dos subáreas de 5x5mm. Entre las subáreas de 5x5mm debe haber un solape que garantice continuidad entre ambas zonas. Esta medida también es dependiente del diámetro del láser, por tanto, para saber la medida real de (a2) hay que multiplicar el valor que se asigna en dicho campo por el diámetro del láser (0.2mm). Como ejemplo, si introducimos en el campo (a2) el valor de 0.13, tendremos un valor de $a2=0.13 \times 0.2\text{mm} = 0.026\text{mm}$.

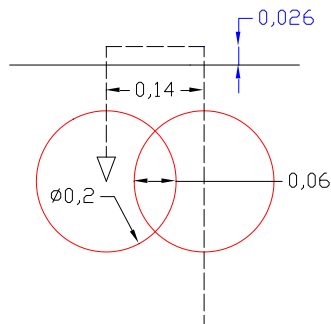


Figura 43: Esquema que muestra la separación entre subáreas de 5x5 mm regidas por el parámetro a2.

La variable a2 va a ser considerada como FIJA. La variable “a1” va a ser considerada como A MODIFICAR en dos niveles, en el campo (a1) se va a introducir los valores 0.6 y 0.8 con los que se va a obtener una separación entre pasadas del láser de 0.12 y 0.16mm respectivamente.

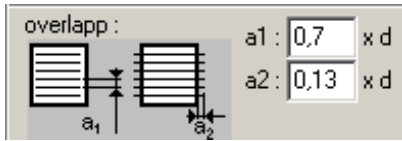


Figura 44: Overlapp o Solape regido por dos variables independientes a_1 y a_2 .

7. Exposure:

El proceso de fabricación consiste en la deposición de capas sucesivas de polvo y la fusión selectiva en cada capa, este hecho motiva la fusión del polvo con el material procesado en la capa anterior. El parámetro “exposure” nos ofrece la posibilidad de fundir todas las capas de material o, para aumentar la velocidad de fabricación, solo fundir el polvo cada 2, 3 o más capas, de esta manera, se puede aumentar la velocidad de fabricación.

Esta variable va a ser considerada como A MODIFICAR a dos niveles. Se va a seleccionar entre fundir todas las capas “every slice” y fundir cada dos capas de polvo depositadas “every2. slice”.

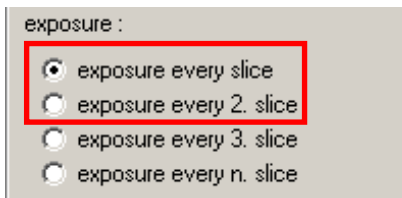


Figura 45: Exposure.

8. Contures:

El procesamiento del contorno de cada pieza va a determinar la calidad superficial obtenida, mediante la activación de estos parámetros podemos fundir el contorno de la pieza una sola vez o más veces de manera continuada en la misma capa.

Esta variable va a ser considerada como FIJA en contours exposure de manera que el láser va a procesar el contorno en cada probeta una vez por cada capa.

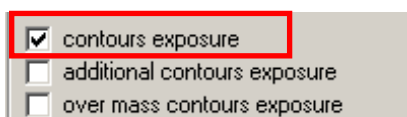


Figura 46: Contures.

9. Contures/ láser power/ Curent:

Al igual que para procesar el interior de cada pieza, para procesar el perímetro también es aconsejable trabajar a la máxima potencia en la que el láser es estable de modo que esta variable se va a considerar como fija en 40 A con los que se obtienen 100W. Esta variable va a ser considerada como FIJA.

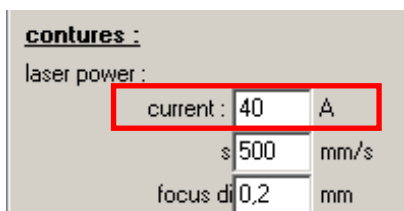


Figura 47: Contures/ láser power/ Current.

10. Contures/ láser power/ s:(speed)

Para fundir el metal en el contorno de cada pieza, el láser va a barrer el perímetro de cada probeta. Este parámetro mide la velocidad de avance del láser en mm/s. La velocidad del láser es modificable al valor que se desee no siendo posible asignar aceleraciones.

La variable “contour speed” va a ser considerada como A MODIFICAR en dos niveles que son 300 y 500 mm/s.

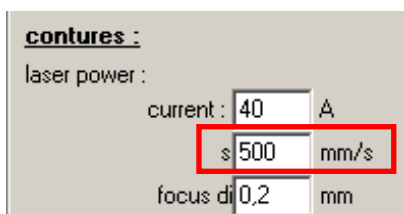


Figura 48: Contures/ láser power/ speed.

11. Contures/ láser power/ focus diameter:

Es posible modificar el valor del diámetro del láser también para procesar el contorno de la capa, el mínimo es 0.2mm de diámetro cuando se consigue el máximo enfoque, subiendo dicho diámetro se obtiene menor intensidad por unidad de área además de menor precisión por lo que en este estudio se va a considerar como fijo el diámetro del láser en **0.2mm**.

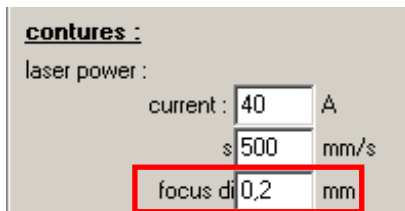


Figura 49: Contures/ láser power/ focus diameter.

12. Otras variables:

Existen otras variables en el menú de modificación de las estrategias de procesado pero solo están activas cuando se pretende realizar un marcado láser o una erosión 3D, por tanto, no son parámetros modificables para el proceso de fusión selectiva por láser (SLM)

Estas variables se consideran como DESACTIVADAS.

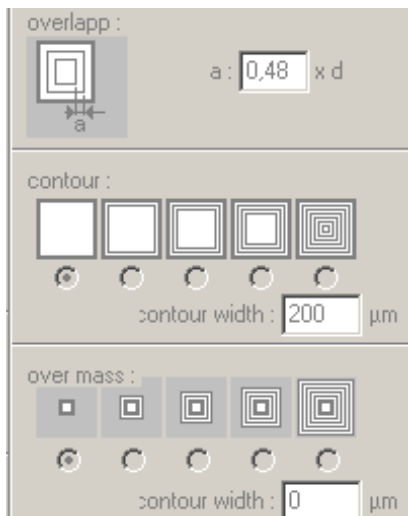


Figura 50: Estrategias de procesado del láser para marcado y erosión 3d desactivados en el módulo de SLM.

13. Belichtung:

La variable “Belichtung” nos ofrece la posibilidad de fundir el perímetro de las piezas en todas las capas o en cada 2, 3 o más capas.

Esta variable a ver considerada como FIJA en la primera de las opciones de manera que el perímetro de las piezas será procesado en todas las piezas y en todas las capas.

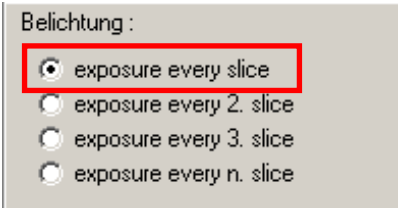


Figura 51: Belichtung.

14. Suport exposure:

Los soportes son, en el caso de la SLM, estructuras del mismo material que la pieza y cuya función es fijarlas a la placa de fabricación, evitar desprendimientos de parte de las piezas a fabricar y transmitir la temperatura desde la capa que se está fundiendo hasta la placa de fabricación disipando el calor y contribuyendo al cambio de estado líquido a sólido del metal.

Los parámetros de proceso ideales para procesar soporte se obtendrán de los resultados del presente estudio y serán aquellos parámetros de mayor velocidad de procesamiento que consiga material continuo.

Los parámetros de “Support exposure” no van a ser utilizados ya que las piezas a fabricar no van a disponer de soportes sino que van a estar ancladas a la placa de fabricación directamente.

Estos parámetros se consideran como DESACTIVADOS.

support exposure

Support :

laser power :

current : A

 s mm/s

focus di mm

operation mode :

 cw puls

frequency : kHz

exposure :

exposure every slice

exposure every 2. slice

exposure every 3. slice

exposure every n. slice

Figura 52: Suport exposure.

A modo de resumen, cabe destacar que la modificación de cualquiera de las variables del “Concept Láser Maschine Software” haría modificar los resultados de fusión obtenidos en el material, no obstante para limitar el tamaño del diseño de los experimentos se ha considerado hacer un selección de las cuatro variables más importantes en la fusión del polvo metálico en la tecnología SLM utilizada en el estudio.

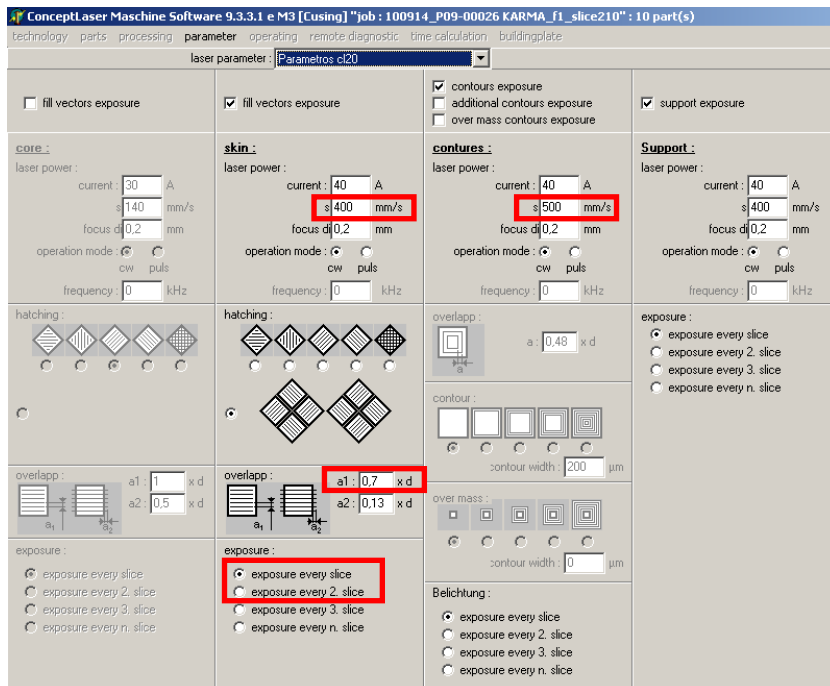


Figura 53: Los recuadros en color rojo indican las variables que van a ser modificadas para obtener las configuraciones diferentes de fabricación, los demás parámetros se van a dejar fijos en el valor predeterminado.

6.2. Diseño de las probetas.

Cada una de las 32 configuraciones se va a aplicar a la fabricación de una probeta que permita seccionarla en dos planos para evaluar la porosidad, la dureza y la estructura metalográfica obtenida para cada configuración de procesado.

Para fabricar las 32 probetas se ha elegido un poliedro de $X=5\text{mm} * Y=5\text{mm} * Z=10\text{mm}$ con el objetivo de poder realizar con posterioridad dos cortes, uno en el plano XY y otro en el plano plano XZ.

Se van a distribuir las 32 probetas en la placa de fabricación con una separación entre ellas de 1mm.

La identificación de cada probeta se va a realizar mediante la numeración de las mismas del 1 al 32.

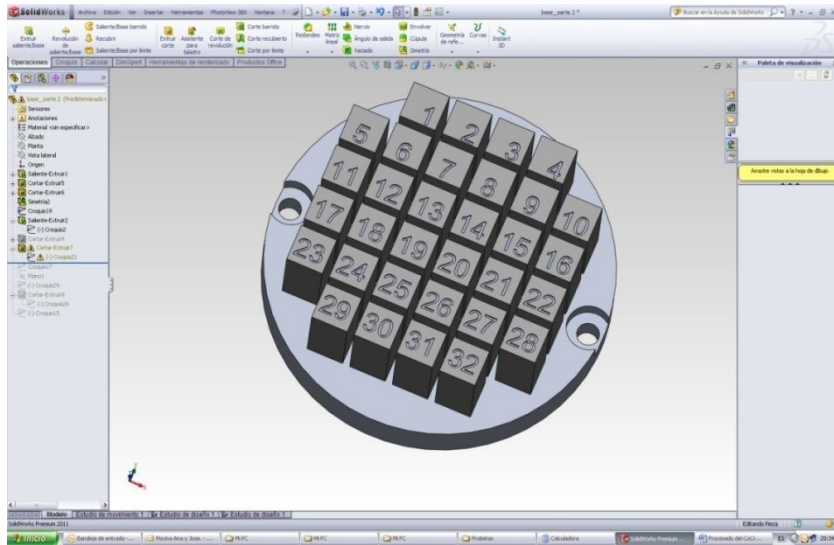


Figura 54: Representación en CAD 3D mediante el software de diseño mecánico solidworks de las 32 probetas con su correspondiente numeración que las identifica con sus parámetros de procesado.

6.3. Fabricación de las probetas.

En el caso que alguna o algunas de las configuraciones de menor aporte energético no consiguiera procesarse adecuadamente, se había previsto la posibilidad de interrumpir selectivamente la fabricación de dichas probetas en el momento se empezó a apreciarse un procesado inadecuado que pudiera originar arrastres incontrolados de material y posibles roturas de la fabricación.

La producción de las probetas se realiza en la Máquina M3-linear del fabricante Concept Láser GmbH disponible en las instalaciones de AIMME.

La fusión del material, se realiza en un cámara interior de la máquina en una atmosfera controlada para limitar los procesos de oxidación. Durante el procesado del material, se introduce Nitrogeno en la cámara con el que se reduce la concentración de Oxígeno a un promedio medio de 0.8%.



Figura 55: Máquina M3-linear del fabricante Concept Láser GmbH. en las instalaciones de AIMME.

Antes de empezar el proceso de fabricación hay que fijar una placa de acero denominada “placa de fabricación” en la zona de trabajo de la máquina sobre la cual se va a fabricar directamente las 32 probetas.

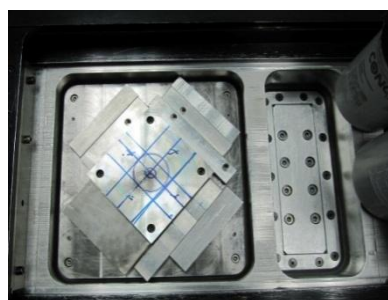


Figura 56: Izquierda: M3-linear con el módulo de SLM extraído de la máquina antes de introducir el polvo en los contenedores y fijar la placa de fabricación a la máquina. Derecha: Placa de fabricación anclada mediante 4 tornillos, alrededor se han colocado bloques de aluminio de relleno para minimizar la cantidad de polvo necesario en la fabricación. En la parte derecha de dicha imagen se puede ver el contenedor de polvo todavía vacío de polvo metálico.

A continuación, se llena manualmente la cámara de dosificación con suficiente polvo para toda la fabricación.



Figura 57: Botes de polvo de CoCrMo con 5Kgr de polvo cada uno de ellos.

Seguidamente, se empieza a repartir material de manera incremental hasta que el repartidor “coater” deja el polvo totalmente alineado con la parte superior de la placa de fabricación.

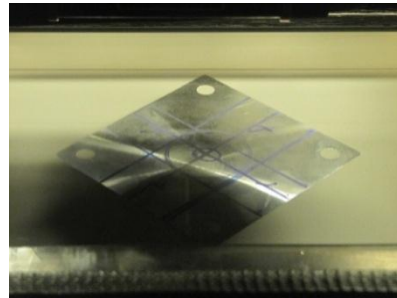


Figura 58: Izquierda: Técnico realizando las primeras pasadas del repartidor o coater para planear la superficie de polvo enrasándolo con la placa de fabricación. Derecha: Placa de fabricación enrasada con el polvo metálico de la aleación de CoCrMo para empezar el proceso de fabricación.

El siguiente paso es introducir el Módulo en el interior de la máquina, cerrar las puertas y conectar el nitrógeno para que empiece a bajar la concentración de Oxígeno en la zona de trabajo, en el momento la concentración de oxígeno llega a 0.7 empieza el proceso de fusión de la primera capa.

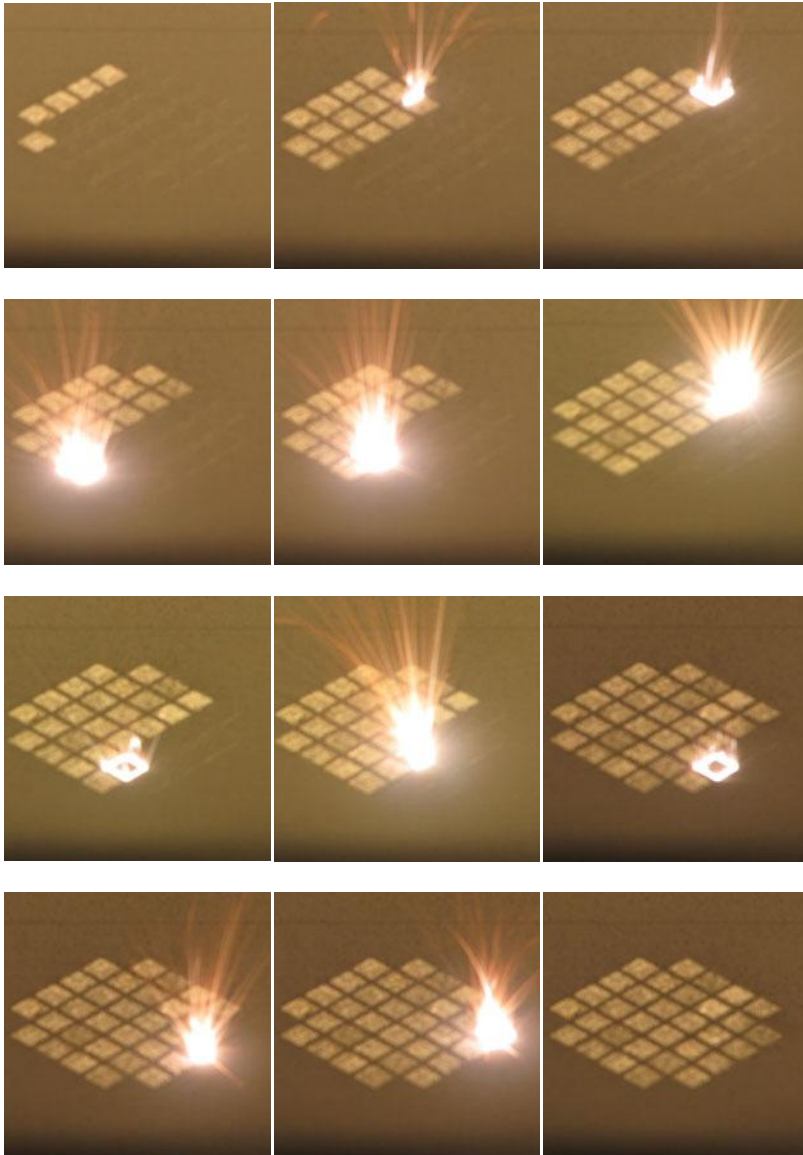


Figura 59: Las 12 imágenes muestran el procesado de la capa 166 correspondiente a la fabricación de la mitad de la altura de las probeta, primero se funde en perímetro de la probeta y a continuación el interior de la misma.

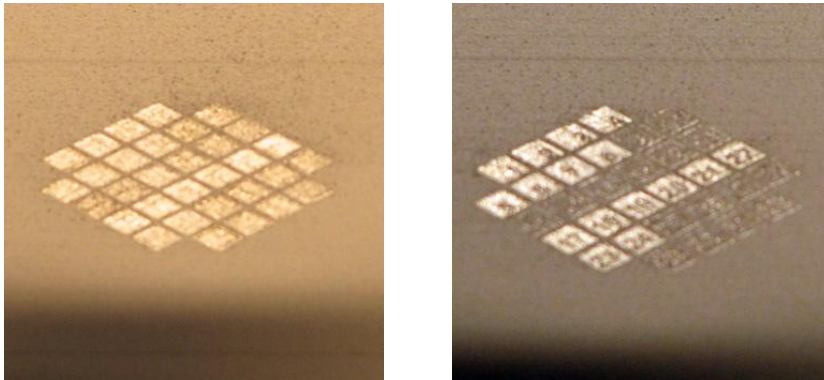


Figura 60: Izquierda: Procesado completo de capa 166. A mitad de proceso de fabricación se aprecia una diferencia sensible entre las probetas respecto al brillo y rugosidad superficial que hace indicar que va a haber diferencias importantes en los resultados que se van a obtener tras su posterior análisis. Derecha: Procesado completo de penúltima capa donde se aprecian los números de cada probeta que la relaciona con su configuración.

