

INFORME PROYECTOS— 2025

ESTUDIO DE NUEVAS SOLUCIONES PARA LA INDUSTRIA DE LA
FABRICACIÓN ADITIVA 2025
“FGVA FA0 - DELTA”

Informe: Final de Resultados

Número de proyecto: 22500001

Expediente: IMAMCA/2025/2

Duración: Del 01/01/2025 al 31/12/2025

Coordinado en AIDIMME por: José Ramón Blasco Puchades



GENERALITAT
VALENCIANA

IVACE+i

INSTITUTO VALENCIANO
DE COMPETITIVIDAD
E INNOVACIÓN

AIDIMME
Instituto Tecnológico

ÍNDICE

1.	<u>INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS DEL PROYECTO.....</u>	<u>1</u>
2.	<u>RESULTADOS OBTENIDOS</u>	<u>2</u>
3.	<u>ACTIVIDADES REALIZADAS, DESARROLLO DEL PROYECTO</u>	<u>2</u>
3.1.	<u>TRATAMIENTOS QUÍMICOS DE MEJORA SUPERFICIAL A PIEZAS POLIMÉRICAS.....</u>	<u>2</u>
3.2.	<u>DESARROLLO DE ALGORITMO DE CÁLCULO DE PRODUCTIVIDAD Y COSTES EN TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA (TFA)</u>	<u>9</u>
3.3.	<u>DESARROLLO DE PARÁMETROS DE PROCESO DE NUEVOS MATERIALES PARA PBF- LB/M 18</u>	
6.	<u>RESUMEN Y CONCLUSIONES.....</u>	<u>30</u>
7.	<u>ANEXOS Y BIBLIOGRAFÍA.....</u>	<u>32</u>

1. Introducción, objetivos del proyecto

El proyecto DELTA en 2025 sigue ampliando el conocimiento vinculado al procesado de materiales por Fabricación aditiva. En 2024 el proyecto GAMMA estuvo trabajando en estudiar cómo evoluciona la materia prima al ser reutilizada en tecnologías como MJF y EBM en materiales como la PA12 y el cobre puro. El trabajo de DELTA se centra en el desarrollo de materiales con tecnología de FA metálica basada en laser. El estudio de postprocesos de mejora superficial del material ya procesado en tecnologías de fabricación aditiva en polímero y en la obtención de algoritmos de cálculo que permitan calcular de forma ajustada tiempos de producción y costes.

El proyecto persigue el aumento de la excelencia en la fabricación aditiva avanzada, para mejorar la calidad del producto, reducir las deficiencias tecnológicas, reforzando de forma significativa el desarrollo e implementación de la Fabricación Aditiva en la industria local, mediante la mejora en las aplicaciones, tecnologías, así como en el procesado y reutilización de materiales.

En las prioridades de especialización S3-CV el proyecto DELTA se encuadra en 2.1. TECNOLOGÍAS DIGITALES, TECNOLOGÍAS DISRUPTIVAS Y SISTEMAS DE DATOS CON POTENCIAL EN LA CV, con el fin de mejorar los procesos industriales a través de herramientas avanzadas de digitalización e introducir la funcionalidad digital en nuevos productos y desarrollos.

El proyecto se articula dentro de las sublíneas AM1 Nuevos materiales (aditivación, tratamientos térmicos másicos, tratamientos superficiales) y AM2 Nuevas tecnologías. En aras de aumentar la excelencia en los procesos de fabricación aditiva avanzada, mediante la mejora en las aplicaciones, tecnologías, así como en el procesado de materiales.

Los objetivos perseguidos se enumeran a continuación:

- Estudio de la correlación entre prestaciones mecánicas y tratamientos químicos de mejora superficial aplicados a piezas poliméricas obtenidas por fabricación aditiva. En el estudio se utilizarán diferentes materiales de interés industrial y se medirán la mejora en términos de prestaciones mecánicas y mejora en la rugosidad.
- Estudio de metodologías de cálculo de producción y costes con fabricación aditiva para el desarrollo de un algoritmo de cálculo de productividad automático basado en variables medibles en los ficheros 3D.
- Desarrollo de parámetros de proceso de nuevos materiales en tecnologías PBF-LB/M para aceros y otros.

2. Resultados obtenidos

Se han obtenido los siguientes resultados durante el 2025:

- Desarrollo de tratamientos químicos de mejora superficial de piezas poliméricas fabricadas con tecnologías de fabricación aditiva como PBF-IrL/P (MJF) procesando poliamida 12, MEX-TRB/P (FDM) procesando varios materiales y PBF-LB/P procesando TPU.
- Se han desarrollado diferentes algoritmos de cálculo de productividad y costes TFA teniendo en cuenta diferentes parámetros como es el volumen de las piezas, el volumen de ocupación de las piezas en la bandeja de fabricación.
- Se ha desarrollado un procedimiento para estandarizar el proceso de desarrollo de parámetros basado en tres fases: Estudio de la densificación de cubos y piezas inclinadas, desarrollo de probetas y desarrollo de parámetros para soportes.

3. Actividades realizadas, desarrollo del proyecto

El desarrollo del proyecto se ha centrado en tres grandes tareas que se han ejecutado a lo largo del 2025, las cuales son:

3.1. Tratamientos químicos de mejora superficial a piezas poliméricas

AIDIMME ha adquirido la máquina PostPro SF50 de AMT que es un sistema avanzado diseñado para el suavizado químico por vapor de piezas plásticas impresas en 3D. Esta tecnología patentada permite refinar superficies y cavidades internas, mejorando tanto la estética como las propiedades mecánicas de componentes fabricados mediante diversos métodos aditivos.



Ilustración 1. Máquina PostPro SF50 de AMT

El alisado con vapor sella las superficies exponiendo las piezas a un vapor controlado. Esto elimina picos y poros, refuerza las propiedades mecánicas y proporciona una superficie lisa y acabados impermeables comparables al moldeo por inyección. Este proceso se caracteriza porque reduce la rugosidad de la superficie sin eliminar los detalles ni de la definición de la pieza.

El equipo destaca por su diseño compacto, lo que lo hace ideal para la creación de prototipos y la producción de bajos volúmenes en entornos industriales. Su funcionamiento es sostenible, ya que recicla los solventes utilizados y no genera residuos durante el proceso de acabado. En resumen, es una solución de posprocesamiento automatizado compatible con una amplia gama de polímeros termoplásticos.



Ilustración 2. Interior de la Máquina PostPro SF50 de AMT

En el proyecto DELTA se ha centrado la actividad en la mejora superficial de las piezas obtenidas con las siguiente tecnologías de fabricación aditiva:

- Fusión de lecho de polvo con fuente de energía térmica de luz infrarroja, PBF-Ir/P, conocida como MultiJet Fusion (MJF) con la máquina HP MJF 5600 procesando Poliamida 12.
- Fusión de lecho de polvo por láser, PBF-LB/P, comúnmente conocida como SLS, con la máquina Sinterit lisa X procesando TPU.

Para realizar el acabado de las piezas se sigue el siguiente procedimiento:

1. Preparación y agrupación de las piezas:

- Las piezas que se incluyen en un ciclo deben ser del mismo material y procesadas con la misma tecnología y con un grosor similar ya que las condiciones de procesamiento deben ser las mismas para el conjunto de piezas que se están tratando.
- Las piezas deben estar completamente libres de polvo, especialmente en cavidades internas y esquinas. El polvo residual provocará imperfecciones en el acabado suavizado.
- Las piezas deben estar a una temperatura constante antes del proceso (entre 18 y 22°C) para asegurar una condensación uniforme del vapor solvente.

2. Colocación y carga de las piezas en la cámara:

- El modo en el que se cuelgan las piezas dentro de la máquina influye significativamente en el suavizado de las piezas.
- Existen unas rejillas en la máquina, pero es mejor que las piezas se cuelguen para evitar que se peguen en las rejillas.
- Se recomienda en el diseño de las piezas incluir los ganchos (de sacrificio) para facilitar la carga, descarga y garantizar la uniformidad del tratamiento.
- La distancia entre las piezas debe ser de 10 mm entre sí y una distancia a las paredes de la cámara de 25 mm.

- En caso que las piezas tengan cavidades o agujeros, deben colgarse con la abertura hacia abajo con un pequeño ángulo de 10 a 20 grados para que el vapor fluya y el solvente drene correctamente.
3. Configuración del proceso
- Se definen los parámetros del proceso en función del tipo de piezas que se incluyen. Los parámetros a incluir son:
 - Grosor de pared promedio de las piezas.
 - Intensidad. Parámetro con el que se ajusta el nivel de suavizado. El valor "0" es el estándar. Si aumenta la intensidad se obtiene un suavizado mayor y si se reduce la intensidad, el suavizado es menor.
 - Selección del % de llenado de la cámara (25%, 50%, 75%, 100% o sobredimensionado).
4. Configuración del proceso, la máquina realiza una inicialización y pide las piezas, en ese momento se introducen los racks con las piezas en la cámara y se inicia el proceso. El ciclo de tratamiento dura aproximadamente 2 horas.

Experimentales realizados con Poliamida 12

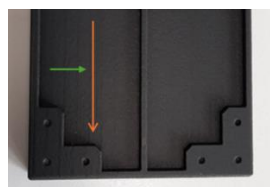
Las condiciones evaluadas han sido las siguientes:

Tabla 1. Definición del experimental con poliamida 12

	Material	Tecnología	Máquina	Post tratamiento	Suavizado químico-Intensidad
1	PA12	PBF-Irl/P	HP MJF 5600	As built (tal y como sale de máquina)	-
2	PA12	PBF-Irl/P	HP MJF 5600	Granallado	-
3	PA12	PBF-Irl/P	HP MJF 5600	Granallado y suavizado químico	0
4	PA12	PBF-Irl/P	HP MJF 5600	Granallado y suavizado químico	1
5	PA12	PBF-Irl/P	HP MJF 5600	Granallado y suavizado químico	2

Además de la evaluación visual de las muestras, se ha determinado la rugosidad superficial de las muestras procesadas en poliamida 12 con diferentes condiciones en los tratamientos. El rugosímetro utilizado es de la marca Mitutoyo, modelo SJ301, realizando 6 mediciones en la cara plana de las piezas. De las 6 mediciones realizadas, 3 se realizaron paralelas a las capas de fabricación y 3 perpendiculares a las capas de fabricación.

Mediante el rugosímetro se obtiene el la Rugosidad Media (Ra) en micras que representa el promedio aritmético de las desviaciones de la superficie con respecto a una línea media dentro de una longitud de muestreo determinada (en este caso de 2.5 mm por la configuración del rugosímetro) y el valor Rugosidad Máxima (Rz) que corresponde a la media entre la distancia pico-valles más extremas.

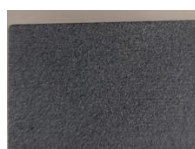


- Perpendicular a las capas de fabricación
→ Paralelo a las capas de fabricación

Ilustración 3. Piezas utilizadas para las pruebas experimentales con el proceso de suavizado químico y como se realizaron las medidas



Ilustración 4. Rugosímetro utilizado Mitutoyo modelo SJ301



As built



Granallado



Granallado + tratamiento químico
Intensidad: 0



Granallado + tratamiento químico
Intensidad: 1



Granallado + tratamiento químico
Intensidad: 2

Ilustración 5. Muestras del experimental

Tabla 2. Resultados de la medida de la Rugosidad Media (Ra) y Rugosidad Máxima (Rz) de las muestras con diferentes condiciones de acabado

		Condición final de las piezas				
		As built	Granallado	Granallado + suavizado químico Intensidad 0	Granallado + Suavizado químico Intensidad 1	Granallado + Suavizado químico Intensidad 2
Medición Perpendicular a las capas	Ra1 (μm)	9,66	7,03	5,38	3,49	4,24
	Rz1 (μm)	56,23	41,23	26,90	19,42	21,16
	Ra2 (μm)	9,34	7,05	5,75	4,06	3,56
	Rz2 (μm)	55,66	42,73	29,24	21,45	17,24
	Ra3 (μm)	9,56	7,07	4,81	4,91	4,19
	Rz3 (μm)	61,50	42,31	26,53	26,54	22,76
	Ra promedio (μm)	9,52	7,05	5,31	4,15	4,00
	Rz promedio (μm)	57,80	42,09	27,56	22,47	20,39
Medición paralela a las capas	Ra4 (μm)	8,19	6,90	3,98	4,28	2,64
	Rz4 (μm)	47,18	41,77	24,52	23,85	14,82
	Ra5 (μm)	9,56	6,46	4,15	3,85	3,05
	Rz5 (μm)	53,93	39,11	25,67	20,94	17,77

	Ra6 (μm)	9,57	7,09	4,27	3,58	3,62
	Rz6 (μm)	53,50	43,48	22,39	20,33	20,72
	Ra promedio (μm)	9,11	6,82	4,13	3,90	3,10
	Rz promedio (μm)	51,54	41,45	24,19	21,71	17,77
TOTAL	Ra (μm)	9,31	6,93	4,72	4,03	3,55
	Rz (μm)	54,67	41,77	25,88	22,09	19,08

Tal y como se extrae de la medición de las rugosidades (Tabla 2), el proceso de suavizado químico es muy efectivo reduciendo la rugosidad superficial de las piezas de poliamida 12 con respecto al estado as built (pieza tal y como se obtiene de máquina) en más de un 50% utilizando intensidades de 1 y 2 en el post proceso.

Partiendo de una rugosidad inicial de en torno Ra de 9 micras, solamente con el granallado se reduce esta rugosidad alcanzando valores de Ra aproximadamente 7 micras, llegando a valores de Ra de entre 3,5-4 micras tras el suavizado químico.

El análisis de los datos permite concluir que la orientación de las capas de poliamida es un factor determinante en la calidad superficial final de la pieza:

Rugosidad Inicial (Efecto Escalera): En el estado "As built", se observa que la rugosidad es ligeramente superior en la medición perpendicular a las capas en comparación con la medición paralela, esto se debe a la superposición de las capas durante el proceso de construcción, llamado efecto escalera en las superficies transversales.

Si bien los procesos de post-procesado mejoran ambas orientaciones, el acabado evoluciona de forma más notable en la dirección paralela a las capas. Tras aplicar el tratamiento de mayor intensidad, se alcanzan niveles de rugosidad significativamente más bajos en paralelo que en perpendicular lo que sugiere que las crestas generadas por las capas ofrecen una mayor resistencia a los postprocesos.

Cabe destacar que cuando se aplica el suavizado químico con la Intensidad 1 y la Intensidad 2 en la medición perpendicular, el Ra apenas varía significativamente (4,15 vs 4 micras) lo que sugiere que el proceso está llegando a un "techo" de mejora técnica para esa cara de la pieza.

Además de la medida de la rugosidad superficial, es necesario realizar una evaluación visual de las muestras, donde se observa que a mayor intensidad en el suavizado químico más se resaltan pequeños defectos de las piezas e incluso se visualizan las capas y se modifica levemente la geometría marcándose mayores redondeos y deformando pequeños detalles como agujeros.

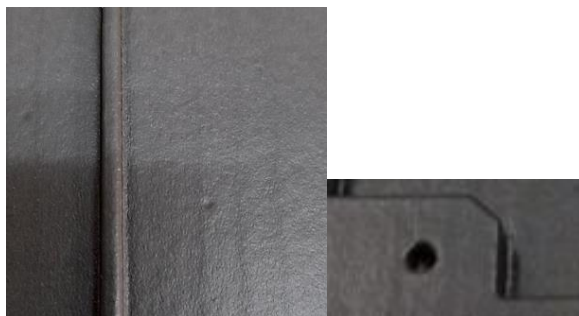


Ilustración 6. Errores detectados con suavizado químico de intensidad 2

Tabla 3. Resumen de los resultados del experimental realizado

Material	Tecnología	Máquina	Post tratamiento	Espesor	Intensidad	Rugosidad promedio Ra (μm)	Modificación de la geometría/ resaltar errores
PA12	PBF-Irl/P	HP MJF 5600	As built	-	-	9,13	-
PA12	PBF-Irl/P	HP MJF 5600	Limpieza, granallado	2	-	6,93	-
PA12	PBF-Irl/P	HP MJF 5600	Limpieza, granallado y suavizado químico	2	0	4,72	No
PA12	PBF-Irl/P	HP MJF 5600	Limpieza, granallado y suavizado químico	2	1	4,03	No
PA12	PBF-Irl/P	HP MJF 5600	Limpieza, granallado y suavizado químico	2	2	3,55	Si

Con los experimentales realizados se ha seleccionado los postprocesos de granallado y el suavizado químico con la “Intensidad 1” para la mejora de la calidad superficial de las piezas de poliamida 12 procesadas con la tecnología PBF-Irl/P con la máquina HP MJF 5600.