Tras la fabricación consecutiva de 333 capas en unas 12.28 horas, la máquina ha procesado los 10mm de altura de las 32 probetas y se procede a su extracción de la máquina y el filtrado del polvo sobrante que es reutilizado completamente para posteriores fabricaciones.



Figura 61: 32 probetas de CoCrMo ASTM F75 fabricadas en 32 configuraciones distintas de procesado mediante SLM. Vista lateral.



Figura 62: 32 probetas de CoCrMo ASTM F75 fabricadas en 32 configuraciones distintas de procesado mediante SLM. Vista planta.

La fabricación de las probetas se ha realizado en un entorno protector para minimizar la oxidación en la fusión de los metales mediante la introducción de Nitrógeno en el interior de la cámara de fusión. La máquina intenta trabajar con una concentración menor al 0.9% de Oxígeno de manera que cuando detecta que se llega a dicha concentración vuelve a insuflar Nitrógeno en la cámara de trabajo hasta que la concentración de Oxígeno llega a 0.7% momento en el que deja de insuflar dicho gas.

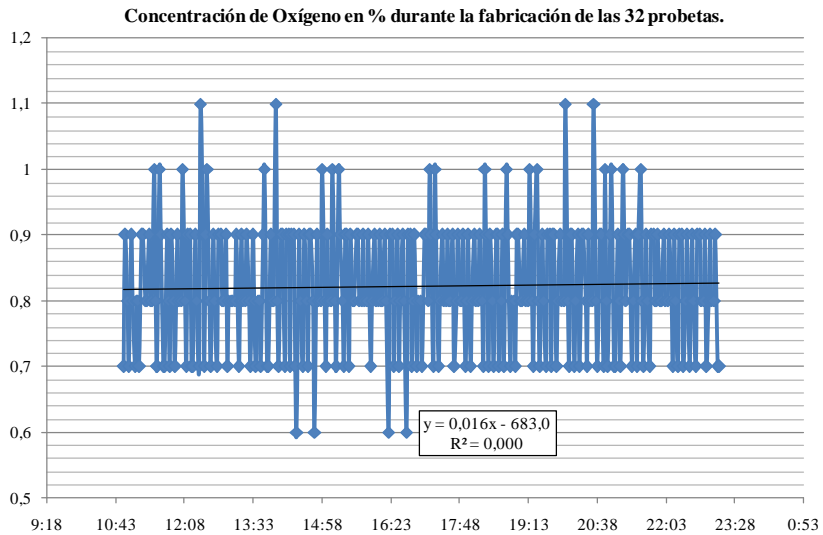


Figura 63: Figura que muestra la concentración de Oxígeno durante la fabricación de las probetas. La fabricación empezó a las 10:53h y terminó a las 23:09h, lo que implica un tiempo de fabricación de 12horas y 16 minutos. Durante la fabricación se ha registrado un media de la concentración de Oxígeno de 0.82% con picos máximos de 1.1% y picos mínimos de 0.6%. Datos registrados automáticamente por la máquina durante la fabricación.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

7.1. Velocidad de procesado.

La velocidad de procesado es la velocidad en la que la tecnología es capaz de transformar polvo metálico en metal consolidado con una densidad cercana al 100%. La velocidad de fabricación se obtiene de dividir el volumen de material procesado por el tiempo de fabricación medido en cm³/h.

$$\text{Vel. fabricación (cm}^3\text{/h)} = \text{Vol. Fabricación (cm}^3\text{)} / \text{T fabricación (h)}.$$

Para obtener datos de velocidad de fabricación de esta tecnología, vamos a centrarnos en obtener el tiempo de fabricación ya que el volumen a priori ya se conoce que en el caso de las 32 probetas es de 8cm³.

El tiempo de fabricación depende a su vez de tres factores:

1. Tiempo que el láser esta fundiendo polvo.
2. Tiempo que el repartidor o “coater” esparce el polvo en finas capas.
3. Tiempos muertos que se repiten en cada capa en las que la tecnología no está haciendo ninguno de los dos procesos anteriores.

$$\text{T fabricación} = \text{T láser} + \text{T coater} + \text{T muertos}.$$

T fabricación = La fabricación de las 32 probetas ha durado 12.28h obtenidas automáticamente de la máquina tras la fabricación. (Ver figura 61)

T láser = Obtenido mediante cálculos partiendo de las longitudes de las trayectorias seguidas por el láser para cada una de las 32 probetas y la velocidad de barrido en cada una de ellas (ver figura 49). Haciendo dichos cálculos se obtiene que el Tláser para la fabricación de las 32 probetas ha sido de 2.23h.

El cálculo de este tiempo no es posible obtenerlo directamente con los datos que presenta el software de control de la máquina tras la fabricación por ello hay que calcularlos numéricamente como se muestra a continuación. (Ver figura 62).

Configuración	Var 1: Velocidad de avance del láser para fundir el INTERIOR de cada capa (Speed) en (mm/s).	Var 2: Separación entre pasadas del láser. (d=0,2mm)	Var 3: Slices o capas	Var 4: Velocidad de avance del láser para fundir el PERÍMETRO de cada capa (Speed) en (mm/s).	(A) Longitud de la trayectoria del láser por cada capa. INTERIOR (mm)	(B) Longitud de la trayectoria del láser por cada capa. PERÍMETRO (mm)	(C) Nº capas a procesar	(D) Tiempo en procesar la trayectoria del láser por cada capa. INTERIOR (s)	(E) Tiempo en procesar la trayectoria del láser por cada capa. PERÍMETRO (s)	(F) T laser (s)
1	150	0,6d	1	300	225,92	20	333	1,51	0,07	524
2	200	0,6d	1	300	225,92	20	333	1,13	0,07	399
3	250	0,6d	1	300	225,92	20	333	0,90	0,07	323
4	300	0,6d	1	300	225,92	20	333	0,75	0,07	273
5	150	0,8d	1	300	166,47	20	333	1,11	0,07	392
6	200	0,8d	1	300	166,47	20	333	0,83	0,07	300
7	250	0,8d	1	300	166,47	20	333	0,67	0,07	244
8	300	0,8d	1	300	166,47	20	333	0,55	0,07	207
9	150	0,6d	2	300	225,92	20	167	1,51	0,07	273
10	200	0,6d	2	300	225,92	20	167	1,13	0,07	210
11	250	0,6d	2	300	225,92	20	167	0,90	0,07	173
12	300	0,6d	2	300	225,92	20	167	0,75	0,07	148
13	150	0,8d	2	300	166,47	20	167	1,11	0,07	207
14	200	0,8d	2	300	166,47	20	167	0,83	0,07	161
15	250	0,8d	2	300	166,47	20	167	0,67	0,07	133
16	300	0,8d	2	300	166,47	20	167	0,55	0,07	115
17	150	0,6d	1	500	225,92	20	333	1,51	0,04	515
18	200	0,6d	1	500	225,92	20	333	1,13	0,04	390
19	250	0,6d	1	500	225,92	20	333	0,90	0,04	315
20	300	0,6d	1	500	225,92	20	333	0,75	0,04	264
21	150	0,8d	1	500	166,47	20	333	1,11	0,04	383
22	200	0,8d	1	500	166,47	20	333	0,83	0,04	291
23	250	0,8d	1	500	166,47	20	333	0,67	0,04	235
24	300	0,8d	1	500	166,47	20	333	0,55	0,04	198
25	150	0,6d	2	500	225,92	20	167	1,51	0,04	264
26	200	0,6d	2	500	225,92	20	167	1,13	0,04	202
27	250	0,6d	2	500	225,92	20	167	0,90	0,04	164
28	300	0,6d	2	500	225,92	20	167	0,75	0,04	139
29	150	0,8d	2	500	166,47	20	167	1,11	0,04	198
30	200	0,8d	2	500	166,47	20	167	0,83	0,04	152
31	250	0,8d	2	500	166,47	20	167	0,67	0,04	124
32	300	0,8d	2	500	166,47	20	167	0,55	0,04	106

Segundos 8024
Horas 2,23

Figura 64: Tabla de velocidades de procesado del Tiempo que el láser esta procesando polvo.

- (A) Longitud de la trayectoria del láser por cada capa. INTERIOR (mm): Se obtiene de medir la longitud de la trayectoria que va a describir el láser para fundir el interior de una capa. En este caso son 225.92mm o 166.47mm.
- (B) Longitud de la trayectoria del láser por cada capa. PERÍMETRO (mm): Se obtiene de medir la longitud de la trayectoria que va a describir el láser para fundir las capas de cada una de las 32 probetas. En este caso son 20mm en todas las probetas.
- (C) Nº capas a procesar: Las probetas tienen una altura de 10mm, todas las capas son de 30µm, lo que implica que cada probeta está constituida por 333 capas. Las probetas en las que el láser funde solo en capas alternas para el cálculo se va a considerar que está constituida por la mitad de capas. (166 capas)
- (D) Tiempo en procesar la trayectoria del láser por cada capa. INTERIOR. Se obtiene de (A)/Var1 medido en segundos.

- (E) Tiempo en procesar la trayectoria del láser por cada capa. PERIMETRO. Se obtiene de $(B)/Var4$ medido en segundos.
- (F) T láser (s): $(D+E)*C$. Las configuraciones de procesado en la que se funde en capas alternas el tiempo de láser se calcula utilizando: $(D+E)*C + E*C$ ya que aunque el láser no funde el interior de las probetas en capas alternas si procesa su perímetro en todas las capas.

Resulta chocante que esta tecnología en la fabricación de las 32 probetas solo haya utilizado el 18% del tiempo en transformar polvo metálico en metal consolidado y continuo, este dato es debido fundamentalmente a que no se ha optimizado el tiempo de reparto de polvo, y que los tiempos muertos han aumentado mucho debido al procesado de 32 configuraciones diferentes en cada capa.

El dato del 18% o las 2,23 horas invertidas por el láser para fundir el polvo de las 32 probetas, no arrojan datos concretos de la velocidad de fabricación de cada una de las 32 configuraciones de procesado de manera pormenorizada. Si estudiamos la velocidad en que cada una de las 32 configuraciones es capaz de transformar polvo metálico en metal continuo, excluyendo los tiempos muertos y los tiempos de reparto de polvo, nos encontramos con diferencias muy relevantes que oscilan entre los 1.79 cm³/h de las configuraciones de mayor aporte energético (configuraciones 1 y 17) y 9.73 cm³/h en las configuraciones de menor aporte energético (configuraciones 16 y 32). Este rango implica una diferencia de 5.43 veces entre extremos.

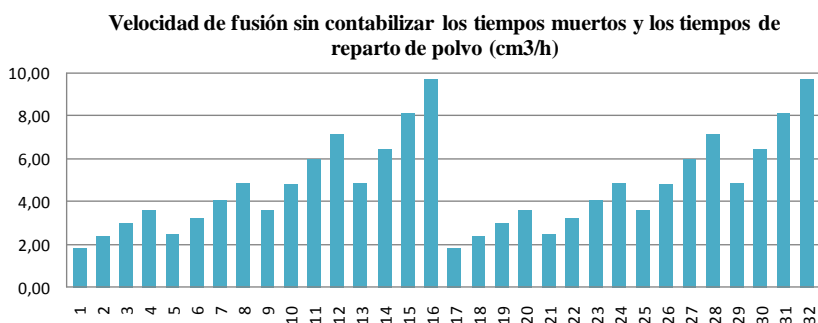


Figura 65: Este cálculo es una simplificación ya que se considera que el tiempo de fabricación es exclusivamente el tiempo en el que el láser está fundiendo polvo, en realidad existen otros dos factores que influyen en la producción que son el tiempo de reparto de polvo en cada capa y los tiempos muertos en los que la máquina no está fundiendo ni repartiendo polvo.

T coater: El tiempo en que el “coater” está repartiendo polvo en una fabricación depende directamente del tiempo en repartir cada capa por el número de capas .

$$T_{\text{coater}} = T_{\text{coater por capa}} * N^{\circ} \text{ capas}$$

El por ello que una regla básica para minimizar los tiempos de fabricación consiste en posicionar la pieza o piezas a fabricar en la máquina de manera que tengan la mínima altura posible.

El tiempo que tarda el “coater” en repartir el polvo en las 333 capas correspondientes a los 10 mm de altura de las probetas ha sido 33 segundos por capa lo que implica un tiempo total de 10.989 segundos o 3.05 horas.

Hay que decir, que la velocidad en la que la máquina esparce una capa de polvo, puede llegar a ser tan rápida como se desee pero hay que considerar que la velocidad de reparto excesiva puede contribuir negativamente a la homogeneidad del polvo esparcido. Es por ello, que en el presente trabajo, se ha decidido dotar al “coater” de una velocidad baja para poder obtener la mejor superficie posible. En condiciones normales la velocidad del “coater” podría bajarse a cifras comprendidas entre 20 a 25 segundos por cada ciclo. (Datos obtenidos empíricamente de fabricaciones con AISI 316L).

T muertos: En el proceso de fusión del polvo de cada capa, cabría esperar que tras el reparto de polvo, el láser procesara toda la capa de manera continua para que se minimizara el tiempo de procesado, la realidad es que a lo largo de la fusión de cada capa, van apareciendo pausas intermitentes en las que el láser está recibiendo información momentos en que deja de procesar, estas pausas, en el caso de las fabricación de las 32 probetas, se han visto incrementadas de manera muy significativa ya ha tenido que cambiar 32 veces de configuración de procesado en cada capa, hecho excepcional que no se da en fabricaciones convencionales donde se fabrican las piezas con una sola configuración de procesado. En condiciones normales de procesado con una única configuración, los tiempos muertos suelen oscilar entre un 15% a un 35% del tiempo total de la fabricación. (Datos obtenidos empíricamente de fabricaciones con AISI 316L con una sola configuración de procesado)

Los tiempos muertos de calculan:

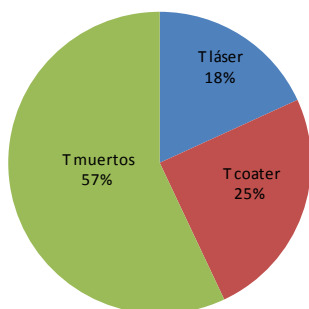
$$T_{\text{fabricación}} = T_{\text{láser}} + T_{\text{coater}} + T_{\text{muertos}};$$

$$12,28h = 2,23h + 3,05h + T_{\text{muertos}};$$

T muertos = 7,00h.

En resumen, el tiempo de fabricación, tal y como se ha explicado, depende de la suma de tres tipos de tiempos (T láser + T coater + T muertos). El tiempo de láser (T láser) y el tiempo de reparto de material (T coater) es posible calcularlos de manera precisa para cualquier fabricación con una configuración de procesado optimizada ya que depende de los datos introducidos en cada fabricación. Los tiempos muertos no son cuantificables antes de la producción pero pueden calcularse fácilmente a posteriori.

Tiempo de fabricación de las 32 probetas con las 32 configuraciones diferentes



	horas
T fabricación max	12,28
T láser	2,23
T coater	3,05
T muertos	7,00

Figura 66: Izquierda: Porcentajes de tiempos utilizados para la fabricación de las 32 probetas del presente trabajo. Derecha: Horas invertidas en la fabricación.

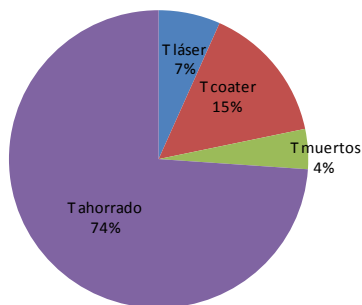
Como se ha explicado, el tiempo de fabricación de estas 32 probetas (0.65 cm³/h) no es representativo de la velocidad de fabricación que sería capaz de conseguir dicha tecnología en unas condiciones de procesado optimizadas para piezas reales en CoCrMo.

Como ejemplo, sería posible calcular el tiempo hipotético que tardaría en fabricarse las mismas 32 geometrías utilizando una única configuración de procesado buscando maximizar la productividad.

Para el cálculo se puede considerar como válida la configuración de procesado de mayor productividad estudiada en el presente trabajo (configuración 16 o 32), un tiempo de coater de 20segundos por capa, y unos tiempos muertos del 20% respecto del total. Calculando los tiempos de fabricación según estas hipótesis, la fabricación tardaría en terminar 3.2

horas, lo que implicaría un ahorro del 74% del tiempo. Es decir, se obtendría una velocidad de fabricación de 2.5 cm³/h, en lugar de los 0.65cm³/h registrados en la fabricación realizada en el presente estudio.

Tiempo de fabricación de las 32 probetas con la configuraciones de mayor velocidad.



	horas
T fabricación max	3,204
T láser	0,82
T coater	1,85
T muertos	0,53

Figura 67: Porcentajes de tiempo calculados para la fabricación de las 32 probetas del presente trabajo utilizando una única configuración de procesamiento de máxima productividad, un tiempo Tcoater de 20 segundos por capa y 20% de tiempos muertos.

Es importante destacar que para obtener una máxima velocidad de fabricación hay que intentar que los Tcoaters y los Tmuertos tiendan a ser lo más bajos posibles de esta manera las velocidades de fabricación tenderá a acercarse a las velocidades de fabricación límite marcadas por el tiempo que el láser está fundiendo polvo convirtiéndolo en metal continuo. (Ver figura 64).

En conclusión, se puede decir que se han obtenido parámetros de láser para procesar CoCrMo ASTMf75 mediante la tecnología M3-linear del fabricante Concept Laser a 9.73 cm³/h. Esta cifra es muy superior a la velocidad de procesamiento optimizada para los aceros estándar procesados por dicha tecnología que son de 3.24 cm³/h para el AISI 316L/DIN 1.4404 y 5,5 cm³/h para DIN 1.2709. (Estos valores de velocidad de procesamiento, están calculados en todos los casos, sin contar tiempos muertos y tiempos de reparto de polvo no optimizados en el presente trabajo).

La mejor velocidad de procesamiento calculada para el CoCrMo, contando tiempos de reparto de polvo y tiempos muertos, para una geometría de 8cm³ y una altura de 1cm, es de 2.5 cm³/h.

7.2. Porosidad.

La técnica que se ha elegido para medir la porosidad de cada probeta ha sido medir el área que describen los poros en dos secciones internas, una sección paralela a las capas (plano XY) y una sección perpendicular a este (plano XZ).

Para poder medir el área que describen los poros, se han cortado las probetas mediante la técnica de corte por hilo o EDM por hilo [15].

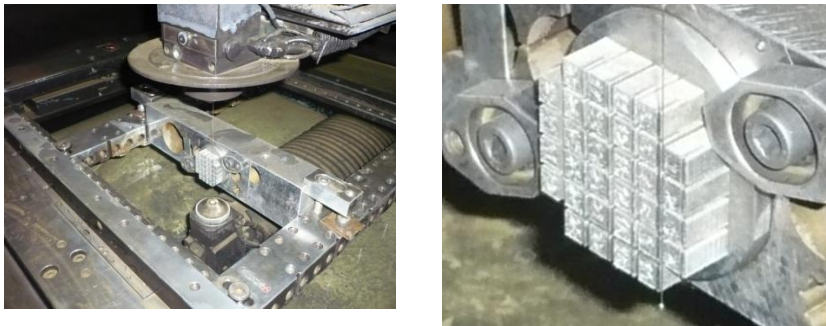


Figura 68: Equipo de corte por hilo utilizado para el presente trabajo.

Con la técnica de EDM por hilo, se han seguido una serie de trayectorias que han hecho posible obtener de las probetas dos secciones internas y perpendiculares para el estudio.

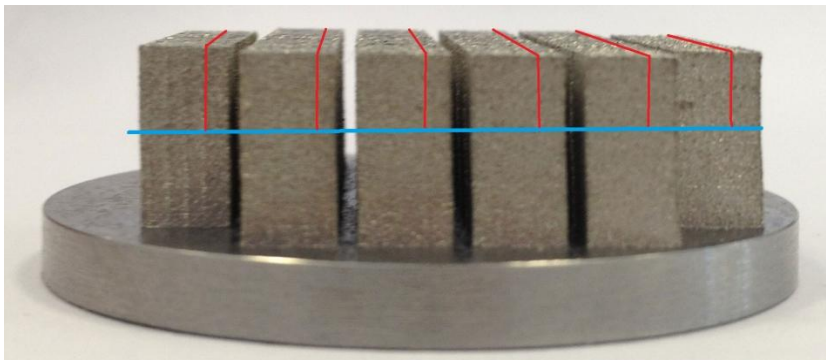


Figura 67: Las líneas rojas indican los primeros cortes a realizar y que determinan el plano XZ de estudio, la línea azul configura el plano XY de estudio de las probetas.

Tras el corte se han embutido por una parte las 32 muestras del plano XY y por otra parte las 32 probetas del plano XZ.