Experimentales realizados con TPU

Se ha realizado pruebas con TPU que es un material elastomérico procesado con la tecnología PBF-LB/P con la máquina Sinterit Lisa X. El TPU tiene un comportamiento elastomérico para espesores bajos, si las piezas tienen un espesor alto se rigidiza un poco las piezas.

Se hicieron pruebas iniciales de suavizado químico con Intensidad 0 pero no fueron satisfactorios ya que era demasiado agresivo, perdiendo parte de la geometría y modificando parte de la misma.

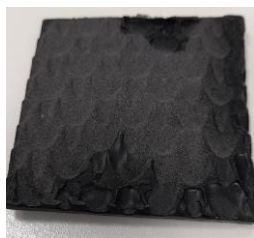
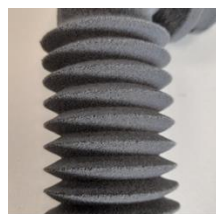


Ilustración 7. Pieza de TPU tras suavizado químico.

Las pruebas se hicieron con una pieza tipo fuelle con espesores entre 0 y 2 mm. Las intensidades analizadas fueron menores de 0 para evitar defectos en las piezas. Los resultados no han sido satisfactorios ya que se ha deformado y rigidizado las piezas tratadas.



As built



Intensidad: -2
Deformación pieza



Intensidad: -3
Rigidez pieza

Ilustración 8. Resultado de los experimentales realizados al TPU procesado con la máquina Sinterit lisa X (PBF-LB/P)

3.2. Desarrollo de algoritmo de cálculo de productividad y costes en Tecnologías de Fabricación Aditiva (TFA)

En esta actividad se ha realizado un estudio de metodologías de cálculo de producción y costes con fabricación aditiva para el desarrollo de un algoritmo de cálculo de productividad automático basado en variables medibles en los ficheros 3D. El estudio se ha centrado en la tecnología de fabricación **PBF-IrL/P** (Multi Jet Fusion) dado que es la tecnología con mayor actividad y la más compleja desde el punto de vista del cálculo de costes.

La tecnología HP MJF permite producir piezas de uso final de forma rápida dado que no requiere el uso de estructuras de soporte y permite apilar o anidar piezas. Tiene un volumen de producción de 380x280x380 mm.

Los algoritmos de cálculo de costes de las tecnologías de fabricación aditiva son críticos ya que dependen de numerosos inputs relacionados con la geometría de la pieza, el coste de los materiales y su posibilidad de reutilización y la cantidad demandada. Hasta la fecha y a pesar de haber trabajado en ello durante años, el cálculo, y especialmente en la tecnología PBF-IrL/P, dependía en gran medida de inputs y estimaciones hechas por el técnico que realiza la cotización.

A diferencia de otras tecnologías, en la tecnología PBF-IrL/P, los costes no dependen únicamente del volumen de material impreso (volumen de pieza), sino también de factores como la densidad de empaquetado, la geometría de las piezas, la relación superficie/volumen, el consumo de agentes (fusion y detailing), la reutilización del polvo y la eficiencia en el llenado del volumen de fabricación. Además, algunos consumibles, como el agente de detalle, están más relacionados con la superficie de las piezas que con su volumen, lo que dificulta la aplicación de modelos de coste simples basados únicamente en centímetros cúbicos.

A todo esto, se suman los costes indirectos, como el tiempo de máquina, la amortización, la energía consumida, el mantenimiento anual y la gestión del espacio de impresión, que dependen del aprovechamiento del volumen de trabajo y de la capacidad de anidado de las piezas.

Por todo lo anterior, el cálculo de costes en la tecnología PBF-IrL/P requiere modelos avanzados que integren múltiples parámetros. En el proyecto se ha abordado el desarrollo de un algoritmo de cálculo automático que además se ha traducido a una serie de fórmulas que permiten realizar el cálculo en una plataforma automatizada (Fabrex), donde a partir de un fichero 3D (en formato STL o STEP), se leen datos clave como el volumen, superficie y dimensiones máximas X-Y-Z, que se vuelcan a las fórmulas para realizar el estudio de costes.

Tras varias iteraciones, se han definido como variables de entrada en la lectura de la pieza tridimensional:

- Dimensión máxima en X de la pieza (mm)
- Dimensión máxima en Y de la pieza (mm)
- Dimensión máxima en Z de la pieza (mm)
- Volumen de la pieza (mm³)
- Superficie de la pieza (mm²)

Dichas variables se leen directamente del fichero en la plataforma Fabrex tal como se muestra en la Ilustración 9.

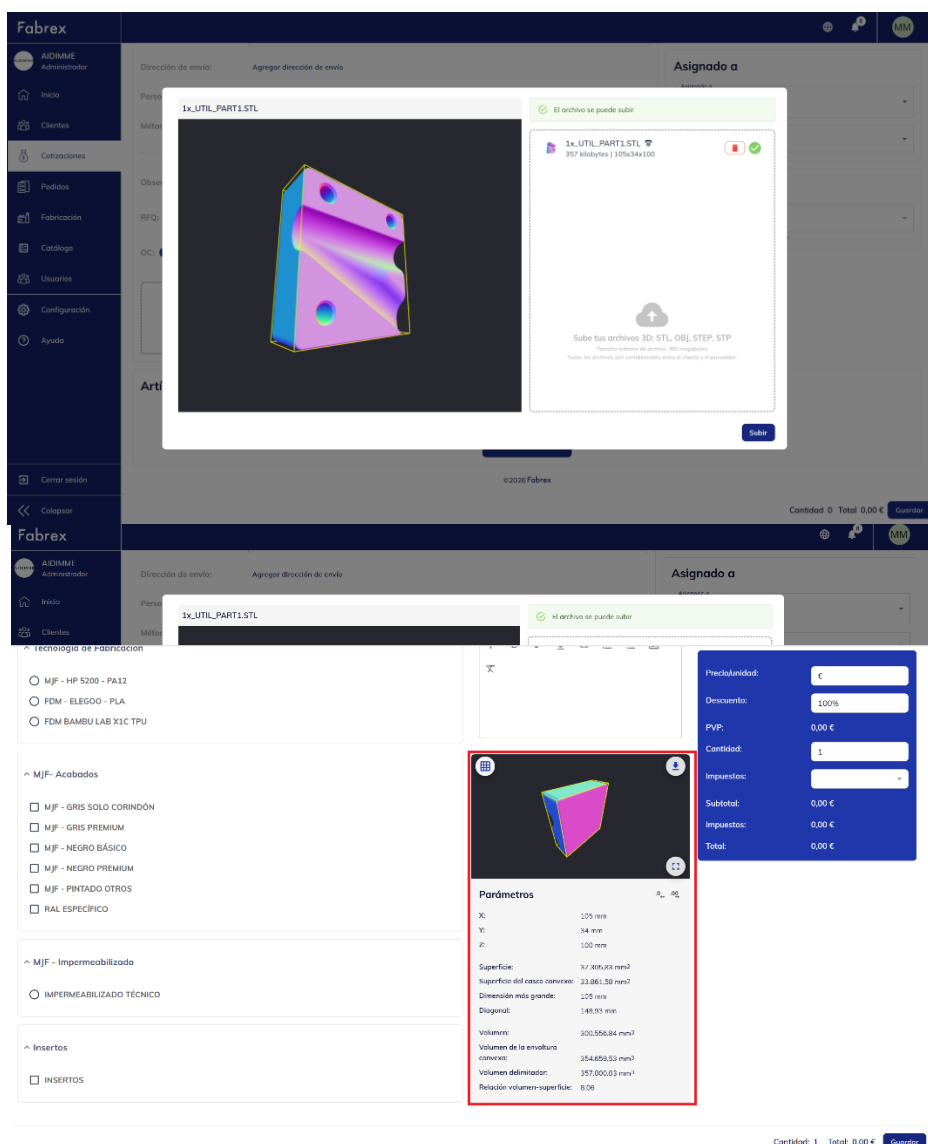


Ilustración 9. Lectura de los inputs de un fichero tridimensional en plataforma Fabrex.

Se han definido cuatro factores que determinan el coste total de la pieza:

- **FACTOR 1:** Coste asociado al volumen de la pieza
- **FACTOR 2:** Coste asociado a la ocupación de la pieza en el volumen de producción.
- **FACTOR 3:** Coste asociado a la complejidad que presente la pieza
- **FACTOR 4:** Precio fijo mínimo establecido para cada pieza.

La suma de estos cuatro factores determina el coste total en cada caso, sin embargo, el coste de producción de estas tecnologías requiere tener en cuenta la cantidad de piezas solicitadas, dado que a mayor cantidad veremos una reducción considerable del coste unitario de cada pieza, siendo el precio óptimo la situación donde llenamos todo el volumen de producción (bien por tope en volumen o por tope en ocupación) con la misma pieza.

En este punto, debemos tener en cuenta la limitación técnica de la propia tecnología; en este caso sabemos que de aproximadamente 40 Litros que sería el volumen completo de producción, podemos llenar de piezas un máximo de un 10%, es decir, 4 Litros. Por tanto, observamos que para calcular el precio óptimo de una pieza nos encontramos en dos casos:

- **Caso 1:** Donde la pieza tiende a ser pequeña y altamente anidable (piezas que se orientan para reducir el espacio), en estos casos observamos que el limitante no es tanto el espacio (número de piezas que caben en 380x280x380, sino el volumen máximo ocupable (4 Litros). En resumen, en estos casos alcanzaremos los 4 Litros antes de haber llenado el espacio total del volumen de producción. Tal como se representa en la Ilustración 10, en una pieza pequeña es vital reducir el volumen total de la pieza, dado que nos permitirá producir muchas más unidades por lote, por ello se reducirán los costes de producción.

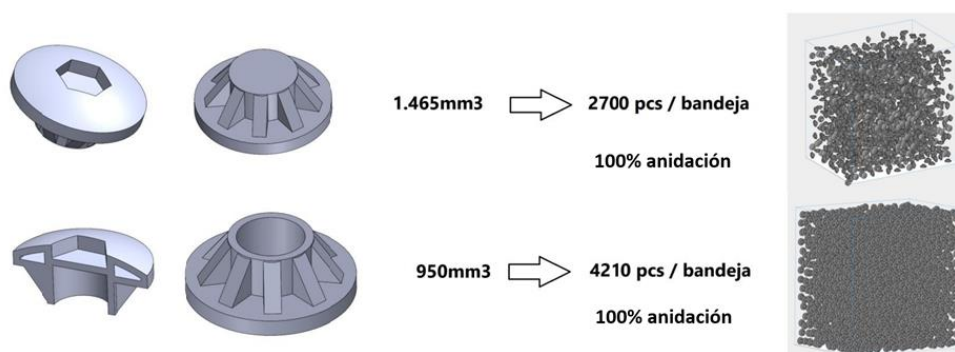


Ilustración 10. Estudio de productividad reduciendo el volumen total de una pieza altamente anidable

- **Caso 2:** donde las piezas tienden a ser de mayor tamaño y menos “anidables”; en esta situación, al contrario que en el caso anterior, vamos a poder anidar pocas piezas y por tanto nuestro limitante va a ser la ocupación, y no el volumen total de la pieza.

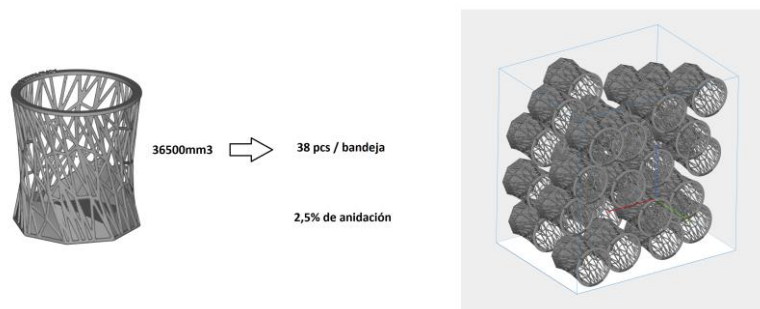


Ilustración 11. Estudio de productividad en una pieza con bajo nivel de anidación

En resumen, el algoritmo de cálculo debe distinguir entre dos casos: que el limitante sea el volumen (caso 1) o que el limitante sea la ocupación (caso 2).

Por otro lado, una vez distinguido el caso que aplica cada pieza, el algoritmo debe detener la reducción de coste por pieza en el momento en el que se alcance la cantidad óptima “bandeja completa” (bien por volumen (caso 1) o por ocupación (caso 2)). Por ello para cada caso determinamos otra disyuntiva:

- **Pedidos por debajo de la cantidad óptima:** donde el precio irá reduciéndose a medida que el cliente solicita más unidades hasta llegar a la cantidad óptima (bandeja completa).
- **Pedidos iguales o superiores a cantidad óptima:** en este punto, el coste unitario por pieza pasa a ser constante independientemente de la cantidad que solicite, dado que se ha obtenido el precio óptimo por pieza (se ha superado la bandeja completa).

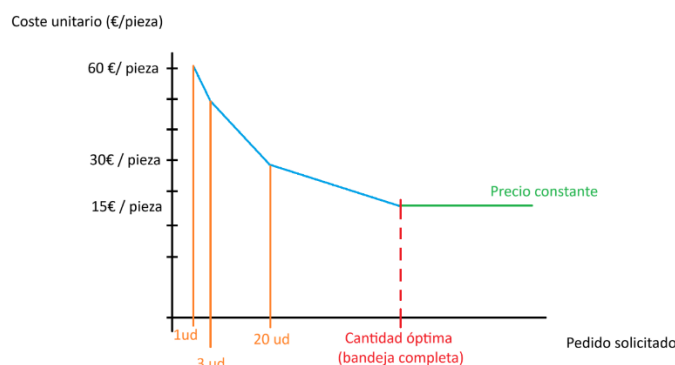


Ilustración 12. Estudio de coste unitario en función de pedido solicitado

Desarrollo del algoritmo de cálculo:

Una vez definidos los limitantes descritos anteriormente, se determina un precio aproximado por bandeja de 1.600€, este valor se ha calculado teniendo en cuenta la amortización de máquina, el consumo de material por bandeja (máximo 4L), consumo de agentes (fusion y detailing agents), recursos humanos, mantenimientos y fungibles. En este punto, se desarrolla el peso de cada uno de los factores indicados arriba, teniendo en cuenta los casos mencionados.

Para cada factor se ha establecido un peso específico acorde a como se indica a continuación:

- **FACTOR 1: (VOLUMEN)** – Peso: 0,4
- **FACTOR 2: (OCUPACIÓN)** – Peso: 0,5
- **FACTOR 3: (COMPLEJIDAD)** – Peso: 0,1
- **FACTOR 4: (COSTE FIJO)** – No tiene peso específico, simplemente se suma al coste total calculado de los factores 1, 2 y 3.