Para poder registrar la porosidad tras la embutición se ha procedido a un pulido de las superficies de análisis.

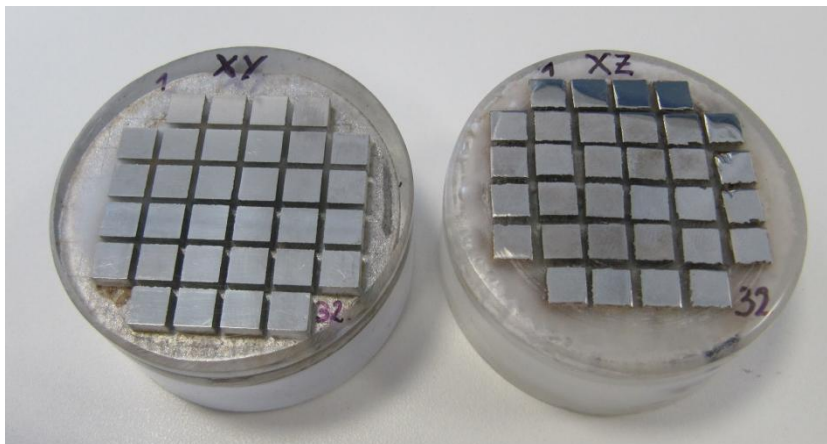


Figura 70: Las 32 probetas obtenidas de las 32 configuraciones de procesamiento se han cortado y embutido de modo que se han obtenido 32 secciones de estudio en el plano XY y 32 secciones de estudio en el plano XZ.

Las muestras se han estudiado en un microscopio óptico y se ha fijado en 200 aumentos como la mejor escala para poder fotografiar adecuadamente los poros.

7.2.1. Cálculo número de Poros

Se ha realizado un barrido con el microscopio óptico a cada una de las 64 secciones de 5x5mm con el objetivo de buscando y fotografiar todos los poros de las 64 muestras. Se ha podido comprobar que ciertas muestras estaban exentas de poros y otras si tenían cierta porosidad con un máximo registrado en la probeta de configuración de procesamiento 32 con 15 poros en la sección XY y 17 en la sección XZ.

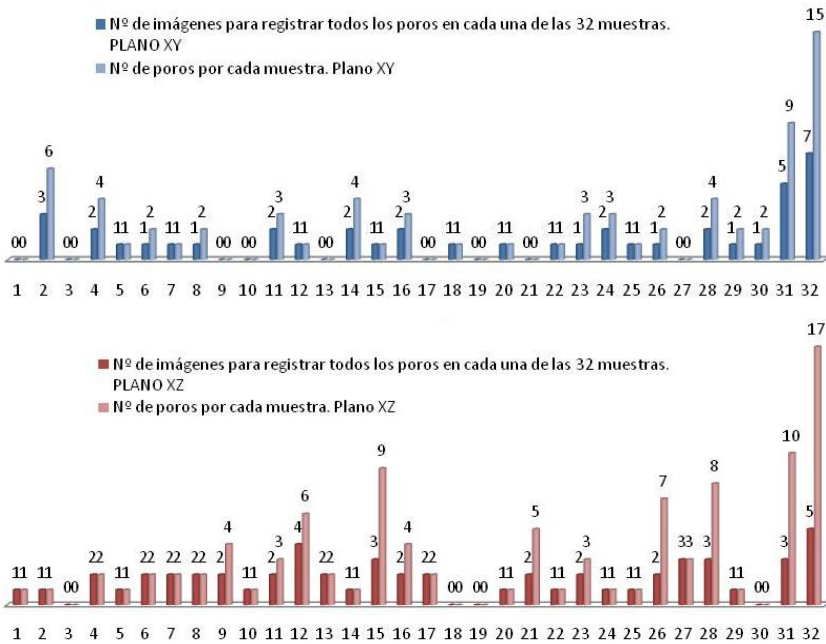


Figura 71: Los gráficos muestran el número de imágenes necesarias para registrar todos los poros de cada una de las 64 muestras y el número de poros encontrados por cada una de ellas.

7.2.2. Porcentaje de porosidad.

Para obtener el porcentaje de porosidad de cada sección se ha realizado el siguiente cálculo: (Área total de los poros encontrados en μm^2 en cada sección $\times 100$) / $25.000.000 \mu\text{m}^2$ del área total de la sección).

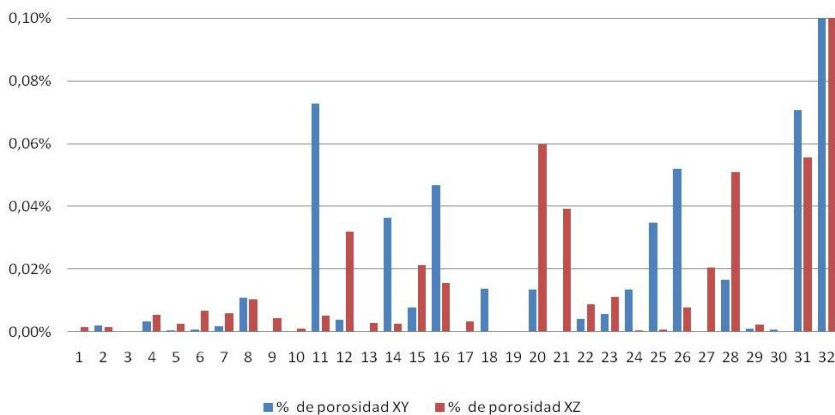


Figura 72: Gráfico de porcentaje de porosidad de las 64 muestras estudiadas.

Configuración	Var 1: Velocidad de avance del láser para fundir el INTERIOR de cada capa (Speed) en (mm/s).	Var 2: Separación entre pasadas del láser. (d=0,2mm)	Var 3: Slices o capas	Var 4: Velocidad de avance del láser para fundir el PERÍMETRO de cada capa (Speed) en (mm/s).	% de porosidad XY	% de porosidad XZ
1	150	0.6d	1	300	0,00%	0,00%
2	200	0.6d	1	300	0,002%	0,002%
3	250	0.6d	1	300	0,000%	0,000%
4	300	0.6d	1	300	0,003%	0,005%
5	150	0.8d	1	300	0,001%	0,003%
6	200	0.8d	1	300	0,001%	0,007%
7	250	0.8d	1	300	0,002%	0,006%
8	300	0.8d	1	300	0,011%	0,010%
9	150	0.6d	2	300	0,000%	0,004%
10	200	0.6d	2	300	0,000%	0,001%
11	250	0.6d	2	300	0,073%	0,005%
12	300	0.6d	2	300	0,004%	0,032%
13	150	0.8d	2	300	0,000%	0,003%
14	200	0.8d	2	300	0,036%	0,003%
15	250	0.8d	2	300	0,008%	0,021%
16	300	0.8d	2	300	0,047%	0,016%
17	150	0.6d	1	500	0,000%	0,003%
18	200	0.6d	1	500	0,014%	0,000%
19	250	0.6d	1	500	0,000%	0,000%
20	300	0.6d	1	500	0,014%	0,060%
21	150	0.8d	1	500	0,000%	0,039%
22	200	0.8d	1	500	0,004%	0,009%
23	250	0.8d	1	500	0,006%	0,011%
24	300	0.8d	1	500	0,013%	0,001%
25	150	0.6d	2	500	0,035%	0,001%
26	200	0.6d	2	500	0,052%	0,008%
27	250	0.6d	2	500	0,000%	0,020%
28	300	0.6d	2	500	0,017%	0,051%
29	150	0.8d	2	500	0,001%	0,002%
30	200	0.8d	2	500	0,001%	0,000%
31	250	0.8d	2	500	0,071%	0,056%
32	300	0.8d	2	500	0,184%	0,241%

Figura 73: La presente tabla muestra el porcentaje de porosidad encontrada en las secciones estudiadas de las 32 configuraciones de procesado en un plano XY y en un plano XZ.

La probeta de la configuración de proceso nº 32 tanto en la sección XY como en la XZ ha obtenido una porosidad de 0.18% y 0.24% respectivamente. Esta es la única configuración de procesado que sobrepasa el valor de 0.1% de porosidad.

7.2.3. Imágenes.

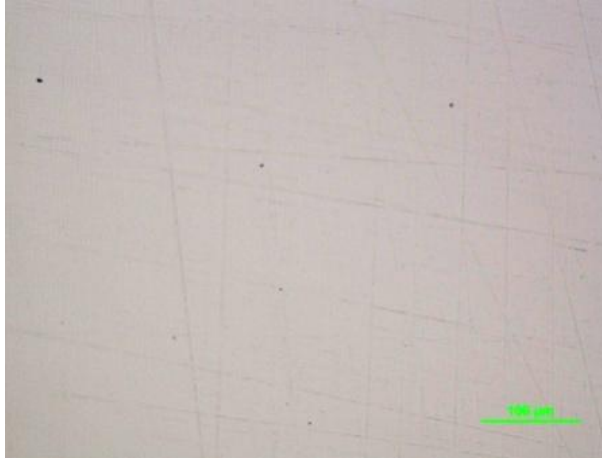
La sección de cada probeta tiene un área de $25.000.000 \mu\text{m}^2$ de superficie, y las fotografías realizadas a 200 aumentos cubren en cada una de ellas un área de $281.591,8 \mu\text{m}^2$, lo que implica que cada fotografía abarca aproximadamente el 1,126 % de cada probeta.

A continuación se van a mostrar una imagen representativa de algunas de las configuraciones del estudio. Se van a mostrar las configuraciones de procesado: 1, 2, 3, 4, 6, 8, 11, 16, 19, 26 y 32. Primero una imagen de la sección del plano XY y posteriormente una imagen de la sección del plano XZ.

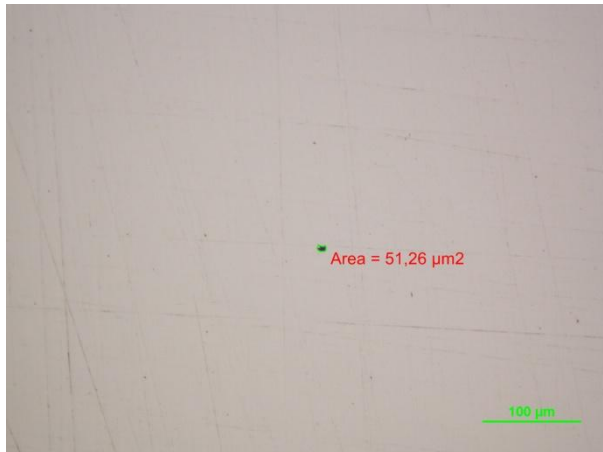
En cada fotografía se pueden apreciar varios tipos de fenómenos cuya interpretación es la siguiente:

- Poros: Áreas en color negro delimitadas en su perímetro por líneas color verde con la identificación de una área específica.
- Rayas: El material, por su dureza, es difícil de pulir para preparar la superficie para su análisis, es por ello que se pueden apreciar líneas oscuras en distintas direcciones generadas en el proceso de corte y pulido de la muestra, no es un defecto intrínseco al material sino al proceso utilizado para su corte y pulido.
- Suciedad en la muestra: Aéreas en color negro con similar o idéntico aspecto a los poros, se diferencian de estos en el proceso previo a la realización de la fotografía ya que las partículas de suciedad quedan enfocadas antes de que quede enfocada la superficie de la muestra hecho que denota que dicha partícula oscura esta sobre la superficie y por tanto no puede ser un poro. En las imágenes que se muestran a continuación, se diferencian de los poros porque no ha sido especificada su área.

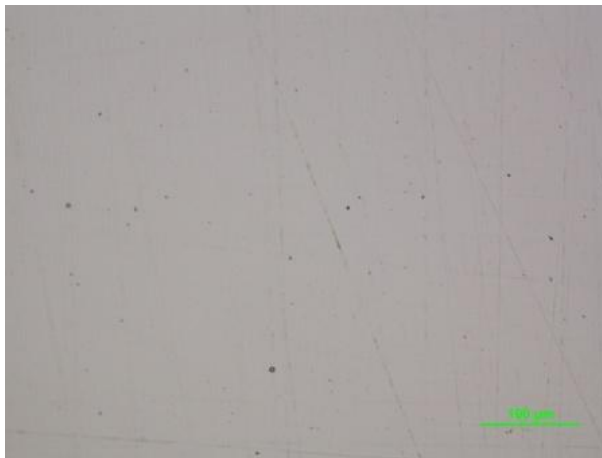
XY. 1.



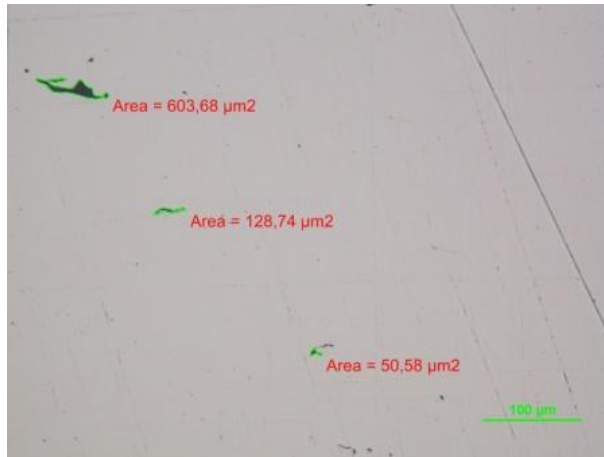
XY. 2.



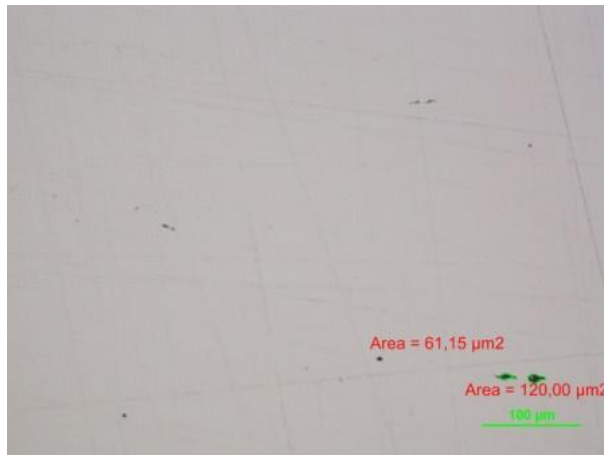
XY3.



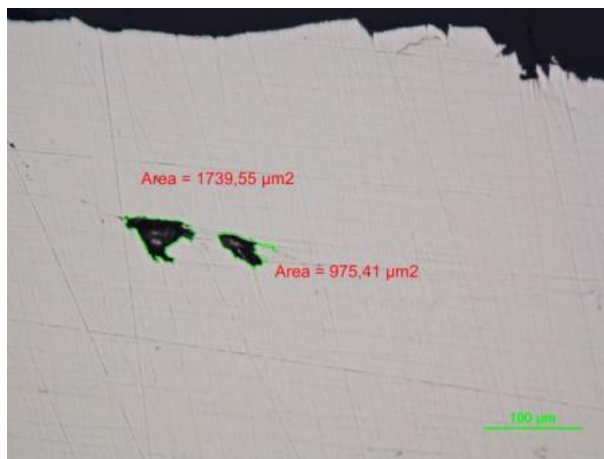
XY4.



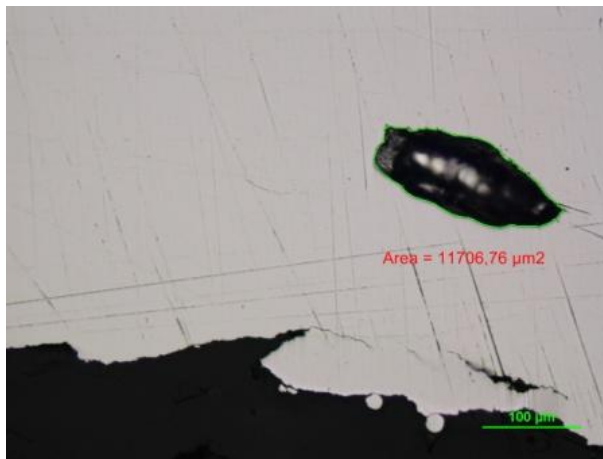
XY.6.



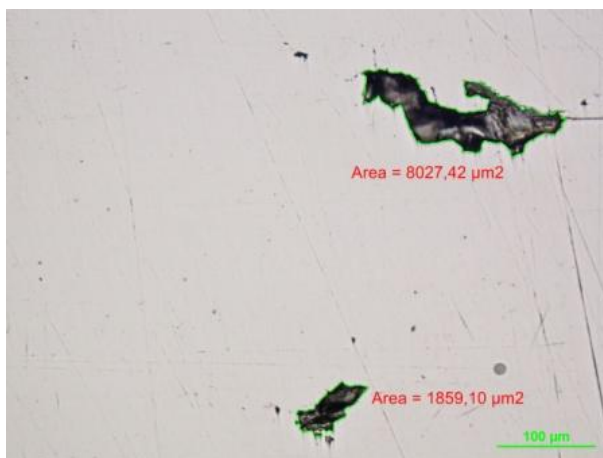
XY.8.



XY.11.



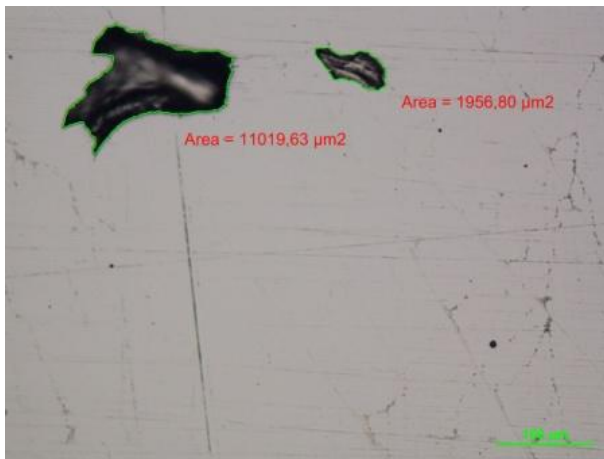
XY.16.



XY.19.



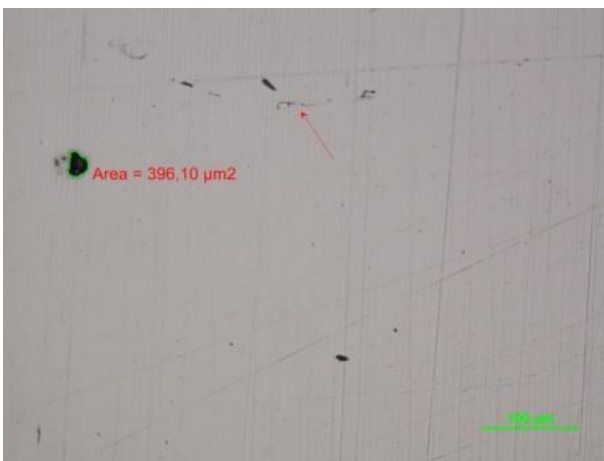
XY.26.



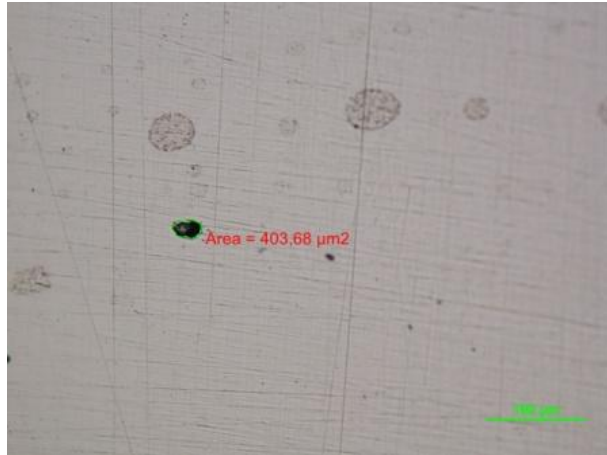
XY.32.



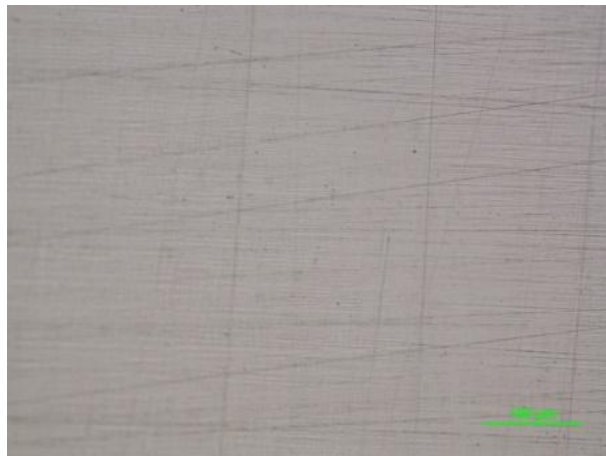
XZ. 1.



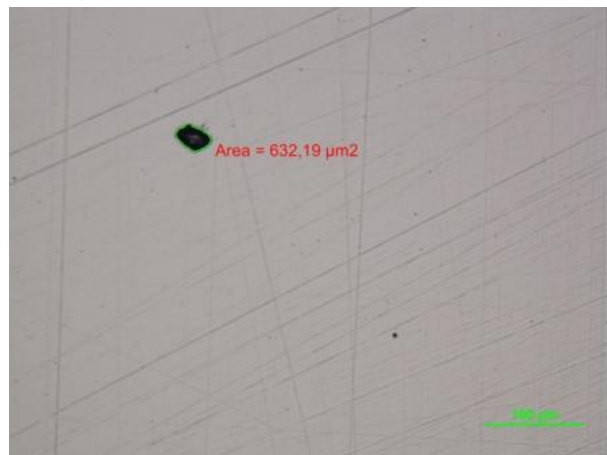
XZ. 2.



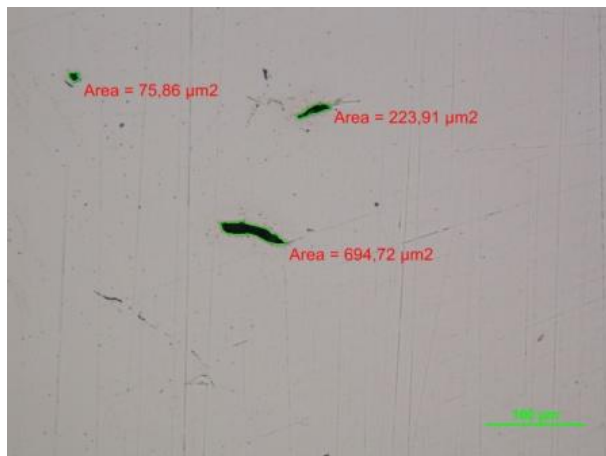
XZ. 3.



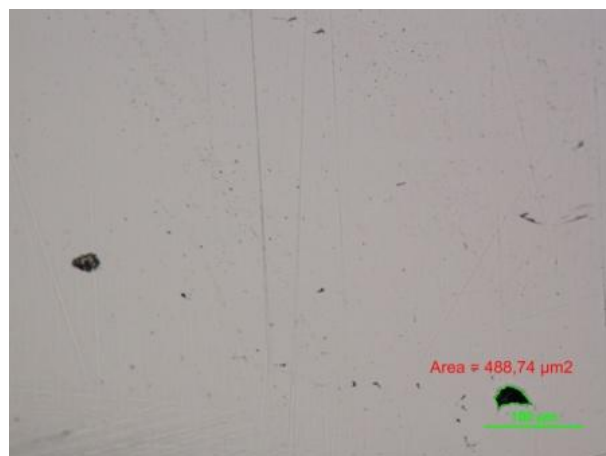
XZ. 5.



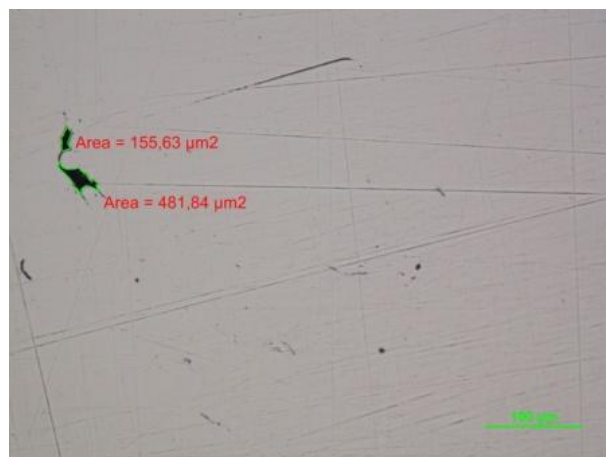
XZ. 6.



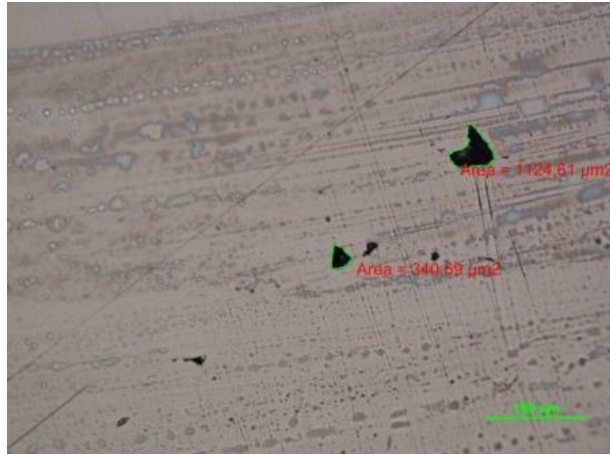
XZ. 8.



XZ. 11



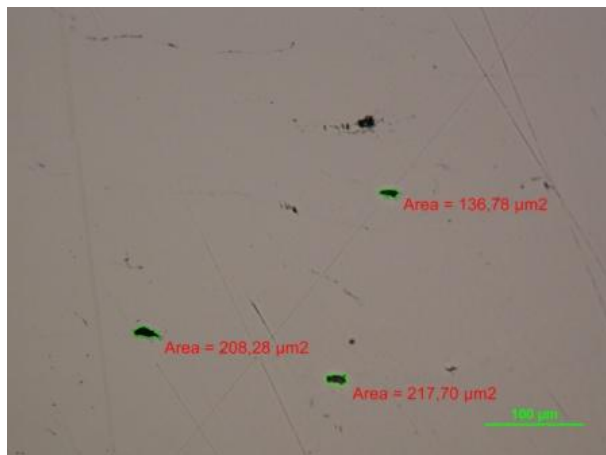
XZ. 16.



ZX. 19.



ZX. 26.



ZX. 32.

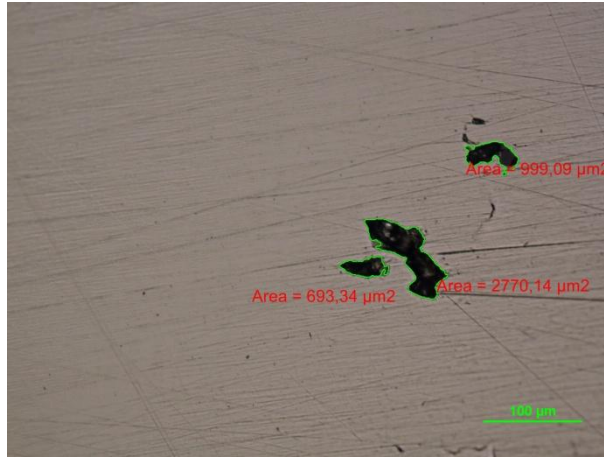


Figura 74: Imagen representativa de algunas de las configuraciones del estudio. Se han mostrado las configuraciones de procesado: 1, 2, 3, 4, 6, 8, 11, 16, 19, 26 y 32. Primero una imagen de la sección del plano XY y posteriormente una imagen de la sección del plano XZ.

7.2.4. Análisis experimental.

Mediante el paquete informático Statgrafics plus 5.1 [14] se van a analizar los resultados de la porosidad obtenida en la sección de estudio de los planos XY y XZ de cada una de las probetas con la intención de determinar qué factores han sido más influyentes en la **porosidad** resultante. También se determinarán cuantitativamente los efectos de las variables o de sus interacciones, lo que permite obtener un modelo empírico ajustado que relaciona la respuesta en estudio con los valores estandarizados (-1,+1) de las variables.

El análisis de resultados se ha llevado a cabo empleando herramientas o algoritmos de cálculo estadístico disponibles por el programa Statgrafics.

La Tabla de análisis da los valores estimados de los efectos, medidos a partir de los datos experimentales de la respuesta que se analiza: porosidad, dureza, etc, junto con una estimación del error. Este análisis puede hacerse contemplado solamente los efectos principales o individuales de cada variable, o puede también hacerse evaluando las posibles interacciones de dos o más variables.

Los **Gráficos de Pareto** o “**Pareto Charts**” que permiten visualizar gráficamente la importancia relativa de las diferentes variables. Se presentan en orden decreciente los diferentes efectos estandarizados. Cada barra muestra en valor del efecto estandarizado, que es el valor del efecto dividido por su error. La línea vertical permite distinguir los efectos que son realmente significativos sobre la respuesta observada, desde un punto de vista estadístico. La posición de la barra vertical depende del nivel de significación. En las figuras empleadas en este trabajo, la barra indica que efectos son significativos son un nivel de confianza del 95%.

Otra forma útil para determinar qué efectos son significativos es la tabla de **análisis de la varianza** o **ANOVA** que permite determinar la importancia relativa de los diferentes efectos. La tabla de ANOVA divide la variabilidad en la respuesta que se analiza en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos. La significación estadística de cada efecto se determina comparando la media al cuadrado contra una estimación del error experimental. Si un efecto presenta un p-valor inferior a 0.05 en la columna de los p-valores, ello indica que es un efecto significativo al 95.0% de nivel de confianza. En esta tabla, el estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en

el orden en el que se suceden en el fichero de datos. Este es un indicador útil para determinar si existe algún efecto no aleatorio asociado al orden en el que se han obtenido o realizado los experimentos.

Mediante la opción de representación de los "**Gráficos de efectos principales**" se obtiene una representación gráfica que ilustra gráficamente cómo cambia o varía la respuesta promedio analizada cuando cada uno de los factores o variables pasa del valor más bajo (-1) al valor más alto (+1). Si el segmento presenta pendiente positiva, ello significa que la respuesta crece cuando la variable pasa de (-1) a (+1). La información de este gráfico es complementaria a la que se obtiene de los gráficos de Pareto.

Mediante la opción de "**Optimización**" es posible determinar la combinación de niveles o valores de las variables que maximizan o minimizan la respuesta analizada en una región dada. Seleccionando la opción "minimizar" para la respuesta "porosidad" se obtiene la combinación de valores que permiten obtener una porosidad mínima.

Porosidad XY sin iteraciones:

1. Efectos estimados para Porosidad XY:

La siguiente tabla muestra cada uno de los efectos estimados e interacciones. También se muestra el error normal de cada uno de los efectos, el cual mide su error de muestreo [16].

Promedio	= 0,0186875 +/- 0,00573129
A:speed	= 0,030705 +/- 0,0153787
B:a1	= 0,010775 +/- 0,0114626
C:slices	= 0,02865 +/- 0,0114626
D:contor speed	= 0,013975 +/- 0,0114626

Los errores estándar están basados en un error total con 27 g.l.

Standardized Pareto Chart for % porosidad XY

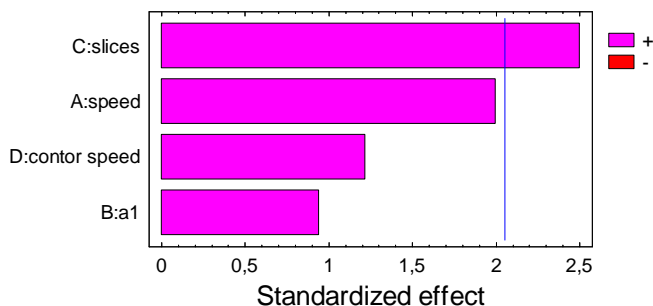


Figura 75: Gráficos de Pareto: El objetivo es minimizar la porosidad en el plano XY. Las cuatro variables del estudio contribuyen positivamente a aumentar la porosidad en el plano XY, la más influyente en la porosidad es la variable “slices”, en segundo lugar “speed”, en tercer lugar “contor speed” y la menos influyente es la variable “a1”.

2. Análisis de la Varianza para Porosidad XY o ANOVA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A:speed	0,00419021	1	0,00419021	3,99	0,0560
B:a1	0,000928805	1	0,000928805	0,88	0,3555
C:slices	0,00656658	1	0,00656658	6,25	0,0188
D:contor speed	0,0015624	1	0,0015624	1,49	0,2333
Total error	0,0283804	27	0,00105113		
Total (corr.)	0,0416284	31			

R-cuadrado = 31,8244 %

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 21,7243 %

Error Estándar de Est. = 0,0324211

Error absoluto de la media = 0,0199228

Estadístico Durbin-Watson = 1,22096 (P=0,0028)

Autocorrelación residual Lag 1 = 0,11093

La tabla de ANOVA divide la variabilidad en Porosidad XY en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos [16].

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo así ajustado explica el 31,8244 % de la variabilidad en Porosidad XY. El estadístico R-cuadrado ajustado, el cual es más adecuado para la comparación de números diferentes

de variables independientes, es 21,7243 %. El error estándar de la estimación muestra la desviación normal de los residuos para ser 0,0324211. El error absoluto de la media (MAE) de 0,0199228 es el promedio del valor de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en el orden en el que se suceden en el fichero de datos. Puesto que el p-valor es superior a 0.05, no hay indicios de correlación de serie en los residuos [16].

3. Gráfico de los efectos principales XY.

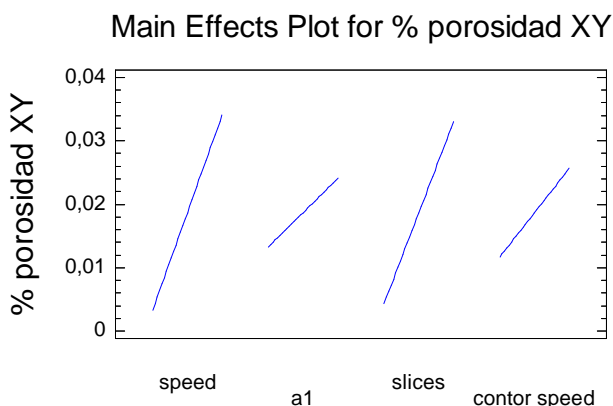


Figura 76: Gráfico de los efectos principales: El objetivo es minimizar la porosidad en el plano XY. Analizando los efectos por separado mediante el uso de segmentos muestra que las variables más influyentes para aumentar la porosidad son “speed” y “slices” ya que muestran un pendiente más acusada, las variables “a1” y “contor speed” son menos influyentes con un peso similar entre ellas.

4. Coeficiente de regresión para Porosidad XY y ecuación del modelo ajustado

Constante= 0,0186875
 A:speed = 0,0153525
 B:a1= 0,0053875
 C:slices = 0,014325
 D:contor speed = 0,0069875

$$\% \text{ porosidad XY} = 0,0186875 + 0,0153525 * \text{speed} + 0,0053875 * a1 + 0,014325 * \text{slices} + 0,0069875 * \text{contor speed}$$

5. Respuesta Optimizada:



El objetivo es minimizar la Porosidad XY, el valor óptimo es: 0,0.

Factor	Low	High	Optimum
speed	-1,0	1,0	-0,896037
a1	-1,0	1,0	0,6333048
slices	-1,0	1,0	-0,889715
contor speed	-1,0	1,0	0,262105

Porosidad XY con iteraciones de orden 2:

1. Efectos estimados para Porosidad XY con iteraciones de orden 2.

La siguiente tabla muestra cada uno de los efectos estimados e interacciones. También se muestra el error normal de cada uno de los efectos, el cual mide su error de muestreo [16].

Promedio	= 0,0163047	+/- 0,00876927
A:speed	= 0,030705	+/- 0,0146993
B:a1	= 0,010775	+/- 0,0109562
C:slices	= 0,02865	+/- 0,0109562
D:contor speed	= 0,013975	+/- 0,0109562
AA	= 0,00857812	+/- 0,0246515
AB	= 0,02967	+/- 0,0146993
AC	= 0,0225	+/- 0,0146993
AD	= 0,012915	+/- 0,0146993
BC	= 0,0102	+/- 0,0109562
BD	= 0,00795	+/- 0,0109562
CD	= 0,0101	+/- 0,0109562

Los errores estándar están basados en un error total con 20 d.f.

Standardized Pareto Chart for % porosidad XY

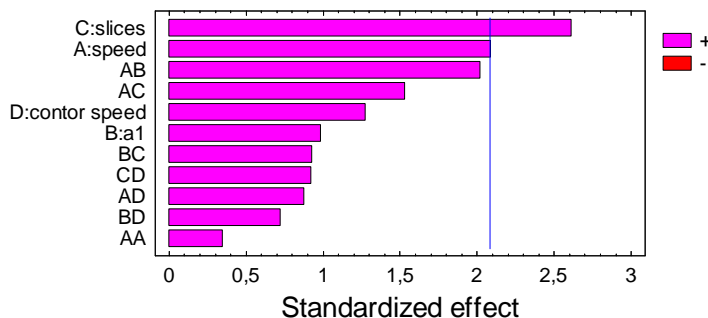


Figura 77: Gráfico de Pareto. El objetivo es minimizar la porosidad en el plano XY. Todas las variables del estudio incluso la variación entre ellas contribuyen positivamente a aumentar la porosidad en el plano XY, la más influyente en la porosidad es la variable “slices” y en segundo lugar “speed”.

2. Análisis de la Varianza para Porosidad XY o ANOVA con iteraciones de orden 2.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A:speed	0,00419021	1	0,00419021	4,36	0,0497
B:a1	0,000928805	1	0,000928805	0,97	0,3371
C:slices	0,00656658	1	0,00656658	6,84	0,0166
D:contor speed	0,0015624	1	0,0015624	1,63	0,2167
AA	0,000116281	1	0,000116281	0,12	0,7315
AB	0,00391248	1	0,00391248	4,07	0,0572
AC	0,00225	1	0,00225	2,34	0,1415
AD	0,000741321	1	0,000741321	0,77	0,3900
BC	0,00083232	1	0,00083232	0,87	0,3630
BD	0,00050562	1	0,00050562	0,53	0,4765
CD	0,00081608	1	0,00081608	0,85	0,3676
Total error	0,0192063	20	0,000960314		
Total (corr.)	0,0416284	31			

R-cuadrado = 53,8625 %

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 28,4869 %

Error Estándar de Est. = 0,0309889

Error absoluto de la media = 0,0181889

Estadístico Durbin-Watson = 1,62545 (P=0,0044)

Autocorrelación residual Lag 1 = 0,0243494

La tabla de ANOVA divide la variabilidad en Porosidad XY en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos [16].

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo así ajustado explica el 53,8625 % de la variabilidad en Porosidad XY. El estadístico R-cuadrado ajustado, el cual es más adecuado para la comparación de números diferentes de variables independientes, es 28,4869%. El error estándar de la estimación muestra la desviación normal de los residuos para ser 0,0309889. El error absoluto de la media (MAE) de 0,0181889 es el promedio del valor de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en el orden en el que se suceden en el fichero de datos. Puesto que el p-valor es superior a 0.05, no hay indicios de correlación de serie en los residuos [16].

3. Gráfico de los efectos principales XY con iteraciones de orden 2

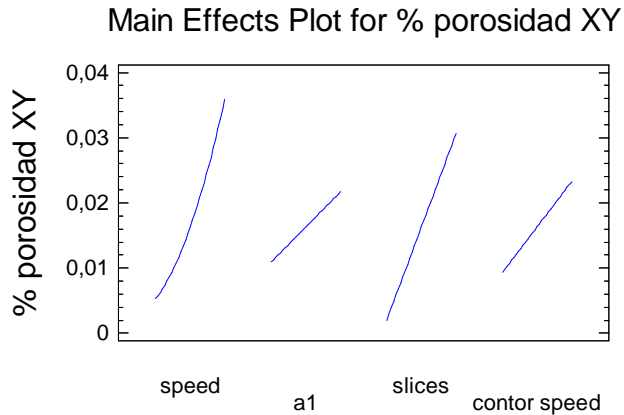


Figura 78: Gráfico de los efectos principales: El objetivo es minimizar la porosidad en el plano XY. Analizando los efectos por separados mediante el uso de segmentos muestra que las variables más influyentes son “speed” y “slices” ya que muestran un pendiente muy acusada, las variables “a1” y “contor speed” son menos influyentes para aumentar la porosidad con un peso similar entre ellas.