Desarrollo de los algoritmos de cálculo:

- **Factor 1 (Volumen):** se obtiene al dividir el volumen total de la pieza (en mm³) por el volumen total aprovechable en cada lote de producción (4L (4.000.000 mm³)) multiplicando el resultante por 1600€ (precio por bandeja) por el peso específico del factor 1 (0,4) y por un valor de ajuste producto de las pruebas del algoritmo en casos reales (1,45).

$$\text{€(Volumen): } \frac{\text{Volumen de pieza (mm}^3\text{)}}{4.000.000} \cdot 1600 \cdot 0,4 \cdot 1,45$$

- **Factor 2 (Ocupación):** se multiplican las dimensiones X Y Z del bounding box (prisma rectangular en el que cabe el o los modelos) máximo de la pieza dando un margen de 3mm en cada dirección, que corresponde a la separación entre piezas necesario en estos procesos, a este resultado se divide por el volumen total de la cuba (40L (40.000.000 mm³)) y se multiplica por 1600 € (precio por bandeja) por el peso específico de la ocupación (0,5) y por un valor de ajuste producto de las pruebas del algoritmo en casos reales (1,75).

$$\text{€ (Ocupación): } \frac{(\text{Dim X} + 3) \cdot (\text{Dim Y} + 3) \cdot (\text{Dim Z} + 3)}{40.000.000} \cdot 1600 \cdot 0,5 \cdot 1,75$$

- **Factor 3 (Complejidad):** Resultado de dividir la superficie total de la pieza (en mm²) por las dimensiones máximas en X Y Z con margen de 4mm y multiplicando este resultado por 1600€ (bandeja completa), por el peso específico de la

complejidad (0,1) y por un valor corrector producto de las pruebas del algoritmo en casos reales (0,145).

$$\text{€ (Complejidad)}: \frac{\text{Superficie (mm}^2\text{)}}{(\text{Dim X} + 4) \cdot (\text{Dim Y} + 4) \cdot (\text{Dim Z} + 4)} \cdot 1600 \cdot 0,1 \cdot 0,145$$

- **Factor 4 (precio fijo):** En este caso, las variables de entrada no afectan, y se ha establecido un valor mínimo de 0,025€ por pieza, independientemente del caso (1 o 2) en el que entre cada geometría.

Tal como se adelantaba anteriormente, el algoritmo de cálculo debe distinguir:

- Si la pieza a cotizar tiene la limitación por volumen o por ocupación,
- Si la cantidad pedida por el cliente supera el umbral de cantidad óptima o no.

Para ello se han desarrollado las siguientes formas condicionales, de tal forma que en el software de cotización (Fabrex), cuando una pieza cumpla una condición entrará en una ruta de cálculo o en otra:

- **Condición de entrada limitación Volumen-Ocupación:** condiciona la fórmula de entrada a través de dos normas lógicas:

- o Si el limitante de la pieza lo pone el volumen y no la ocupación, es decir, por ocupación caben más piezas, pero limita el volumen de las mismas.

$$\frac{4000000}{\text{Volumen}} > \frac{40000000}{(\text{Dim X} + 4) \cdot (\text{Dim Y} + 4) \cdot (\text{Dim Z} + 4)}$$

- o Si el limitante de la pieza lo pone la ocupación y no el volumen, es decir, a pesar de que por volumen quepan más piezas, no se pueden meter porque no caben más.

$$\frac{4000000}{\text{Volumen}} \leq \frac{40000000}{(\text{Dim X} + 4) \cdot (\text{Dim Y} + 4) \cdot (\text{Dim Z} + 4)}$$

- **Condición de entrada a la cantidad del pedido:** condiciona la fórmula de entrada según el cliente pida igual o más piezas a la cantidad óptima (se detiene el descuento unitario) o menos (se aplica descuento unitario según cantidad hasta llegar a cantidad óptima).

En este sentido, se ha planteado lo que llamamos factor de descuento, siendo el factor de descuento máximo 0,5 (50%) cuando se solicite una cantidad de piezas mayor o igual a la cantidad óptima. Por tanto, el factor de descuento viene dado por la fórmula siguiente:

$$Descuento = \frac{0,5}{\frac{40000000}{(Dim X + 4) \cdot (Dim Y + 4) \cdot (Dim Z + 4)}}$$

El factor descuento ahora nos permite diferenciar dos situaciones distintas;

- Si el cliente pide menos cantidad de la cantidad óptima, entrará a funcionar la variable descuento, unida a la cantidad (formula indicada en la parte superior). Para ello debe cumplirse el siguiente condicional:

$$\frac{0,5}{\frac{40000000}{(Dim X + 4) \cdot (Dim Y + 4) \cdot (Dim Z + 4)}} \cdot cantidad < 0,5$$

- Si el cliente pide la cantidad óptima o más, es decir, si la fórmula descuento indicada arriba supera el descuento máximo (50% (0,5)), entonces el algoritmo tendrá en cuenta un descuento de 0,5, en este caso la fórmula de descuento NO entra a formar parte del cálculo, para que se de esta situación, el cálculo debe cumplir la siguiente condicional:

$$\frac{0,5}{\frac{40000000}{(Dim X + 4) \cdot (Dim Y + 4) \cdot (Dim Z + 4)}} \cdot cantidad \geq 0,5$$

Por tanto, con toda esta información, se ha diseñado el algoritmo de cálculo basado en 4 métricas (fórmulas) con outputs diferentes, y con dos reglas condicionales (cláusulas) cada una. De esta forma, en función de las cláusulas que cumpla cada pieza (basado en volumen, ocupación y pedido), se redirige el cálculo a una de las cuatro métricas indicadas a continuación:

METRICA 1. SI ENTRAN POR VOLUMEN MÁS QUE POR OCUPACION Y PEDIDO INFERIOR A TOPE DE BANDEJA

$$\left(\left(\left(\frac{40000000}{\text{volume}} \right) > \left(\frac{40000000}{(\text{dimensionsX}+4) \cdot (\text{dimensionsY}+4) \cdot (\text{dimensionsZ}+4)} \right) \right) \right) \left(\left(\frac{0,5}{\frac{40000000}{(\text{dimensionsX}+4) \cdot (\text{dimensionsY}+4) \cdot (\text{dimensionsZ}+4)}} \cdot \text{quantity} \right) < 0,5 \right)$$

Cláusulas:

$$\text{Si } \frac{40000000}{\text{volume}} > \left(\frac{40000000}{(\text{dimensionsX}+4) \cdot (\text{dimensionsY}+4) \cdot (\text{dimensionsZ}+4)} \right) \quad \text{Y} \quad \left(\frac{0,5}{\frac{40000000}{(\text{dimensionsX}+4) \cdot (\text{dimensionsY}+4) \cdot (\text{dimensionsZ}+4)}} \cdot \text{quantity} \right) < 0,5$$

METRICA 6.- SI ENTRAN POR VOLUMEN MÁS QUE POR OCUPACION Y PEDIDO IGUAL O SUPERIOR A TOPE BANDEJA

$$\left(\left(\left(\frac{40000000}{\text{volume}} \right) > \left(\frac{40000000}{(\text{dimensionsX}+4) \cdot (\text{dimensionsY}+4) \cdot (\text{dimensionsZ}+4)} \right) \right) \right) \left(\left(\frac{0,5}{\frac{40000000}{(\text{dimensionsX}+4) \cdot (\text{dimensionsY}+4) \cdot (\text{dimensionsZ}+4)}} \cdot \text{quantity} \right) \geq 0,5 \right)$$

METRICA 7.- SI ENTRAN POR VOLUMEN MENOS QUE POR OCUPACION Y PEDIDO INFERIOR A TOPE DE BANDEJA

$$\left(\left(\left(\frac{\text{volume}}{4000000} \cdot 1600 \cdot 0.4 \cdot 1.45 \right) + \left(\frac{(\text{dimensionsX}+3) \cdot (\text{dimensionsY}+3) \cdot (\text{dimensionsZ}+3)}{4000000} \cdot (1600 \cdot 0.5 \cdot 1.75) \right) + \left(\frac{1600 \cdot 0.1 \cdot \text{volume}}{4000000} \right) + 0.03 \right) \cdot \left(\frac{4000000}{\text{volume}} \right) \right) - \left(\left(\frac{0.5}{4000000} \cdot \text{quantity} \right) \cdot \left(\left(\frac{\text{volume}}{4000000} \cdot 1600 \cdot 0.4 \cdot 1.45 \right) + \left(\frac{(\text{dimensionsX}+3) \cdot (\text{dimensionsY}+3) \cdot (\text{dimensionsZ}+3)}{4000000} \cdot (1600 \cdot 0.5 \cdot 1.75) \right) + \left(\frac{1600 \cdot 0.1 \cdot \text{volume}}{4000000} \right) + 0.03 \right) \cdot \left(\frac{4000000}{\text{volume}} \right) \right)$$

Cláusulas:

$$\text{Si } \frac{4000000}{\text{volume}} \leq \left(\frac{4000000}{(\text{dimensionsX}+4) \cdot (\text{dimensionsY}+4) \cdot (\text{dimensionsZ}+4)} \right) \text{ Y } \left(\frac{0.5}{4000000} \cdot \text{quantity} \right) < 0,5$$

METRICA 8.- SI ENTRAN POR VOLUMEN MENOS QUE POR OCUPACION Y PEDIDO IGUAL O SUPERIOR A TOPE BANDEJA

$$\left(\left(\left(\frac{\text{volume}}{4000000} \cdot 1600 \cdot 0.4 \cdot 1.45 \right) + \left(\frac{(\text{dimensionsX}+3) \cdot (\text{dimensionsY}+3) \cdot (\text{dimensionsZ}+3)}{4000000} \cdot (1600 \cdot 0.5 \cdot 1.75) \right) + \left(\frac{1600 \cdot 0.1 \cdot \text{volume}}{4000000} \right) + 0.03 \right) \cdot \left(\frac{4000000}{\text{volume}} \right) \right) - \left(\left(\frac{0.5}{4000000} \cdot \text{quantity} \right) \cdot \left(\left(\frac{\text{volume}}{4000000} \cdot 1600 \cdot 0.4 \cdot 1.45 \right) + \left(\frac{(\text{dimensionsX}+3) \cdot (\text{dimensionsY}+3) \cdot (\text{dimensionsZ}+3)}{4000000} \cdot (1600 \cdot 0.5 \cdot 1.75) \right) + \left(\frac{1600 \cdot 0.1 \cdot \text{volume}}{4000000} \right) + 0.03 \right) \cdot \left(\frac{4000000}{\text{volume}} \right) \right)$$

Cláusulas:

$$\text{Si } \frac{4000000}{\text{volume}} \leq \left(\frac{4000000}{(\text{dimensionsX}+4) \cdot (\text{dimensionsY}+4) \cdot (\text{dimensionsZ}+4)} \right) \text{ Y } \left(\frac{0.5}{4000000} \cdot \text{quantity} \right) \geq 0,5$$

Todas las métricas indicadas, se han volcado a la plataforma de cálculo de Fabrex, tal como se muestra en la Ilustración 13.

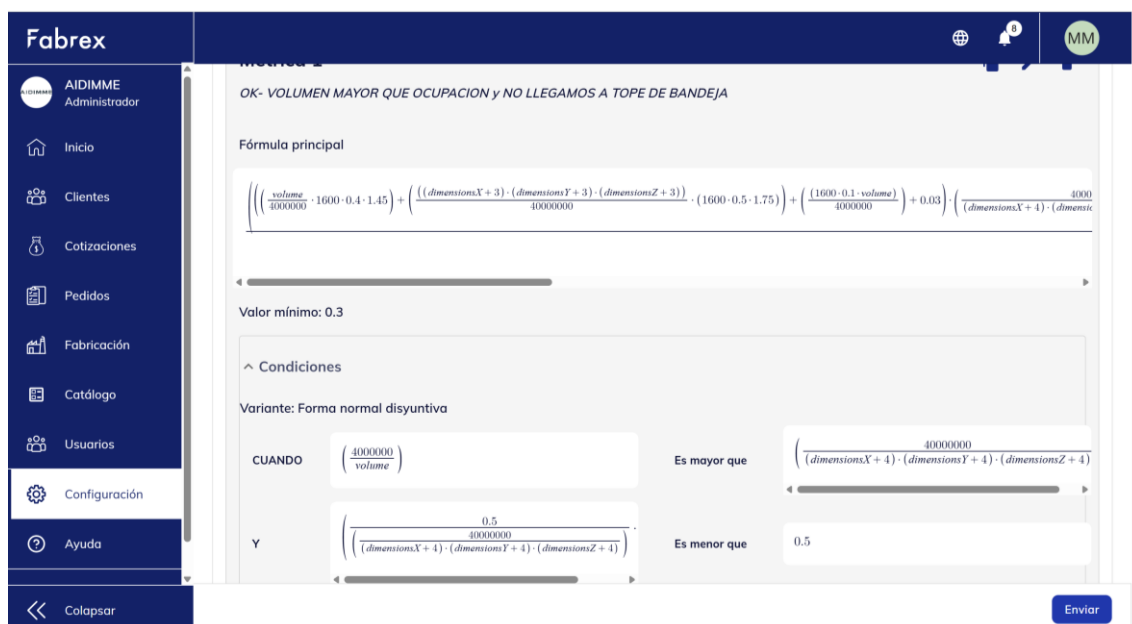


Ilustración 13. Algoritmos de cálculo volcados a la plataforma Fabrex

Por otro lado, se ha configurado la plataforma, y se han realizado pruebas piloto sobre piezas reales. Tal como se muestra en la Ilustración 14, la pestaña de cálculo muestra datos de la pieza, incluso una ventana dinámica donde se muestra el fichero en tres dimensiones. en el panel de la derecha, se puede seleccionar la cantidad de piezas

deseadas, y en tiempo real, el algoritmo analiza los inputs de la pieza (volumen, superficie, y dimensiones máximas (Dim X, Dim Y, Dim Z) y vuelca un valor para la cotización.

Oficina Técnica

☐ OFICINA TECNICA

Tecnología de Fabricación

☒ MJF - HP 5200 - PA12 Precio rec.: 5,02 €

La tecnología MJF (Multi Jet Fusion) fabrica piezas a partir de polvo de poliamida PA12, que se fusiona capa a capa mediante la aplicación de agentes aglutinantes y energía térmica controlada. Es ideal para prototipos funcionales y series cortas o medias de producción, ofreciendo alta precisión dimensional y excelente acabado superficial. El acabado básico es de color gris oscuro. Nuestro equipo cuenta con una cuba de 380x280x380 mm y alcanza tolerancias estándar de $\pm 0,2$ mm en piezas pequeñas y $\pm 0,2$ % en piezas grandes.

Detalles

Nombre: 25 x Bandeja Infinite Ni

Observaciones:

Pricing Summary:

Precio rec.:	5,02 €
Precio/unidad:	5,02€
Descuento:	0%
PVP:	5,02 €
Cantidad:	25
Impuestos:	IVA Bienes - 21%
Subtotal:	125,50 €
Impuestos:	26,36 €
Total:	151,86 €

Tecnología de Fabricación

MJF - HP 5200 - PA12
Precio rec.: 5,02 €

Cantidad: 25 Total: 151,86 € **Guardar**

Ilustración 14. Prueba de cotización en plataforma Fabrex

Por otro lado, si se vuelca más de una pieza, en el siguiente panel se muestra un resumen de las referencias y cantidades que pueden actualizarse de igual forma en tiempo real, visualizando el coste:

Fabrex

AIDIMME Administrador

Inicio Clientes Cotizaciones Pedidos Fabricación Catálogo Usuarios Configuración Ayuda Cerrar sesión Colapsar

Artículos

Nombre del artículo	Precio rec.	Precio/unidad	Descuento	PVP	Cantidad	Subtotal	Impuestos	Total
3 x Conector Macho Nano.STL 4.24x5.56x1.35	3,46 €	3,46€	0%	3,46 €	3	10,38 €	IVA Bienes - 21%	12,56 €
3 x Conector Hembra Nano.STL 3.27x1.35x4.76	2,65 €	2,65€	0%	2,65 €	3	7,95 €	IVA Bienes - 21%	9,62 €
4 x Antillón Infinite Nano.STL 1.4x1.3x3.4	0,83 €	0,83€	0%	0,83 €	4	3,32 €	IVA Bienes - 21%	4,02 €
10 x Cabecera Infinite Nano.STL 6.33x1.85x0.9	1,43 €	1,43€	0%	1,43 €	10	14,30 €	IVA Bienes - 21%	17,30 €
12 x Sistema Giro Infinite Nano.STL 1.35x2.7x2.46	0,77 €	0,77€	0%	0,77 €	12	9,24 €	IVA Bienes - 21%	11,18 €
25 x Bandeja Infinite Nano.STL 0.86x1.36x2.8	5,02 €	5,02€	0%	5,02 €	25	125,50 €	IVA Bienes - 21%	151,86 €
2 x Tira Unión Nano.STL 0.6x1.38x8	1,55 €	1,55€	0%	1,55 €	2	3,10 €	IVA Bienes - 21%	3,75 €
Subtotal					59	173,79 €		210,29 €
Envío						15,00€	IVA Bienes - 21%	18,15 €
Subtotal								228,44 €

Cantidad 59 Total 228,44 € **Guardar**

Ilustración 15 ejemplo de cotización de numerosas piezas en la plataforma Fabrex

3.3. Desarrollo de parámetros de proceso de nuevos materiales para PBF-LB/M

Esta tarea se ha centrado en desarrollar un procedimiento para estandarizar el proceso de desarrollo de parámetros para el procesado de un nuevo material con la tecnología PBF-LB/M.