4. Coeficiente de regresión para Porosidad XY y ecuación del modelo ajustado con iteraciones de orden 2.

Constante = 0,0163047
 A:speed = 0,0153525
 B:a1= 0,0053875
 C:slices= 0,014325
 D:contor speed = 0,0069875
 AA = 0,00428906
 AB = 0,014835
 AC = 0,01125
 AD = 0,0064575
 BC = 0,0051
 BD = 0,003975
 CD = 0,00505

$$\begin{aligned}
 \% \text{ porosidad XY} = & 0,0163047 + 0,0153525*\text{speed} + 0,0053875*a1 + \\
 & 0,014325*slices + 0,0069875*\text{contor speed} + 0,00428906*\text{speed}^2 + \\
 & 0,014835*\text{speed}*a1 + 0,01125*\text{speed}*slices + 0,0064575*\text{speed}*\text{contor} \\
 & \text{speed} + 0,0051*a1*slices + 0,003975*a1*\text{contor speed} + \\
 & 0,00505*slices*\text{contor speed}
 \end{aligned}$$

5. Respuesta Optimizada con iteraciones de orden 2:

El objetivo es minimizar la Porosidad XY, el valor óptimo es: 0,0

Factor	Low	High	Optimum
speed	-1,0	1,0	-0,826155
a1	-1,0	1,0	0,320195
slices	-1,0	1,0	-0,968896
contor speed	-1,0	1,0	0,61441

Porosidad XZ sin iteraciones:

1. Efectos estimados para Porosidad XZ:

La siguiente tabla muestra cada uno de los efectos estimados e interacciones. También se muestra el error normal de cada uno de los efectos, el cual mide su error de muestreo [16].

Promedio	= 0,0193969 +/- 0,00696623
A:speed	= 0,0438488 +/- 0,0186924
B:a1	= 0,0145437 +/- 0,0139325
C:slices	= 0,0191687 +/- 0,0139325
D:contor speed	= 0,0238813 +/- 0,0139325

Los errores estándar están basados en un error total con 27 d.f.

Standardized Pareto Chart for % porosidad XZ

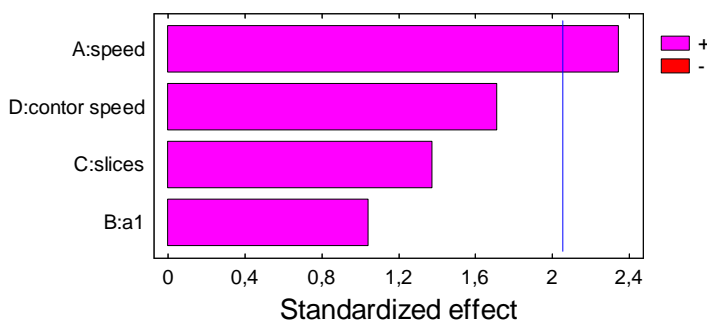


Figura 79: Gráfico de Pareto . El objetivo es minimizar la porosidad en el plano XZ. Las cuatro variables del estudio contribuyen positivamente a aumentar la porosidad en el plano XY, la más influyente en la porosidad es la variable “Speed”, en segundo

lugar “contor speed”, en tercer lugar “slices” y la menos influyente es la variable “a1”.

2. Análisis de la Varianza para Porosidad XY o ANOVA.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A:speed	0,00854539	1	0,00854539	5,50	0,0266
B:a1	0,00169217	1	0,00169217	1,09	0,3058
C:slices	0,00293953	1	0,00293953	1,89	0,1802
D:contor speed	0,00456251	1	0,00456251	2,94	0,0980
Total error	0,0419285	27	0,00155291		
Total (corr.)	0,0596681	31			

R-cuadrado = 29,7304 %

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 19,3201 %

Error Estándar de Est. = 0,039407

Error absoluto de la media = 0,0209977

Estadístico Durbin-Watson = 1,06538 (P=0,0005)

Autocorrelación residual Lag 1 = 0,104941

La tabla de ANOVA divide la variabilidad en Porosidad XZ en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos [16].

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo así ajustado explica el 29,7304 % de la variabilidad en Porosidad XZ. El estadístico R-cuadrado ajustado, el cual es más adecuado para la comparación de números diferentes de variables independientes, es 19,3201 %. El error estándar de la estimación muestra la desviación normal de los residuos para ser 0,039407. El error absoluto de la media (MAE) de 0,0209977 es el promedio del valor de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en el orden en el que se suceden en el fichero de datos. Puesto que el p-valor es superior a 0.05, no hay indicios de correlación de serie en los residuos [16].

3. Gráfico de los efectos principales XZ.

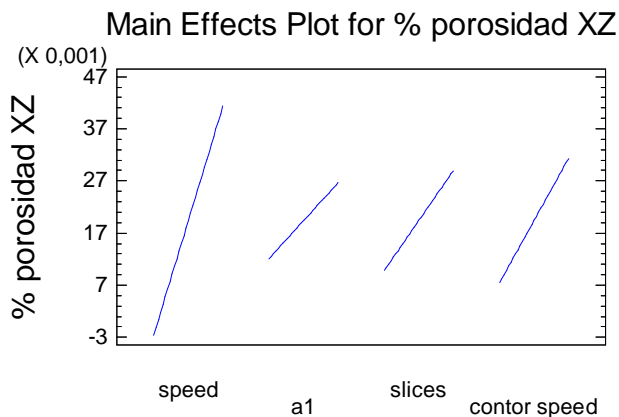


Figura 79: Gráfico de los efectos principales: El objetivo es minimizar la porosidad en el plano XZ. Analizando los efectos por separados mediante el uso de segmentos muestra que la variable más influyente con diferencia para la porosidad en el plano XZ es la variable “speed”, las demás son comparativamente menos incluyentes. Respecto esta variables menos influyentes se aprecia en el gráfico sensibles diferencias quedando “contor speed”, “slices” y “a1” ordenadas de mayor a menor influencia en la porosidad para el plano XZ.

4. Coeficiente de regresión para Porosidad XY y ecuación del modelo ajustado

Constante	= 0,0193969
A:speed	= 0,0219244
B:a1	= 0,00727188
C:slices	= 0,00958438
D:contor speed	= 0,0119406

$$\% \text{ porosidad XZ} = 0,0193969 + 0,0219244 * \text{speed} + 0,00727188 * \text{a1} + 0,00958438 * \text{slices} + 0,0119406 * \text{contor speed}$$

5. Respuesta Optimizada:

El objetivo es minimizar la Porosidad XZ, el valor óptimo es: 0,0

Factor	Low	High	Optimum
speed	-1,0	1,0	-0,994496
a1	-1,0	1,0	0,0211102
slices	-1,0	1,0	0,41642

contor speed -1,0 1,0 -0,0233244

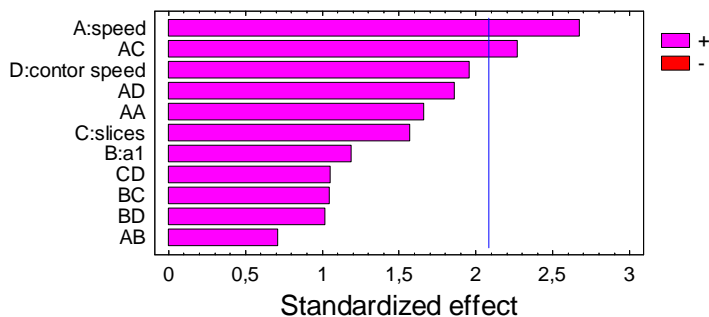
Porosidad XZ con iteraciones de orden 2:

1. Efectos estimados para Porosidad XZ con iteraciones de orden 2.

La siguiente tabla muestra cada uno de los efectos estimados e interacciones. También se muestra el error normal de cada uno de los efectos, el cual mide su error de muestreo [16].

Promedio	= 0,0067211 +/- 0,00977479
A:speed	= 0,0438488 +/- 0,0163848
B:a1	= 0,0145437 +/- 0,0122125
C:slices	= 0,0191687 +/- 0,0122125
D:contor speed	= 0,0238813 +/- 0,0122125
AA	= 0,0456328 +/- 0,0274782
AB	= 0,0116738 +/- 0,0163848
AC	= 0,0372038 +/- 0,0163848
AD	= 0,0305363 +/- 0,0163848
BC	= 0,0128188 +/- 0,0122125
BD	= 0,0124562 +/- 0,0122125
CD	= 0,0128313 +/- 0,0122125

Standardized Pareto Chart for % porosidad XZ



Los errores estándar están basados en un error total con 20 d.f.

Figura 80: Gráfico de Pareto . El objetivo es minimizar la porosidad en el plano XZ. Todas las variables del estudio incluso la variación entre ellas contribuyen positivamente a aumentar la porosidad en el plano XZ, la más influyente en aumentar

la porosidad es la variable “speed”, en segundo lugar AC que es la combinación entre “speed” y “slices”.

2. Análisis de la Varianza para Porosidad XZ con iteraciones de orden 2.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A:speed	0,00854539	1	0,00854539	7,16	0,0145
B:a1	0,00169217	1	0,00169217	1,42	0,2476
C:slices	0,00293953	1	0,00293953	2,46	0,1322
D:contor speed	0,00456251	1	0,00456251	3,82	0,0646
AA	0,00329063	1	0,00329063	2,76	0,1124
AB	0,000605673	1	0,000605673	0,51	0,4844
AC	0,00615164	1	0,00615164	5,16	0,0344
AD	0,00414428	1	0,00414428	3,47	0,0771
BC	0,00131456	1	0,00131456	1,10	0,3064
BD	0,00124127	1	0,00124127	1,04	0,3199
CD	0,00131713	1	0,00131713	1,10	0,3059
Total error	0,0238633	20	0,00119317		
Total (corr.)	0,0596681	31			

R-cuadrado = 60,0066 %

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 38,0102 %

Error Estándar de Est. = 0,0345422

Error absoluto de la media = 0,018118

Estadístico Durbin-Watson = 1,39167 (P=0,0005)

Autocorrelación residual Lag 1 = 0,0578525

La tabla de ANOVA divide la variabilidad en Porosidad XZ en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos [16].

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo así ajustado explica el 60,0066% de la variabilidad en Porosidad XZ. El estadístico R-cuadrado ajustado, el cual es más adecuado para la comparación de números diferentes de variables independientes, es 38,0102%. El error estándar de la estimación muestra la desviación normal de los residuos para ser 0,0345422. El error absoluto de la media (MAE) de 0,018118 es el promedio del valor de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en el orden en el que se suceden en el fichero de datos. Puesto que el p-valor es superior a 0.05, no hay indicios de correlación de serie en los residuos [16].

3. Gráfico de los efectos principales XZ con iteraciones de orden 2.

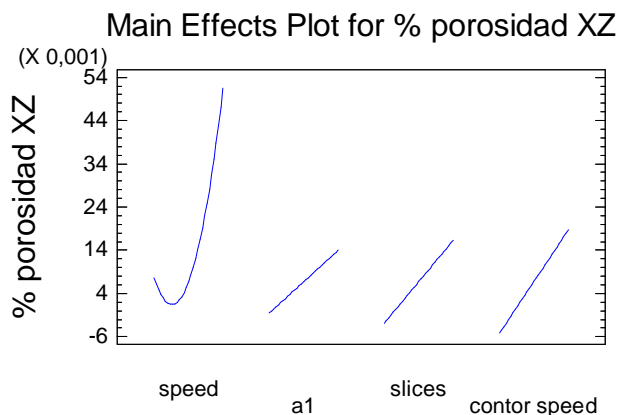


Figura 81: Gráfico de los efectos principales: El objetivo es minimizar la porosidad en el plano XZ. Analizando los efectos por separados mediante el uso de segmentos muestra que la variable más influyente, con mucha diferencia, para aumentar la porosidad en el plano XZ, es la variable “speed”, las demás son comparativamente menos influyentes. En esta gráfica de orden 2, se aprecia que la variable speed experimenta un decrecimiento en los niveles intermedios lo que implica que se minimiza la porosidad en estos casos respecto a los valores extremos.

4. Coeficiente de regresión para Porosidad XZ y ecuación del modelo ajustado con iteraciones de orden 2.

constant	= 0,0067211
A:speed	= 0,0219244
B:a1	= 0,00727187
C:slices	= 0,00958438
D:contor speed	= 0,0119406
AA	= 0,0228164
AB	= 0,00583688
AC	= 0,0186019
AD	= 0,0152681
BC	= 0,00640938
BD	= 0,00622813
CD	= 0,00641562

$$\% \text{ porosidad XZ} = 0,0067211 + 0,0219244*\text{speed} + 0,00727187*a1 + 0,00958438*slices + 0,0119406*\text{contor speed} + 0,0228164*\text{speed}^2 + 0,00583688*\text{speed}*a1 + 0,0186019*\text{speed}*slices + 0,0152681*\text{speed}*contor$$

speed + 0,00640938*a1*slices + 0,00622813*a1*contor speed + 0,00641562*slices*contor speed.

5. Respuesta Optimizada con iteraciones de orden 2.

El objetivo es minimizar la Porosidad XZ, el valor óptimo es: 0,0

Factor	Low	High	Optimum
speed	-1,0	1,0	-0,436452
a1	-1,0	1,0	-0,00745658
slices	-1,0	1,0	0,337471
contor speed	-1,0	1,0	-0,117683

En conclusión, La porosidad obtenida debe considerarse baja en todas las condiciones, ya que únicamente en un caso (experiencia32), en la que se combinan altas velocidades de procesado, bajo solape y alto espesor de la capa de polvo a fundir, se sobrepasa la barrera del 0.1% de porosidad.

Individualmente, todas las variables consideradas tienen un efecto de incremento de los valores de porosidad, tanto en el plano horizontal XY como en el plano vertical XZ. No obstante, el análisis estadístico de los resultados indica que las variables que controlan principalmente la porosidad son las variables “speed” o velocidad de avance de la fuente laser y “slices” o número de capas que se intentar fundir simultáneamente, teniendo esta segunda mayor influencia en el plano XY que en el plano XZ. Las condiciones óptimas de procesado para la obtención de porosidad nula requieren, por tanto, la fusión capa a capa en condiciones de máximo aporte térmico, es decir, con baja velocidad de avance.

Desde el punto de vista del procesado de piezas reales, los valores de las variables podrían modificarse incrementando la productividad y sin sobrepasar un límite aceptable de porosidad o de tamaños máximos de poro, que debería definirse para cada aplicación. La observación de los resultados individuales indica, por ejemplo, que pueden obtenerse capas libres de poros, con porosidad inferior a 0.01% incluso empleando velocidades de avance de hasta o 250 mm/s (experiencias 7 y 19), o bien de hasta 200 mm/s si se funden dos capas simultáneamente (experiencias 10 y 30). Empleando valores de velocidad de 300 mm/s solamente es factible obtener capas con porosidad inferior a 0.01%, si se trabaja fundiendo una sola capa, con alto solape y baja velocidad de fusión de bordes (experiencia 4).

7.3. Estructura interna: Fusión y soldadura adecuada del polvo.

El objetivo fundamental del láser en el procesado de polvo mediante la tecnología de Fusión selectiva por Láser (SLM) es fundir dicha materia prima y convertirla en cordones perfectamente cohesionados entre ellos de manera que todo el metal del que se parte en polvo de convierta en metal continuo.

Para analizar este aspecto, se van a analizar las fotografías de las secciones en el plano XZ de las 32 configuraciones de procesado atacadas químicamente con el objetivo de encontrar fenómenos que evidencien falta de aporte energético en alguna de las configuraciones de procesado.

En la figura 80, se puede apreciar la gran diferencia de velocidades en las que el láser transforma el polvo en metal continuo, se registra un mínimo de 1.79 cm³/h y un máximo de 9.73 cm³/h. Se espera que de haber falta de aporte energético, se haga evidente en las configuraciones que el láser procesa dos capas a la vez.

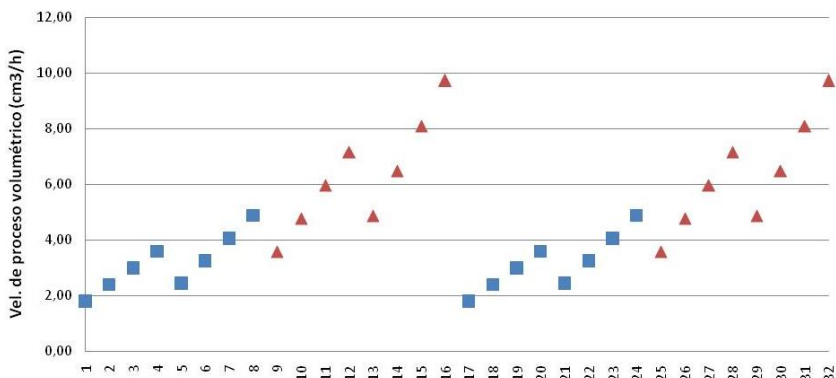
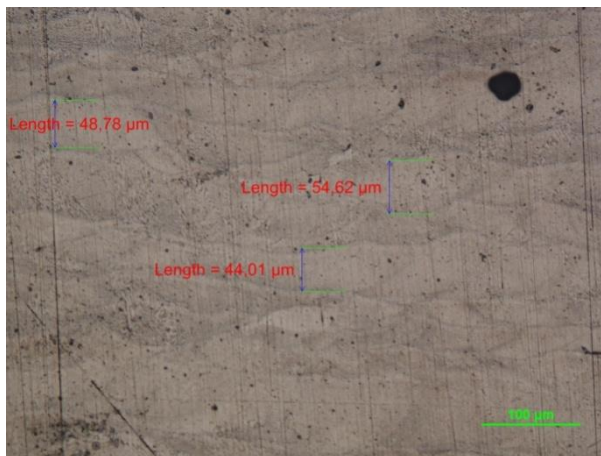


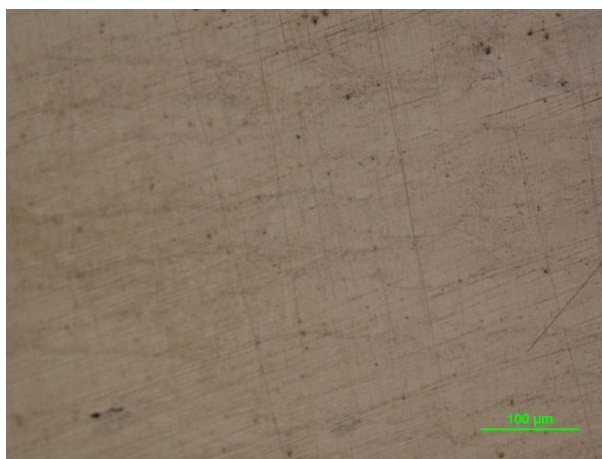
Figura 82: Gráfico que muestra la velocidad en el que el láser ha transformado polvo de la aleación a estudio en material continuo excluyendo tiempos muertos y tiempos de reparto de polvo. (Valores calculados en el apartado 7.1. Velocidades de procesado.). Las configuraciones de procesado que funden el polvo del interior de la probeta en todas las capas están representadas por cuadrados azules, las que funden en capas alternas en triángulos de color rojo.

A continuación se muestran algunas fotografías tomadas en un muestreo de probetas representativas del estudio.

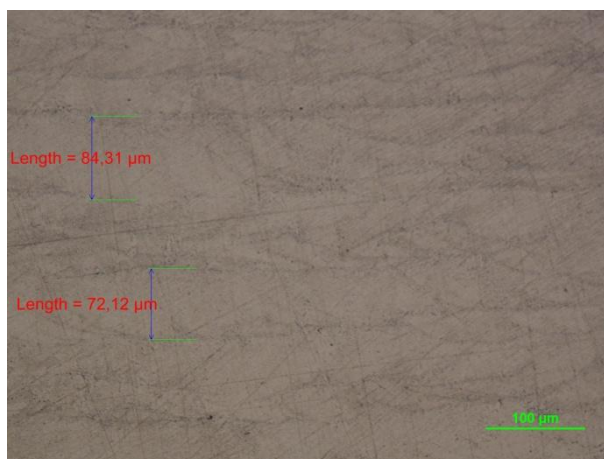
XZ. 1.



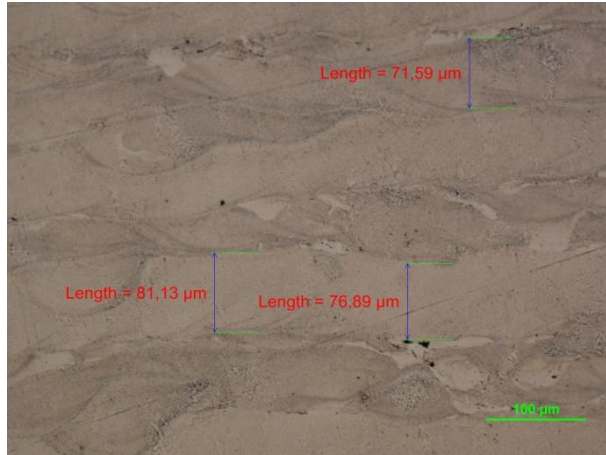
XZ. 4.



XZ. 5.