Actualmente existen máquinas de fabricación aditiva o impresión 3D con parámetros cerrados de proceso, esto significa que los parámetros de proceso son específicos para el procesado de un determinado material en esa máquina. El hecho de que estos parámetros de proceso sean cerrados tiene como ventaja que a priori la fabricación de las piezas con esas condiciones es correcta y el usuario no debería tener problemas en la obtención de piezas de calidad. Pero como inconveniente no es posible modificar nada en la máquina y se impide la posibilidad de mejorar los procesos de fabricación por ejemplo para aumentar la productividad de una determinada máquina aumentando la velocidad de avance del haz que provoca la fusión o aumentar el espesor de capa.

En AIDIMME, la gran mayoría de las máquinas de fabricación aditiva disponibles disponen de parámetros de proceso abiertos lo que permite modificarlos para mejorar la productividad, mejorar la calidad de las piezas y lo más importante permite procesar nuevos materiales en dichas máquinas.

El proceso actual realizado por AIDIMME, por empresas proveedoras de tecnología aditiva y por el resto de las entidades de I+D que realizan este tipo de actividades avanzadas para la configuración de parámetros de fabricación es un procedimiento totalmente empírico.

El objetivo de este procedimiento empírico es obtener un gráfico tal y como se muestra en la siguiente Ilustración 16 donde es un mapa de procesos donde se relaciona la Potencia del Láser (eje Y) con la Velocidad de Escaneo (eje X) para determinar la calidad de la pieza final.

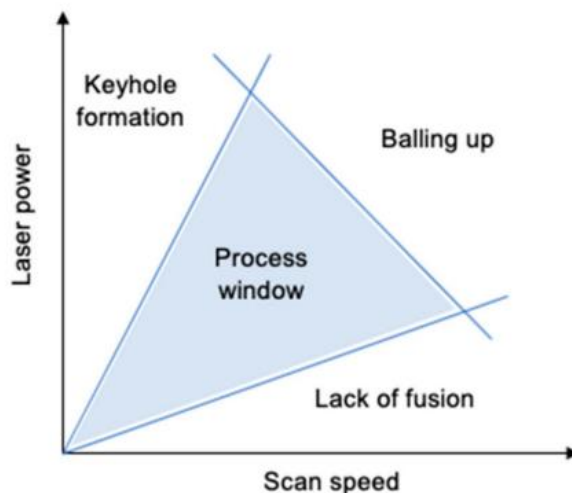


Ilustración 16. Gráfico de desarrollo de parámetros. Curva potencia del láser versus velocidad y su influencia en la obtención de defectos (Calignano, 2019)

Este gráfico depende de la máquina, el material y el espesor de capa con el que se están procesando las piezas.

El objetivo es encontrar un conjunto de parámetros de proceso en la zona central que es la **ventana de proceso** para una determinada máquina y un determinado material. En esta zona (área azul del gráfico anterior) hay un equilibrio entre la energía entregada y la velocidad donde el material se funde de forma estable, creando piezas densas y por lo tanto con buenas propiedades mecánicas.

Si la potencia es muy alta y la velocidad es baja, estamos en la **zona KEYHOLE** donde el láser vaporiza el metal y al enfriarse rápido quedan burbujas de gas atrapadas en el fondo, generando porosidad esférica.

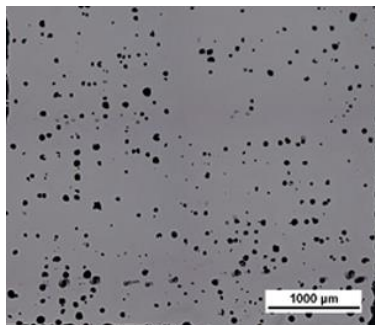


Ilustración 17. Ejemplo del tipo de porosidad esférica en la zona Keyhole

Si la potencia es muy baja para la velocidad que lleva el láser, estamos en la **zona LACK OF FUSION** (falta de fusión) donde la fusión del metal no es lo suficientemente profunda para unirse con la capa anterior provocando huecos irregulares y grandes entre las

capas. En la imagen siguiente se muestra un ejemplo de este defecto.

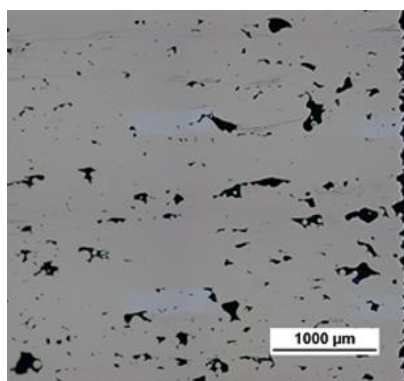


Ilustración 18.. Ejemplo del tipo de porosidad esférica en la zona Lack of fusion

Si la potencia y la velocidad son altas, se produce un efecto llamado **BALLING** (goteo) donde el metal se vuelve inestable debido a la tensión superficial y se rompe en pequeñas esferas o gotas en lugar de formar un cordón continuo.

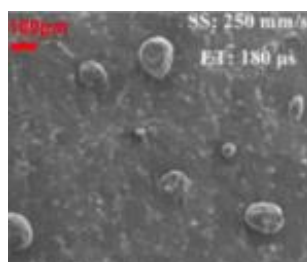


Ilustración 19. Ejemplo del tipo de defecto balling (Wang, 2020)

Actualmente el procedimiento realizado por AIDIMME sigue los siguientes pasos:

1. Se identifica un conjunto de parámetros de proceso iniciales para una aleación concreta, parámetros proporcionados por el proveedor de la tecnología o tras una revisión bibliográfica. De este modo se obtiene un punto de inicio para el experimental.
2. Se realizará un Diseño de Experimentos (DOE) donde se evaluarán diferentes conjuntos de parámetros de proceso. Este DOE parte de los parámetros de proceso iniciales y se realizarán pequeñas modificaciones en ciertos parámetros que influyen directamente en el proceso de fusión de un material. Las variables más influyentes son la potencia del láser, velocidad de avance de láser, el espacio entre distintas pasadas del láser y espesor de capa.
3. Se fabrica un conjunto de cubos de pequeño tamaño cada uno de ellos con los parámetros modificados sobre una placa de fabricación.

4. Se analiza la densificación de cada uno de los cubos mediante corte metalográfico. Para ello se separan los cubos de la placa de fabricación (manteniendo siempre la trazabilidad de los mismos para saber los parámetros con los que se han fabricado) y se cortan por un plano paralelo y otro perpendicular a la placa, se embuten y se analizan mediante microscopia óptica donde es posible detectar y cuantificar la porosidad de cada una de las muestras.
5. Tras la evaluación de la porosidad de las muestras, se selecciona aquella que menor porosidad presenta y se plantea un nuevo DOE, partiendo de los parámetros con los que se ha obtenido mejor resultado.
6. Se procede del mismo modo hasta que se obtiene la ventana de proceso que se define como uno o varios conjuntos de parámetros de proceso para el procesado de una determinada aleación metálica con una determinada tecnología aditiva que permiten la obtención de piezas densas y por lo tanto piezas correctas.

A lo largo de los últimos años AIDIMME ha trabajado en el desarrollo de parámetros para el procesado de numerosas aleaciones de un modo similar al anteriormente descrito, pero para cada experimental se partía de un punto diferente, en ocasiones los cubos eran más grandes, otros más pequeños, en otros experimentales se evaluaba paredes finas, planos inclinados dependiendo de las necesidades que requerían las piezas a fabricar con dichos materiales.

El proyecto DELTA se centra en desarrollar un procedimiento para el desarrollo de parámetros de proceso no solo pensando en la densificación de las muestras sino también en el comportamiento mecánico y la configuración de los soportes requeridos para la correcta evacuación de calor y correcta fabricación de las piezas capa a capa.