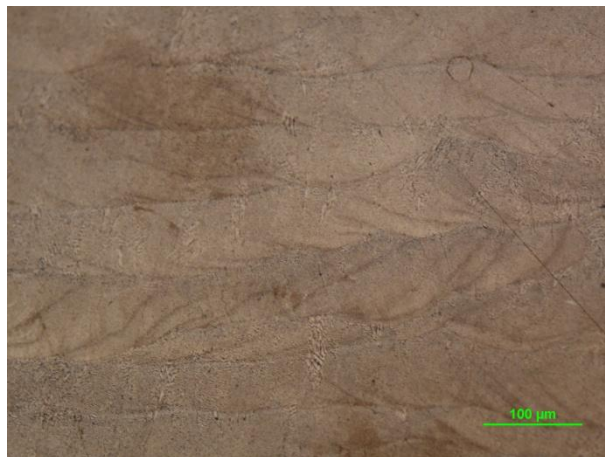
XZ. 7.



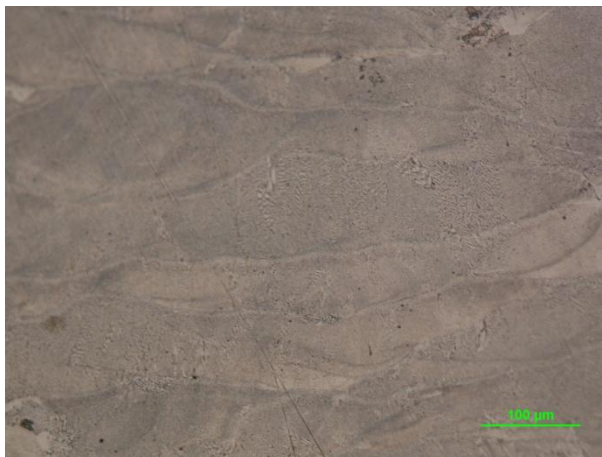
XZ. 11.



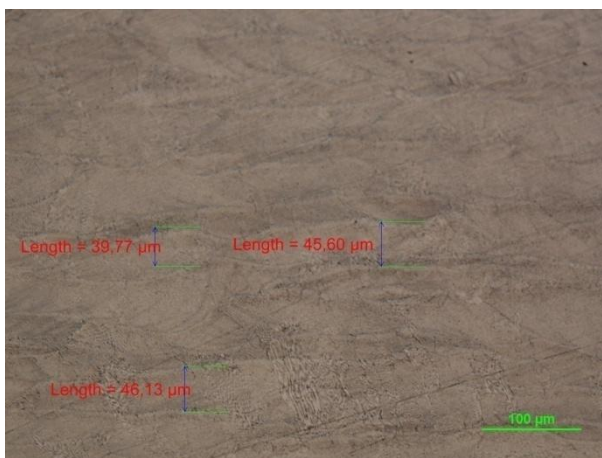
ZX.14.



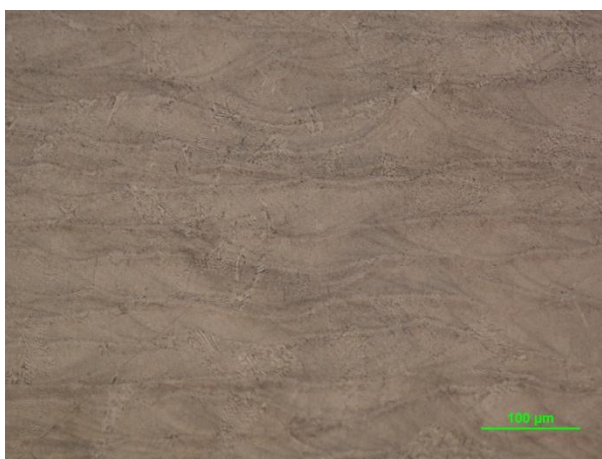
ZX.16.



ZX.17.



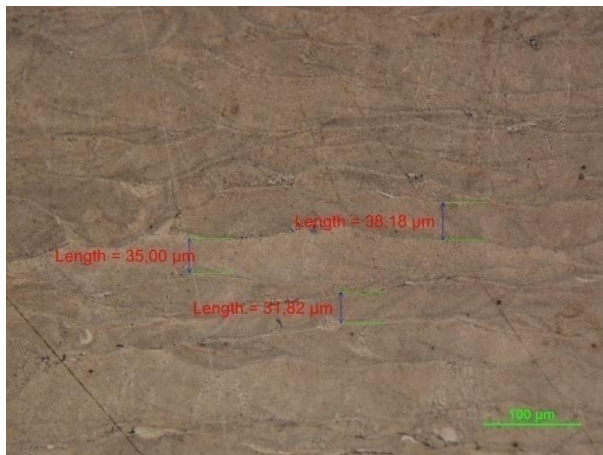
ZX 20



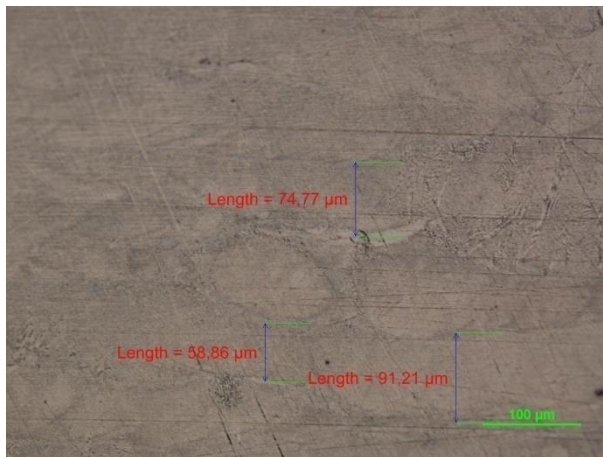
ZX 24



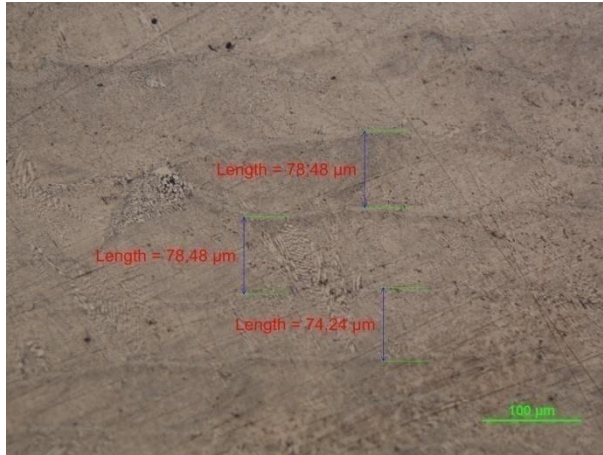
ZX 25.



ZX 27.



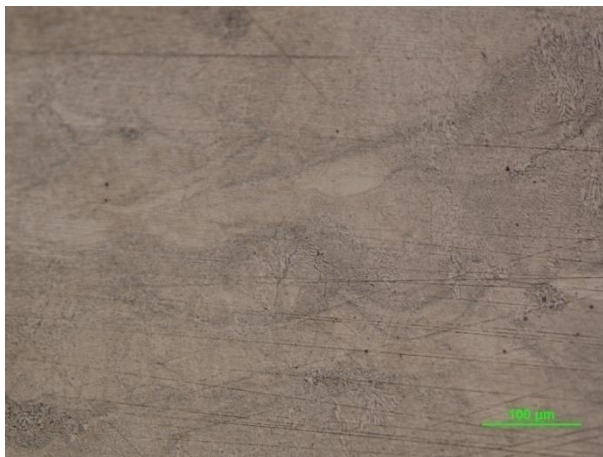
ZX 29.



ZX 30.



ZX 31.



ZX 32.



Figura 83: Imágenes representativas de algunas de las configuraciones del estudio. (1, 4, 5, 7, 11, 14, 16, 17, 20, 24, 25, 27, 29, 30, 31 y 32). Antes de realizar estas fotografías las probetas han sido atacadas químicamente para que se puedan apreciar los cordones de soldadura y los granos de la estructura metalográfica del material. Imágenes obtenidas de las secciones XZ de las probetas.

En conclusión, se puede decir que la microestructura del material obtenido presenta los componentes típicos de las aleaciones CoCrMo fundidas, aunque con una estructura mucho más fina. En comparación con el tamaño interdendrítico de las piezas coladas, que suele ser superior a las 50-100 micras, se obtienen en estas piezas tamaños de grano muy inferiores, en el rango de 1-5 micras. Esta observación es muy relevante, ya que posiblemente, gracias a este notable afino, puedan no ser necesarios posteriores tratamientos de homogenización a 1200°C, tal y como se recomienda en piezas fabricadas por colada convencional para asegurar una buena homogenización.

No se aprecian partículas de polvo sin fundir en las secciones estudiadas de las 32 configuraciones de procesamiento, lo que implica que ha habido suficiente aporte energético en todas ellas para fundir y cohesionar el polvo metálico de partida incluso en las configuraciones en las que el láser ha fundido el material cada dos capas. Esta observación asegura que el proceso es factible en todas las condiciones ensayadas sin que se produzcan fracturas o arrastres de polvo sin fundir en cada pasada del “coater” del equipo.

7.4. Propiedades Mecánicas. Microdureza según norma UNE-EN ISO 6507-1:2006.

Se va a realizar este ensayo a las 32 probetas en el plano XY con la intención de determinar si existe alguna relación entre la configuración de procesado del material y la dureza resultante.

7.4.1. Cálculo microdureza.

Tal y como especifica la Norma UNE-EN ISO 6507-1:2006. El principio de este ensayo se basa en presionar un indentador de diamante, con forma de pirámide recta de base cuadrada y con un ángulo prefijado entre las caras opuestas en el vértice contra la superficie de una probeta, seguidamente se mide la longitud de la diagonal de la huella que ha quedado en la superficie al dejar de aplicar la fuerza de ensayo [17].

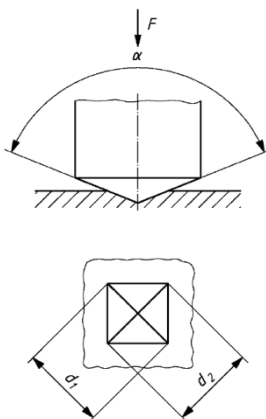


Figura 82: Principio de ensayo de dureza Vickers según norma UNE-EN ISO 6507-1:2006.

Según la norma: “la dureza vickers, es proporcional al coeficiente obtenido al dividir la fuerza del ensayo entre el área de las caras de la huella, que se supone que es una pirámide recta de base cuadrada, con el mismo ángulo en el vértice que el indentador”. [17].

Simbolos/abreviaturas	Denominación
α	Ángulo entre las caras opuestas en el vértice del indentador piramidal (136°)
F	Fuerza de ensayo, en newtons (N)
d	Media aritmética, en milímetros, de las longitudes de las dos diagonales, d_1 y d_2 (véase la figura 1)
HV	Dureza Vickers = Constante $\times \frac{\text{Fuerza de ensayo}}{\text{Área de la huella}} = 0,102 \frac{2F \operatorname{sen} \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \frac{F}{d^2}$

NOTA Constante = 0,102 = 1/9,806 65, siendo 9,806 65 el factor de conversión de kgf a N.

Figura 85: Símbolos y abreviaturas necesarias para calcular la dureza Vickers

Configuración	Var 1: Velocidad de avance del láser para fundir el INTERIOR de cada capa (Speed) en (mm/s).	Var 2: Separación entre pasadas del láser. (d=0,2mm)	Var 3: Slices o capas	Var 4: Velocidad de avance del láser para fundir el PERÍMETRO de cada capa (Speed) en mm/s).	Mirco Dureza Vickers HV1
1	150	0.6d	1	300	542
2	200	0.6d	1	300	542
3	250	0.6d	1	300	561
4	300	0.6d	1	300	561
5	150	0.8d	1	300	542
6	200	0.8d	1	300	576
7	250	0.8d	1	300	546
8	300	0.8d	1	300	561
9	150	0.6d	2	300	561
10	200	0.6d	2	300	561
11	250	0.6d	2	300	551
12	300	0.6d	2	300	551
13	150	0.8d	2	300	602
14	200	0.8d	2	300	602
15	250	0.8d	2	300	602
16	300	0.8d	2	300	581
17	150	0.6d	1	500	542
18	200	0.6d	1	500	581
19	250	0.6d	1	500	602
20	300	0.6d	1	500	602
21	150	0.8d	1	500	591
22	200	0.8d	1	500	581
23	250	0.8d	1	500	581
24	300	0.8d	1	500	542
25	150	0.6d	2	500	542
26	200	0.6d	2	500	602
27	250	0.6d	2	500	551
28	300	0.6d	2	500	602
29	150	0.8d	2	500	524
30	200	0.8d	2	500	542
31	250	0.8d	2	500	581
32	300	0.8d	2	500	542

Figura 86: Según el ensayo normalizado de microdureza (Norma UNE-EN ISO 6507-1:2006) se han registrado los valores de microdureza de las 32 configuraciones de procesado. Todas ellas se encuentran en la horquilla que va desde 524 HVI de dureza mínima hasta 602 HVI de dureza máxima.

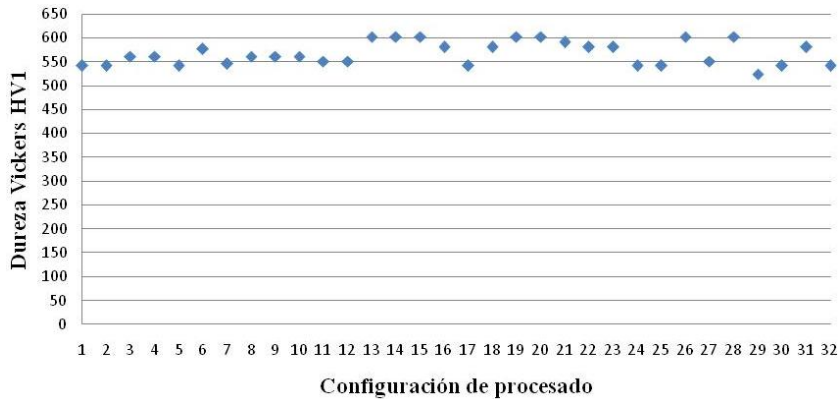


Figura 87: Representación del resultado de micro dureza según norma (UNE-EN ISO 6507-1:2006) de las 32 configuraciones de procesado.

7.4.2. Análisis experimental.

Sin iteraciones:

1. Efectos estimados para microdureza VH1, sin iteraciones:

La siguiente tabla muestra cada uno de los efectos estimados e interacciones. También se muestra el error normal de cada uno de los efectos, el cual mide su error de muestreo [16].

Promedio	= 567,188 +/- 4,52885
A:speed	= 10,35 +/- 12,1522
B:a1	= 2,625 +/- 9,05769
C:slices	= 2,75 +/- 9,05769
D:contor speed	= 4,125 +/- 9,05769

Los errores estándar están basados en un error total con 27 d.f.

Standardized Pareto Chart for Microdureza VH1

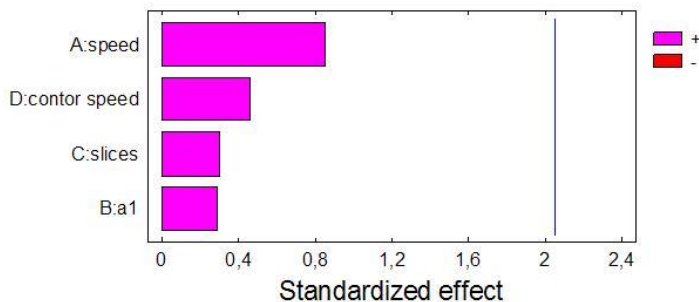


Figura 88: Gráfico de Pareto. Las cuatro variables del estudio contribuyen positivamente a aumentar la microdureza, aunque se desprende que ninguna de las variables consideradas tiene efectos realmente significativos desde el punto de vista estadístico

2. Análisis de la Varianza para microdureza VH1, sin iteraciones:

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A:speed	476,1	1	476,1	0,73	0,4019
B:a1	55,125	1	55,125	0,08	0,7742
C:slices	60,5	1	60,5	0,09	0,7638
D:contor speed	136,125	1	136,125	0,21	0,6525
Total error	17721,0	27	656,334		

Total (corr.)	18448,9	31			

R-cuadrado = 3,94523 %

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0,0 %

Error Estándar de Est. = 25,619

Error absoluto de la media = 20,5883

Estadístico Durbin-Watson = 1,58242 (P=0,0476)

Autocorrelación residual Lag 1 = 0,16743

La tabla de ANOVA divide la variabilidad en Microdureza VH1 en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos [16].

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo así ajustado explica el 3,94523% de la variabilidad en Microdureza VH1. El estadístico R-cuadrado

ajustado, el cual es más adecuado para la comparación de números diferentes de variables independientes, es 0,0%. El error estándar de la estimación muestra la desviación normal de los residuos para ser 25,619. El error absoluto de la media (MAE) de 20,5883 es el promedio del valor de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en el orden en el que se suceden en el fichero de datos. Puesto que el p-valor es superior a 0.05, no hay indicios de correlación de serie en los residuos [16].

3. Gráfico de los efectos principales en la dureza.

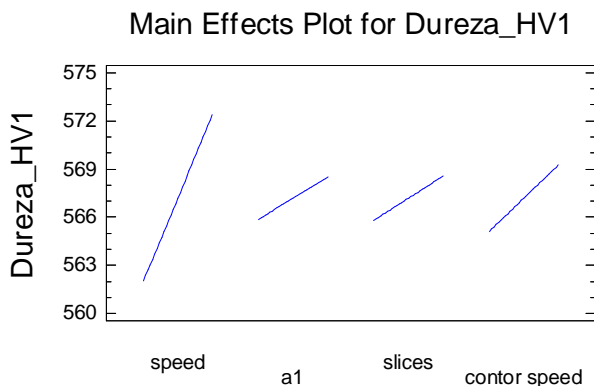


Figura 89: Gráfico de los efectos principales: Analizando los efectos por separados mediante el uso de segmentos muestra que las cuatro variables del estudio contribuyen positivamente a aumentar la microdureza, la más influyente en la microdureza es la variable “speed”, en segundo lugar “contorn speed”, en tercer lugar y cuarto lugar, con una influencia menor y a la vez proporcional las variables “slices” y “a1”.

4. Coeficiente de regresión para Microdureza VH1 y ecuación del modelo ajustado. Sin iteraciones.

Constante	= 567,188
A:speed	= 5,175
B:a1	= 1,3125
C:slices	= 1,375
D:contor speed	= 2,0625

$$\text{Microdureza VH1} = 567,188 + 5,175 \cdot \text{speed} + 1,3125 \cdot \text{a1} + 1,375 \cdot \text{slices} + 2,0625 \cdot \text{contor speed}$$

5. Respuesta Optimizada, Sin iteraciones.

El objetivo es maximizar la Microdureza VH1, el valor óptimo es: 577,113

Factor	Low	High	Optimum
speed	-1,0	1,0	1,0
al	-1,0	1,0	1,0
slices	-1,0	1,0	1,0
contor speed	-1,0	1,0	1,0

En conclusión, se puede decir, que los datos del análisis de efectos de las variables sobre la microdureza indican que ninguna de ellas tiene efectos realmente significativos desde el punto de vista estadístico. Esto significa que las variaciones debidas a los errores experimentales son igual o más grandes que las variaciones debidas a cambios en los valores de los parámetros, como se aprecia en el gráfico de Pareto o en la Tabla de análisis de la varianza (ANOVA).

Globalmente, se han obtenido valores de microdureza HVN muy altos en todas las muestras, que oscilan entre 524 y 602 HV, lo que supone valores superiores a unos 50 HRC. Las aleaciones CoCrMo, según la norma ASTM f75, cuando se procesan mediante colada por técnicas convencionales suele dar valores de dureza normalmente entre 25-35 HRC.

Los elevados valores de dureza obtenida en las probetas de SLM respecto a los procesos de colada, se atribuyen a la elevada velocidad de enfriamiento del metal, que en SLM son muchas más altos, lo que provoca el notable afino de la microestructura.

Individualmente, todas las variables consideradas tienen un efecto de incremento de los valores de dureza, aunque la más significativa es la variable “Speed” o velocidad de avance del láser. Al pasar de -1 a +1, la microdureza HVN promedio se incrementa en 10.35 unidades, por lo que puede considerarse como la variable de mayores efectos. Su influencia se justifica por el efecto que esta variable tiene en el aporte térmico durante cada pasada. Cuanto mayor es la velocidad, menor es el aporte térmico. Ello implica que se darán mayores velocidades de enfriamiento en la zona fundida, lo que contribuye al afino de la estructura obtenida. Dado que ninguno de los parámetros presenta efectos significativos, no se ha procedido en este caso a llevar a cabo análisis de efectos con interacciones de orden 2 o superior.”

8. CONCLUSIONES.

Velocidad de procesado:

Se han obtenido parámetros de láser para procesar CoCrMo ASTMf75 mediante la tecnología M3-linear del fabricante Concept Laser a 9.73 cm³/h. Esta cifra es muy superior a la velocidad de procesado optimizada para los aceros estándar procesados por dicha tecnología que son de 3.24 cm³/h para el AISI 316L/DIN 1.4404 y 5,5 cm³/h para DIN 1.2709. (Estos valores de velocidad de procesado, están calculados en todos los casos, sin contar tiempos muertos y tiempos de reparto de polvo no optimizados en el presente trabajo).

La mejor velocidad de procesado calculada para el CoCrMo, contando tiempos de reparto de polvo y tiempos muertos, para una geometría de 8cm³ y una altura de 1cm, es de 2.5 cm³/h.

Porosidad:

La porosidad obtenida debe considerarse baja en todas las condiciones, ya que únicamente en un caso (experiencia32), en la que se combinan altas velocidades de procesado, bajo solape y alto espesor de la capa de polvo a fundir, se sobrepasa la barrera del 0.1% de porosidad.

Individualmente, todas las variables consideradas tienen un efecto de incremento de los valores de porosidad, tanto en el plano horizontal XY como en el plano vertical XZ. No obstante, el análisis estadístico de los resultados indica que las variables que controlan principalmente la porosidad son las variables “speed” o velocidad de avance de la fuente laser y “slices” o número de capas que se intentan fundir simultáneamente, teniendo esta segunda mayor influencia en el plano XY que en el plano XZ. Las condiciones óptimas de procesado para la obtención de porosidad nula requieren, por tanto, la fusión capa a capa en condiciones de máximo aporte térmico, es decir, con baja velocidad de avance.

Desde el punto de vista de una aplicación al procesado de piezas reales, los valores de las variables podrían modificarse incrementando la productividad y sin sobrepasar un límite aceptable de porosidad o de tamaños máximos de poro, que debería definirse para cada aplicación. La observación de los resultados individuales indica, por ejemplo, que pueden obtenerse capas

libres de poros, con porosidad inferior a 0.01% incluso empleando velocidades de avance de hasta 250 mm/s (experiencias 7 y 19), o bien de hasta 200 mm/s si se funden dos capas simultáneamente (experiencias 10 y 30). Empleando valores de velocidad de 300 mm/s solamente es factible obtener capas con porosidad inferior a 0.01%, si se trabaja fundiendo una sola capa, con alto solape y baja velocidad de fusión de bordes (experiencia 4).

Estructura interna: Fusión y soldadura adecuada del polvo.

La microestructura del material obtenido presenta los componentes típicos de las aleaciones CoCrMo fundidas, aunque con una estructura mucho más fina en comparación con el tamaño interdendrítico de las piezas coladas, que suele ser superior a las 50-100 micras, se obtienen en estas piezas tamaños de grano muy inferiores, en el rango de 1-5 micras. Esta observación es muy relevante, ya que posiblemente, gracias a este notable afino, puedan no ser necesarios posteriores tratamientos de homogenización a 1200°C, tal y como se recomienda en piezas fabricadas por colada convencional.

No se aprecian partículas de polvo sin fundir en las secciones estudiadas de las 32 configuraciones de procesado, lo que implica que ha habido suficiente aporte energético en todas ellas para fundir y cohesionar el polvo metálico de partida incluso en las configuraciones en las que el láser ha fundido el material cada dos capas. Esta observación asegura que el proceso es factible en todas las condiciones ensayadas sin que se produzcan fracturas o arrastres de polvo sin fundir en cada pasada del “coater” del equipo.

Propiedades mecánicas: Microdureza.

Los datos del análisis de efectos de las variables sobre la microdureza indican que ninguna de ellas tiene efectos realmente significativos desde el punto de vista estadístico. Esto significa que las variaciones debidas a los errores experimentales son igual o más grandes que las variaciones debidas a cambios en los valores de los parámetros, como se aprecia en el gráfico de Pareto o en la Tabla de análisis de la varianza (ANOVA).

Globalmente, se han obtenido valores de microdureza HVN muy altos en todas las muestras, que oscilan entre 524 y 602 HV, lo que supone valores superiores a unos 50 HRC. Las aleaciones CoCrMo, según la norma ASTM f75, cuando se procesan mediante colada por técnicas convencionales suele dar valores de dureza normalmente entre 25-35 HRC.



Los elevados valores de dureza obtenida en las probetas de SLM respecto a los procesos de colada, se atribuyen a la elevada velocidad de enfriamiento del metal, que en SLM son muchas más altos, lo que provoca el notable afino de la microestructura.

Individualmente, todas las variables consideradas tienen un efecto de incremento de los valores de dureza, aunque la más significativa es la variable “Speed” o velocidad de avance del láser. Al pasar de -1 a +1, la microdureza HVN promedio se incrementa en 10.35 unidades, por lo que puede considerarse como la variable de mayores efectos. Su influencia se justifica por el efecto que esta variable tiene en el aporte térmico durante cada pasada. Cuanto mayor es la velocidad, menor es el aporte térmico. Ello implica que se darán mayores velocidades de enfriamiento en la zona fundida, lo que contribuye al afino de la estructura obtenida.

9. PROPUESTA DE INVESTIGACIONES FUTURAS

La investigación realizada en el presente trabajo fin de master, ha permitido definir y acotar rangos de variables adecuados para la fabricación de muestras de aleación Co-Cr-Mo que posean un rango adecuado de porosidad. No obstante, la cuantificación del grado de porosidad, no es un parámetro suficiente por sí mismo para determinar si el material es o no adecuado para una determinada aplicación. Con el fin de completar el nivel de conocimiento alcanzado, se propone ampliar el campo de estudio en los siguientes aspectos:

1. A partir de las muestras disponibles, se considera conveniente llevar a cabo una evaluación de tamaños y forma de los defectos encontrados. Los defectos internos son más graves si presentan formas angulosas y tamaños grandes, ya que actúan como concentradores de tensión o zonas favorables para inicio y propagación de grietas.
2. Sería deseable poder llevar a cabo una evaluación de comportamiento mecánico en ensayos reales, tanto en ensayos estáticos como en ensayos de fatiga. El esfuerzo experimental necesario es lógicamente mucho mayor, ya que se requeriría obtener una mayor cantidad de muestras y estas deberían ser de tamaño suficiente y adecuado al tipo de ensayo a realizar. La caracterización, en todo caso, debería enfocarse a la evaluación de las propiedades exigidas para una aplicación concreta de los componentes obtenidos con el proceso. Un determinado grado de porosidad o tamaño de defectos podría ser aceptable en un molde, por ejemplo, pero inaceptable para algunos tipos de implantes que deben soportar ciclos de fatiga.
3. Empleando una metodología similar, pueden evaluarse los efectos de otras variables que no se han considerado en este estudio, tales como el modo de rastreo del láser (hatching), la potencia del láser, el tamaño del foco o la granulometría del polvo empleado. La metodología puede reproducirse de modo similar para evaluar estas variables u otras, afinando, si así se desea, el rango de estudio. Por ejemplo, los efectos de la velocidad podrían estudiarse con mayor precisión en un rango concreto de interés, también podría intentarse evaluar las posibilidades de procesado con tres capas de polvo simultáneas, un factor que contribuye de manera decisiva a la productividad del proceso.



Empleando una metodología similar puede también optimizarse el procesado de otros tipos de polvos con esta tecnología.

10. ANEXOS.

ANEXO 1:

CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA (TFA)

Según wholers report, (Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. 2010.) existen 51 empresas en el mundo que comercializan tecnologías de fabricación aditiva. Estas empresas están repartidas entre EEUU [15], Canadá 1, Japón 9, China 5, Korea 2, Singapur 1, Inglaterra 2, Francia 2, Irlanda 1, Italia 1, Suecia 1, Israel 3 y otros 7. Según esta publicación especializada, estas empresas desde 1988 hasta 2009 ya habían vendido un total de 38.214 máquinas de fabricación aditiva en todo el mundo.

Las tecnologías de fabricación aditiva son aquellas tecnologías que a partir de un fichero CAD 3D son capaces de fabricar geometrías en tres dimensiones mediante un principio de superposición de capas de material.

La gran mayoría de tecnologías de fabricación aditiva, están diseñadas para procesar polímeros y metales, aunque también, existen tecnologías capaces de procesar cerámicas, papel, o productos de alimentación como chocolate, queso y helado mediante este principio de fabricación.

Existen distintas maneras de clasificar las tecnologías de fabricación aditiva, en este caso, se van a presentar mediante una clasificación que, sin profundizar en cada una de las tecnologías, pretende ofrecer un visión objetiva y rigurosa de las mismas atendiendo en primer lugar al **tipo de material** que procesan (polímeros, metales, y otros), en segundo lugar a la **técnica de construcción** y en tercer lugar se van a especificar todas las **tecnologías que utilizan** cada tipo de técnica de construcción.

La información para realizar esta clasificación está basada en la información recopilada en el wholers report 2010, en el informe Cotec sobre tecnologías de fabricación aditiva publicado en 2011, de los últimos certámenes de la feria Euromold (certámenes comprendidos entre los años 2007 y 2011), la información publicada por cada uno de los fabricantes de tecnología en distintos medios y de la experiencia acumulada en AIMME en este campo en el que lleva trabajando desde 1997.

TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA EN POLÍMEROS.

Técnica de construcción	Tecnología	Fabricante	Nombre del modelo de máquina	Volumen construcción en (mm)	Materiales procesables según el fabricante
1. Impresión de termoplásticos	1.1. Inkjet printing	solidscape	D66+, D76, R66, T612BT2	DE 150*150*100 A 300*150*150	Termoplásticos.
		Microjet technology	T52 y T160	203*203*254 a 300*300*203	
2. Extrusión de termoplásticos	2.2. Fused deposition modeling	Fab@Home	Fab@Home		Chocolate*, helado* y queso*.
		Bits from bytes	Bits from bytes		
		Beijing Yinhua	e-print, f-print, Gia, GIB, mem-320 v 450	de 120*200*200 a 350*380*450	ABS
		HP		203*152*152	
	Stratasys	Fortus 360mc, 400mc, 900mc, dimesion bst1200es, sst 1200e, uprint plus v uprint.	203*203*102 a 915*610*915	ABS m30, PC, PC-ABS, PC-ISO, PPSF, Uitem 9085	
2.2. Dispensing of material into a medium	Envisiontec	3D- Bioplotter IV	150*150*140	PLGA, PLLA, PCL, siliconas, chitosan, colágeno, ácido alginico.	
3. Fusión de polvos de termoplástico.	3.1. Selective laser sintering	Aspect Inc.	SEMplíce 550, 300 y 150	de 135*135*200 a 550*550*500	Termoplásticos
		Wuhan Binhu Mech and elec.	HRPS-IIA, IIIA, IV	DE 150*250*250 A 500*500*400	
		Trump Precision Machinery	Elite p3500 y p5000	de 350*350*600 a 480*480*600	
		3dsystems	spro 60, 230 y 140	De 380*330*457 a 550*550*750	Poliestireno PS, Poliamida PA, PA con carga de fibra de vidrio, elastómeros, PA con carga de aluminio.
		EOS	Formiga p 100, p395, p760, p800	de 200*250*330 a 730*380*540	PS, PA, PA con carga de fibra de virio y de aluminio, PEKK.
	Beijung longyuan	AFS700, 500, 350 LaserCore500 y 700	de 360*360*500 a 700*500*500	PS y Cera.	
3.2. Selective mask sintering	Sintermask	Zorro	300*200*800	Termoplásticos	
4. Laminación	4.1. Plastic Sheet Lamination	Solido	sd300 pro	160*210*135	Termoplástico PVC
5. Impresión de termoestables	5.1. inkjet printing	3dsystems	Prosed SD 3000, prosed HD3000, Project project CP 5000, Project CP 3000 wax printer, projet cpx 3000 wax printer	De 3000*185*200 a 550*393*300	Fotopolímeros : Termoplásticos y resinas acrílicas.
	5.2. Polyjet	Objet	Connex 500, 350 y eden 500V, 350v, 350, 260v, 260, 250 y alaris 30	de 250*250*200 a 490*390*200	
6. Solidificación de fotopolímeros termoestables.	6.1. Estereolitografía (SLA)	Unirapid INC	URII-SP1502 Y URM-HP301	de 30*30*30 a 150*150*150	Fotopolímeros termoestables
		cmet inc	Rapid meister 6000 II, NRM Y 3000.	de 300*300*250 a 610*610*500	
		Wuhan Binhu Mech and elec.	HRPL-I, II Y III	De 300*300*300 a 600*600*500	
		Shanghai Niotech	rs-350s, 450s , 600 s	de 350*350*300 a 600x600*500	
		Shaanxi hentgtong	SPS 600, 450, 350 SCPS350	de 350*350*350 a 600*600*400	
		Guangzhou electronic	GHET01-350 Y 500	500*400*500	
		DWS	Digital WAX 008, 028 y 029	de 65*65*90 a 110*110*70	
	3dsystems	Viper si2, iPro 8000, 9000, 9000x1 y 8000MP	de 250*250*250 a 650*750*500	Fotopolímeros : Termoestables, nanocomposites, polímeros biodegradables y biocompatibles para aplicaciones dentales.	
6.2. Digital light processing (DLP)	Envisiontec	Micro, Perfactory, Aureus, Ultra	de 40*30*100 a 267*165*203	Fotopolímeros (Acrílicas, epoxy)	
	Carima	master 2015, 2011, 1267	de 120*67*200 a 200*110*200	Fotopolímeros	
	Firm transtér imaging (FTI)	3dsystems	V-flash FTI 230	228*171*203	Fotopolímeros (Resinas crílicas)
7. Deposición de aglomerantes sobre polvo.	7.1. MIT's 3DP	Z Corp	Zprinter 310, 350, 450 y 650	de 200*250*200 a 250*380*200	Termoestables y elastómeros
	7.2. Inkjet Printing	voxeljet	Vx 500, 100 y 4000	de 500*400*300 a 4000* 2000 * 1000 mm	

Figura 90: Clasificación de tecnologías de fabricación aditiva de polímeros. [18], [19],[20], [21] y [24].

1. Impresión de termoplásticos.

Esta técnica utiliza múltiples cabezales de impresión que mediante aporte de calor funde uno o varios termoplásticos que deposita en capas. Tecnologías que utilizan esta técnica es inkjet printing [1].

1.1. Inkjet printing.

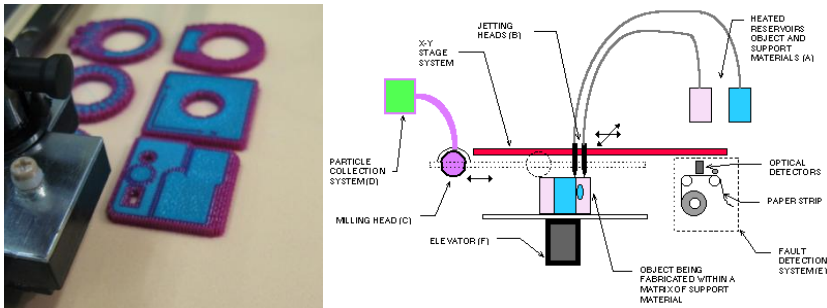


Figura 91: Tecnología inkjet printing, fabricante Solidscape, Izquierda: imagen de modelo D66+ procesando piezas. Derecha: esquema de proceso.

2. Extrusión de termoplásticos.

Esta técnica utiliza uno o varios cabezales de extrusión que mediante aporte energético calienta el termoplástico hasta un estado semifundido que va a ir aportar en cordones. Tecnologías que utilizan esta técnica son: Fused deposition modeling (FDM) y Dispensing of material into a médium, modelo de máquina denominado 3D- Bioplotter IV.

2.1. Fused deposition modeling (FDM).

Esta tecnología utiliza un material para construir la pieza y un segundo material para construir el soporte que será eliminado posteriormente disolviéndolo en agua.

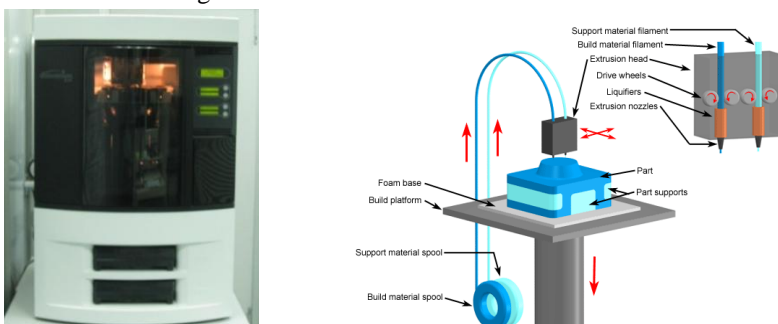


Figura 92: Tecnología Fused deposition modeling (FDM), fabricante Stratasys. Izquierda: imagen de modelo dimensión sst. Derecha: esquema de proceso.

2.2. Dispensing of material into a médium.

El 3D-Bioplotter ® es una herramienta de procesamiento de una gran variedad de biomateriales dentro del proceso de Ingeniería de Tejidos.

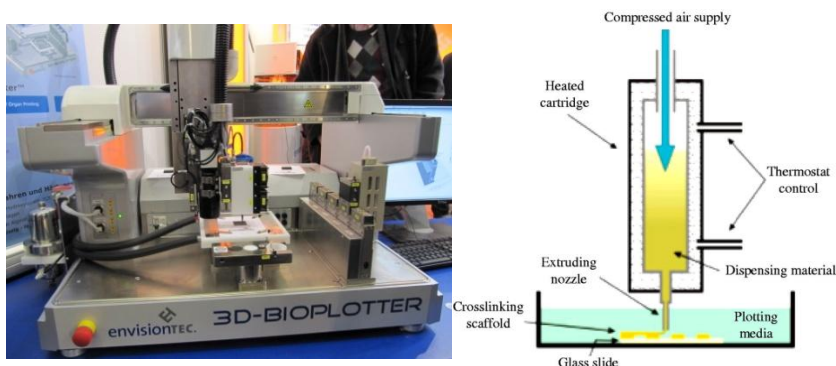


Figura 93: Tecnología Dispensing of material into a medium, fabricante Envisiontec, Izquierda: imagen de modelo 3d- bioplotter. procesando piezas. Derecha: esquema de proceso.

3. Fusión de polvos de termoplástico.

Esta técnica utiliza polímeros termoplásticos en polvo como materia prima y una fuente de energía que aporta calor de manera selectiva para fundir el material correspondiente a cada capa. Existen dos tecnologías que utilizan este principio que son Selective láser sintering (SLS) y Selective mask sintering (SMS).

3.1. Selective láser sintering (SLS).

Esta tecnología utiliza un láser como fuente de energía. El láser mediante un procesado de barrido funde la geometría de cada capa.

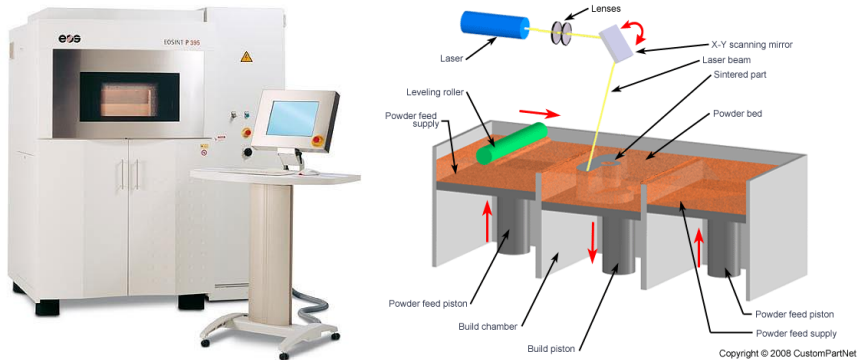


Figura 94: Tecnología Selective láser sintering (SLS), fabricante EOS, Izquierda: imagen de modelo P-395. Derecha: Esquema de proceso.

3.2. Selective mask sintering (SMS).

La singularidad de esta tecnología es que puede procesar la geometría de una capa completa en un destello mediante el uso de una fuente de infrarrojos y una máscara.

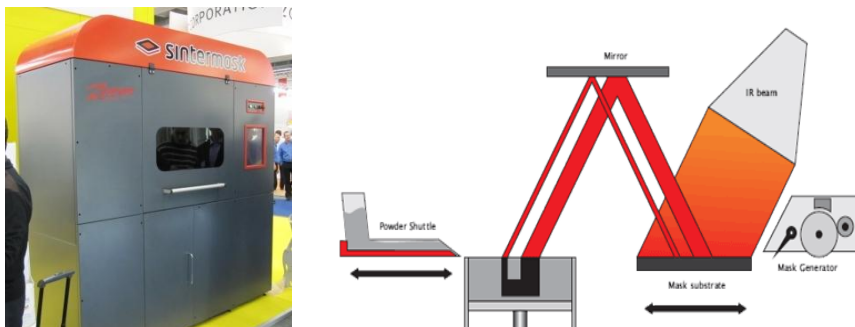


Figura 95: Tecnología selective mask sintering (SMS), fabricante sintermask, Izquierda: imagen del modelo de máquina Zorro. Derecha: Esquema de proceso. (Ref. <http://www.sintermask.com>)

4. Laminación.

Esta técnica utiliza como materia prima film de PVC que mediante superposición y pegado de láminas cortadas en secciones de dicho material consigue producir piezas en 3D. La tecnología se denomina Plastic Sheet Lamination

4.1. Plastic Sheet Lamination



Figura 96: Tecnología Plastic Sheet Lamination, fabricante sólido, Izquierda: imagen del modelo sd300 pro. Derecha: Esquema de proceso. (ref: www.sólido3d.com/).

5. Impresión de termoestables.

Esta técnica utiliza múltiples cabezales de impresión que aportan polímeros termoestables en capas, estos polímeros en estado líquido son polimerizados por la acción de una luz ultravioleta que hace que cambien de estado líquido a estado sólido.

5.1. inkjet printing.

Este tecnología utiliza dos inyectores para depositar dos materiales en cada capa para obtener por una parte pieza y por otra soporte.

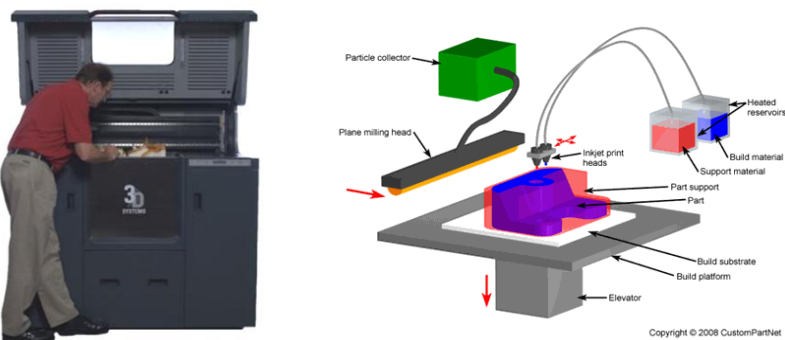


Figura 97: Tecnología inkjet printing, fabricante 3dsystems. Izquierda: imagen del modelo ProJet 5000. Derecha: imagen de proceso. (Ref. <http://www.3dsystems.com>)

5.2. Polyjet.

Esta tecnología utiliza múltiples inyectores para poder depositar simultáneamente distintos materiales en cada capa.

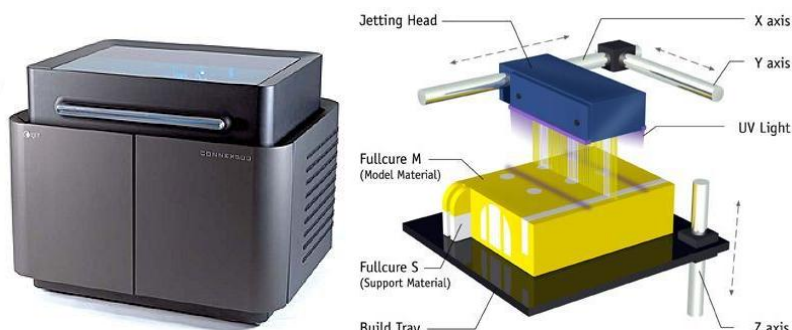


Figura 98: Tecnología Polyjet, fabricante Objet. Izquierda: imagen del modelo Connex 500. Derecha: imagen de proceso. (Ref: <http://www.objet.com/>).

6. Solidificación de fotopolímeros termoestables.

Esta técnica utiliza fotopolímeros termoestables en estado líquido como material de partida que mediante la acción de un láser o una lámpara de luz blanca polimeriza en capas el material para obtener piezas en 3D.

6.1. Estereolitografía (SLA).

Esta tecnología utiliza un láser como iniciador de la polimerización.

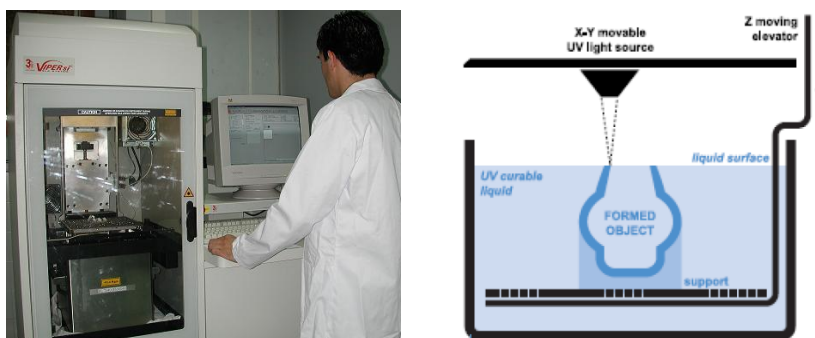


Figura 99: Tecnología estereolitografía (SLA) en las instalaciones de AIMME, fabricante 3dsystems. Izquierda: imagen del modelo Viper si2. Derecha: Esquema de proceso. (Ref: <http://www.3dsystems.com>)

6.2. Digital light processing (DLP).

Esta tecnología procesa la geometría de una capa completa en un destello mediante el uso de un proyector de luz blanca y una máscara.



Figura 100: Tecnología Digital light processing (DLP) fabricante Envisiontec. Izquierda: imagen del modelo Perfactory. Derecha: Esquema de proceso. (Ref. <http://www.ensiviontec.de>).

7. Deposición de aglomerantes sobre polvo.

En esta técnica se reparte polvo en finas capas y mediante la deposición selectiva de un polímero que desempeña una función de aglomerante se consolida el polvo en cada capa.

7.1. MIT's 3DP.

Utiliza termoestables como polímero aglomerante, se han especializado en conseguir piezas de colores.

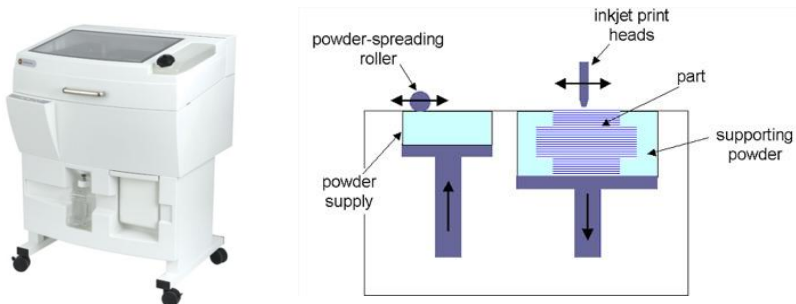


Figura 101: Tecnología MIT's 3DP, fabricante Z Corp. Izquierda: imagen del modelo Zprinter 310. Derecha: Esquema de proceso. (Ref. <http://www.zcorp.com>).

7.2. Inkjet Printing.

Utiliza termoplásticos como polímero aglomerante, se han especializado en conseguir piezas que sirvan como máster para fundición.

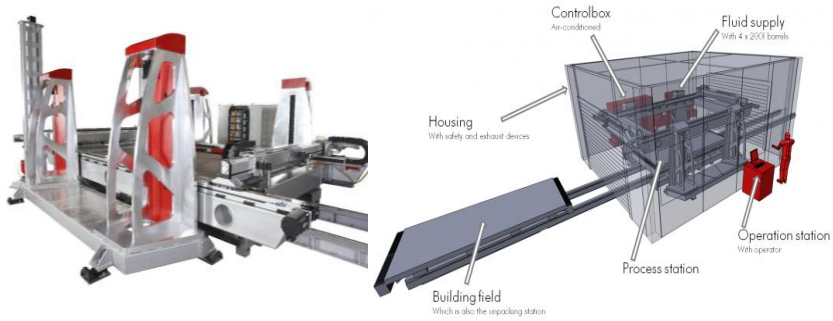


Figura 102: Tecnología inkjet printing, fabricante voxeljet. Izquierda: imagen del modelo vx 4000. Derecha: Esquema de proceso. (Ref. www.voxeljet.de/en/).

TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA EN METALES.

Técnica de Construcción	Tecnología	Fabricante	Nombre del modelo de máquina	Volumen construcción en (mm)	Materiales procesables según el fabricante	
1. Inyección aglomerantes sobre polvos metálicos.	1. Inkjet	Ex one	M-PRINT, M-LAB, Imagen RX-D, Pro metal R2	40*60*35 a 780 * 400 x*400 mm	420 and 316 Stainless Steel/Bronze, Tool Steel, Bronze	
		Feubic			Acero inoxidable, Ti y Cu en desarrollo	
2. Fusión de metales en la deposición.	2.1. Laser-engineered net shaping (LENS)	Optomec	LENS 750	300*300*300	Titanium: Cp Ti, Ti-64, ti 6264, Aceros de herramienta: H13, A2, s7, acero inox: 304, 316, 420, 17-4 PH, SUPERALEACIONES: In625, IN718, Hastaloy X. Otros: Copper, 4047Al, Stellite 21.	
			LENS MR-7			
			LENS 850-R	1500-900*900		
		POM	DMD505D	863*863*609		H13, S7, 420SS, 316SS, CPM1V, CPM10V, CERMETS, C250, C276, IN625, IN718, WASP-alloy, invar, Stellite6, Stellite21, stellite31, Ti, ti64.
			DMD103/105D	300*300*300		
			206D-44R(ROBOTIC DMD)	1950*2140*330*		
			206D-66R (robotic DMD)	3200*3665*360*		
		DMD IC106 (Robotic insert chamber m/c)	800 reach 6-axis robot			
			ACCUFUSION	LC-105		IN-625, IN-738, Ti64, ss316, ss420, h13, stellite-6, cpm-9v, AL-4047
			Irepa Laser	VC LF 300		400*350*200
		VH LF4000		650*700*500		
		VL LF4000		950*900*500		
InssTEK	Metalworks 350	800*640*400	Aceros inox, acero herramienta, aleaciones de Ni y Cobalto, aleaciones de aluminio y de cobre.			
3. Fusión de metales previamente repartidos.	3.1. Selective laser melting (SLM)	Wuhan Binhu Mech&Elec.	HRPM	250*250*250	aceros inox y otros metales.	
		3DSYSTEMS	Sinterstation Pro DM 125	125*125*125	Aceros, aleaciones de titanio, cromo cobalto y otros metales.	
			Sinterstation Pro DM 250	250*250*300		
		MTT Technologies Group	SLM250-300	250*250*300	316L, Aceros inox, 14-4 ph, H13, Alsi-12, Al-Si-10, titanio, Ti64, Ti6Al7Nb, Cromo-cobalto, Inconel 718 y 625	
			SLM125	125*125*125		
		Phenix Systems	PXL201	250*250*300	Metal	
			PXM	140*140*100	Metal	
			PXS	100*100*80	Metal	
			PXS DENTAL	100*100*80	cobalto cromo	
			PM100T	100 DIAMETRO*100	ceramic, metal	
			PM100T DENTAL	100 DIAMETRO*100	cobalto cromo	
			PM250	250 DIAMETRO*300	ceramic, metal	
		Concept laser	M3 linear	250*250*250/300*350*300	Aceros AISI 316L/DIN1.4404, DIN 1.2709 y (similar DIN 1.2083)	
			M2 Linear	250*250*280	Mismo que M3linear mas Ti64, aleaciones de Ti, y otras aleaciones	
			M1 Cusing		Mismo que M3linear mas Fe-Cu alloy, Cr-Co alloys, inconel.	
		EOS	M270	250*250*215	Acero, Cr-co, Ti, inconel, aluminio.	
			SLM50	70 dia * 40	316l, Co-Cr, Gold, paladio.	
			SLM100	125*125*100	h13, Ti, Al, Cr-Co, 136L, aceos Inox, Inconel, Gold, materiales ceramicos.	
			SLM250	250*250*230	H13, Ti, Al, Cr-Co, 136L, aceos Inox, Inconel.	
		3.2. Electron Beam Melting (EBM)	Arcam	A1	200*200*180	Ti 64, Ti67, CrCo, Inconel, Acero. (Materiales conductores)
				A2	300 dia *200 or 250*250*350	

Figura 103: Clasificación de tecnologías de fabricación aditiva de metales. [18], [19],[20], [21], [22], [23] y, [24]

1. Inyección de polvos con aglomerantes.

Esta técnica dispensa selectivamente aglutinante químico sobre capas de metal en polvo previamente repartido.

1.1. Inkjet

Esta tecnología requiere de un postproceso de sinterización posterior.



Figura 104: Tecnología inkjet, fabricante voxeljet. Izquierda: imagen del modelo M-print. Derecha: Esquema de la disposición de elementos auxiliares. (Ref. <http://www.exone.com/>).

2. Fusión de metales en la deposición.

2.1. Láser-engineered net shaping.

En esta tecnología va depositando el polvo metálico a la vez que lo va fundiendo mediante un láser.

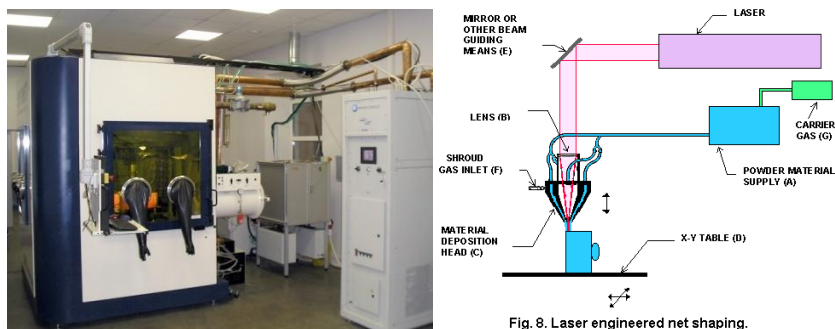


Figura 105: Tecnología LENS. Izquierda: imagen de máquina LENS 850-R. Derecha: Esquema del proceso. (Ref: <http://www.optomec.com>).

3. Fusión de metales previamente repartidos.

En esta técnica reparte el polvo en capas y una fuente de energía funde selectivamente el polvo metálico que se quiere procesar. Con esta técnica se han desarrollado dos tecnologías: Selective láser melting (SLM) y electro beam melting (EBM).

3.1. Selective láser melting (SLM).

Esta tecnología utiliza un láser entre 100w a 400W como fuente energética

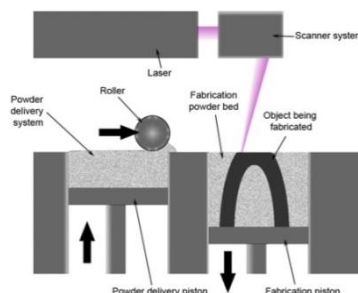


Figura 106: Tecnología SLM, fabricante Concept láser GmbH. Izquierda: imagen del modelo M3-linear. Derecha: Esquemas proceso(<http://www.concept-láser.de/>).

3.2. Electron beam melting (EBM).

Esta tecnología utiliza un chorro de electrones de 3000W como fuente energética para fundir el metal.

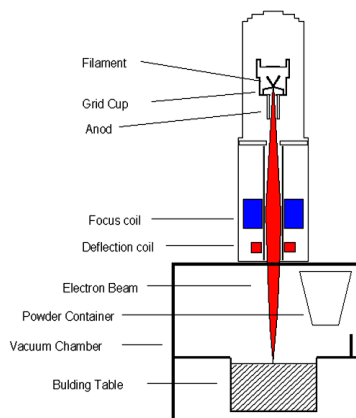


Figura 107: Tecnología EBM, fabricante Arcam. Izquierda: imagen del modelo A2 . Derecha: Esquemas proceso (<http://www.arcam.com>).

OTRAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA.

1. Tecnología híbrida entre selective láser melting y mecanizado. (<http://www.matsuura.com>).

Esta máquina combina ambas técnicas en el procesado para conseguir las ventajas de ambos procesos alta complejidad geométrica (fabricación aditiva) y elevada calidad superficial y tolerancia dimensional (mecanizado).



Figura 108: máquina LUMEX Avance-25

2. Tecnología D-SHAPE. (<http://d-shape.com/cose.htm>)

Esta tecnología permite la fabricación aditiva de estructuras de piedra de grandes dimensiones en capas de entre 5 y 10 mm de espesor.



Figura 109: Izquierda: Tecnología D-SHAPE. Derecha: Detalle de fabricación.

11. BIBLIOGRAFÍA.

1. **Lancaster J.F.** Metallurgy of welding 4 ed. Allen and Unwin, London UK 1986.
2. **Box G. Hunter W and Hunter J.S.** Statistics for experimenters. An introduction to design, data análisis and model building. Ed. Jhon Wiley and Sons, 1978).
3. **Hin, Teo Swee.** Engineering materials for biomedical applications. s.l. : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
4. **Joseph R. Davis, ASM International.** Handbook of materials for medical devices . s.l. : ASM International, 2003.
5. **Niinomi, Mitsuo.** Recent titanium R&D for biomedical applications in japan. 6, JOM JOURNAL OF THE MINERALS, METALS AND MATERIALS SOCIETY, Vol. 51, pp. 32-34.
6. **Harvey, Philip D.** Engineering properties of steel. s.l. : American Society for Metals, 1982.
7. **George E. Totten.** Steel heat treatment. s.l.
8. **ASM Handbook Heat Treating.** Vol. 4.
9. **Ratner, Buddy D.** Biomaterials science: an introduction to materials in medicine. 1996.
10. **Ajit K. Mishra, Mark A. Hamby, and William B. Kaiser.** Metallurgy, Microstructure, Chemistry and Mechanical Properties of a New Grade of Cobalt-Chromium Alloy Before and After Porous-Coating. s.l. : American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1999, Cobalt Base Alloys for biomedical applications ASTMSTP 1365.
11. **BJ. D. Bobyn, C. A. Engh.** Biologic fixation of hip prostheses: review of the clinical status and current concepts. 1983, Advances in Orthopaedic Surgery, pp. 137-150.
12. **Band, Tim J.** Materials and Metallurgy.
13. **V. Amigó, A. Vicente, F. Romero, Y A. Paolini.** Influencia del tratamiento HIP en la distribución de los carburos en prótesis Co-Cr-Mo. 2, 2004, Bol. Soc. Esp. Ceram. V., Vol. 43, pp. 573-577.

14. **V. Amigó y F. Romero.** Introducción a la pulvimetalurgia. Curso 2006-07, pp 5 y 6.
15. **UPV.** (2011). Asignatura Técnicas avanzadas de fabricación Esquema del proceso EDM por hilo o electroerosión por hilo., Tema: Procesos de mecanizado no convencionales, pag 20 y 21.
16. **Statgraphics Plus 5.** Manugistics, Inc. 9715 key west avenue rockville, maryland 20850. U.S.A.
17. **AENOR.** UNE EN ISO 6507-1 (2006). Materiales metálicos ensayos de dureza vickers. Parte 1: método de ensayo.
18. **Blasco Puchades J.R.** et al. (2011). A study of mechanical and biological behavior of porous Ti6Al4V fabricated on EBM. Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping – Proceedings of MESIC 2011, 28 Sep – 01 Oct, Cádiz, Spain.
19. **Informe COTEC** (2011) sobre Tecnologías de Fabricación Aditiva. Coordinación Fundación Pro dintec Participa AIMME, AIJU, Universidad de Gerona, ASERM, ADI, LEITAT, SOCINSER, AITIIP, EOS GmbH, Hoffman ibérica, ELISAVA, ASCAMM, Ramen, IQS y Universidad de Oviedo.
20. **Petrović V, Haro Gonzalez J.V, Jorda Ferrando O, Delgado Gordillo J, Blasco Puchades JR, Portolés Griñan L. (2010).** Additive Layered Manufacturing: Sectors of industrial applications through case studies. Int. Journal of Production Research 49 [4].
21. **Wohlers T.** (2010). Wohlers Report 2010: Additive Manufacturing State of the Industry – Annual Worldwide Progress Report, Wohlers Associates, Inc., ISBN 0-9754429-6-1.
22. **AIMME. (2009).** Puesta en marcha de una línea de investigación para la fabricación de piezas con aleaciones no férricas por adición de material. Financiado por IMPIVA .
23. **AIMME. (2011).** BIOMETAL, Estudio de aleaciones metálicas para el sector sanitario procesadas mediante fabricación aditiva. 2010-12. Financiado por IMPIVA .
24. **ASTM.** (2010). F2792-10 Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428. [24]