El procedimiento consta de 3 fases:

- Fase1. Estudio de la densificación en cubos macizos y en piezas inclinadas

En esta fase se diseña una bandeja de fabricación que consta de un conjunto de 25 parámetros de proceso diferentes que barren las potencias y velocidades que se pueden obtener en una determinada máquina.

Para cada uno de los 25 parámetros de proceso, se fabrica un prisma de dimensiones 5x5x10 mm y un prisma inclinado a 45 grados con las mismas dimensiones. De este modo es posible establecer los parámetros de proceso de la zona interna (inner) del material como de la zona de debajo de las piezas que no llevan soportes (downskin).

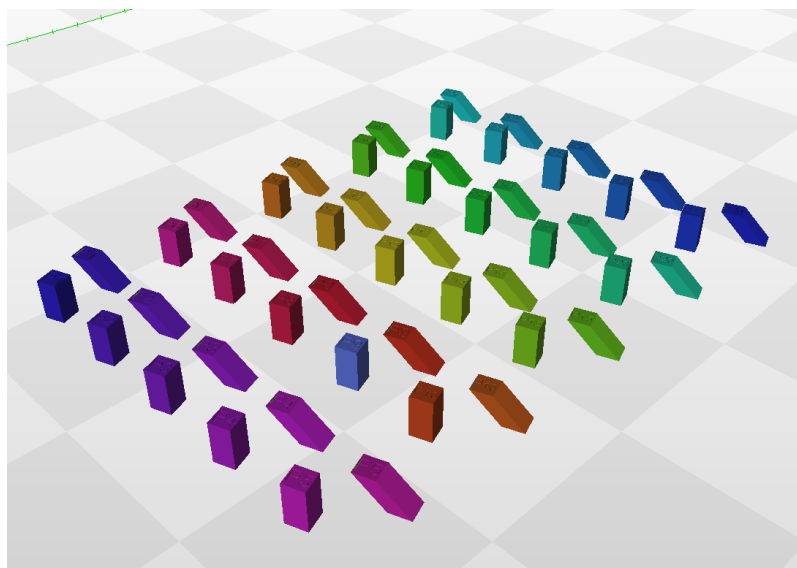


Ilustración 20. Diseño de la fase 1 del experimental para la obtención de parámetros de proceso

Se fabrican las 50 piezas anteriores con los 25 parámetros que barren las posibilidades máximas y mínimas que tiene la máquina en potencia como en velocidad fijando el espesor de capa y el parámetro Hatch distance que es la distancia de separación entre las pasadas del láser. Tras la fabricación se evalúa visualmente la calidad de las piezas. Se escogen los parámetros de proceso más adecuados para la fabricación de los prismas (parámetros inner) y los parámetros de proceso que permiten una correcta fabricación de la zona inclinada (parámetros downskin), en ocasiones estos parámetros pueden ser los mismos.

Se evalúa la densidad de las muestras seleccionadas mediante corte metalográfico. En DELTA se evaluaron todas las muestras con el fin de establecer la ventana de proceso de dos materiales.

- Fase 2. Desarrollo de probetas

Se seleccionan de dos a cuatro configuraciones de parámetros y se fabrican al menos 4 cilindros de cada configuración en la orientación de fabricación Z que es la orientación de crecimiento de la pieza, que a priori es la orientación de fabricación más crítica. Tras la fabricación se mecanizan las piezas para que tengan la forma de la probeta de tracción y se realizan los ensayos para verificar las correctas propiedades mecánicas del material que se está desarrollando. Además de los cilindros para posteriormente mecanizar las probetas de tracción se incluirán testigos para el control del contenido de oxígeno de la aleación que se está procesando.

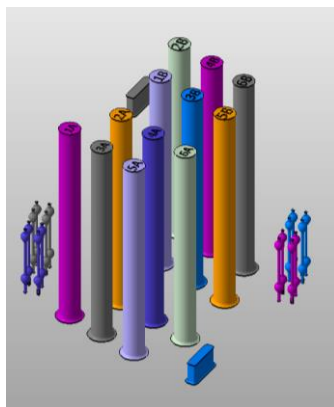


Ilustración 21. Desarrollo de probetas para ensayo de tracción y análisis del contenido de oxígeno

- Fase 3. Parámetros de soportes

Los soportes son elementos requeridos en las fabricaciones realizadas con las tecnologías de lecho de polvo de metal (PBF-LB/M) donde no solo tienen la función de sujeción de piezas sino también son disipadores de calor. Si la pieza a fabricar es muy másica se producen unas tensiones residuales en el material, como consecuencia de la gran cantidad de calor que hay que evacuar. El calor en una fabricación se ve acrecentado cuando la geometría tiene cierta inclinación.



Ilustración 22. Defectos en los soportes de las piezas.

El hecho de incluir en la fase 1 de establecimiento de los parámetros de proceso unos prismas inclinados ya sugiere desde el principio del estudio la necesidad que tiene un material de soportes y se consideran desde el inicio los parámetros adecuados para estas superficies inclinadas.

En el proyecto DELTA se ha trabajado principalmente en la fase 1 del procedimiento, mediante el análisis de un conjunto de parámetros de proceso y la identificación de la ventana de proceso de dos materiales metálicos tal y como se describe a continuación.

Ejemplo de la fase 1 implementada en dos materiales metálicos.

Se ha realizado el estudio de densificación de dos materiales nuevos para AIDIMME, en concreto los materiales MIMETE VX y MIMETE V200.

El material MIMETE V200 es una aleación principalmente de Níquel, su resistencia a la corrosión lo hace apto para productos de manipulación de alimentos, fibras sintéticas y

álcalis cáusticos. Otras aplicaciones incluyen componentes aeroespaciales, piezas eléctricas y electrónicas, y bidones para el transporte de productos químicos.

El material MIMETE V X es una aleación de níquel-cromo-hierro-molibdeno que destaca por su alta resistencia a la oxidación, la corrosión y las altas temperaturas (hasta 1200 °C), manteniendo estabilidad estructural. Su buena ductilidad y facilidad de mecanizado y soldadura la hacen especialmente adecuada para fabricación aditiva y para aplicaciones industriales exigentes, como turbinas de gas, reactores nucleares y equipos químicos. Tabla 4

Composición química de los materiales estudiados

Tabla 4. Composición química del material MIMETE V200, aleación base Níquel

MIMETE V200	Fe	Mn	Cu	Si	Ni
Limite	0-0.4	0-0.3	0-0.2	0-0.3	>99
Obtenido	0.1	0	0	0.2	99.7

Tabla 5. Composición química del material MIMETE VX, aleación base Níquel, Cr, Fe y Mo.

MIMETE VX	Al	C	Co	Cr	Fe	Mn	Mo	Si	W	Ni
Min.	0	0.06	0.6	20.6	17	0	8	0	0.2	Balance
Máx.	0.6	0.16	2.6	23	20	1.0	10	1.0	1.0	

Para cada material estudiado se han fabricado cubos de 5 x 5x 10 mm alto tanto prismas como prismas inclinados a 45 grados, puede verse a continuación la bandeja de fabricación y las muestras fabricadas de uno de ellos.



Ilustración 23. Bandeja de fabricación de material VX01 y las piezas fabricadas en la placa

Caracterización microestructural: Densificación.

Cortes realizados para estudio metalográfico:

Las piezas se han cortado de la placa con una cortadora de sierra y luego se han colocado en una base polimérica para separarlas; se han hecho 3 grupos (de 9, 9 y 7 muestras), luego han sido embutidas al frío en resina para su preparación metalográfica.



Ilustración 24. Muestras cortadas, placa de separación y probetas embutidas en frío.

Se ha seleccionado el plano XY para la observación; la preparación metalográfica después del embutido ha consistido en desbastes y pulidos, siguiendo las recomendaciones de las normas ASTM E3¹ y las guías de preparación de Struers² para luego observar a través de microscopia óptica en un microscopio óptico NIKON eclipse LV100 la densificación captada a través de imágenes y calculada a través de su software NIS Elements AR.

Presencia de porosidades:

Después del pulido se realizó una observación general de las piezas y se encontró que hay porosidades esféricas, poros de falta de fusión y poros cerca del borde en las muestras, en las siguientes imágenes pueden verse los poros encontrados.

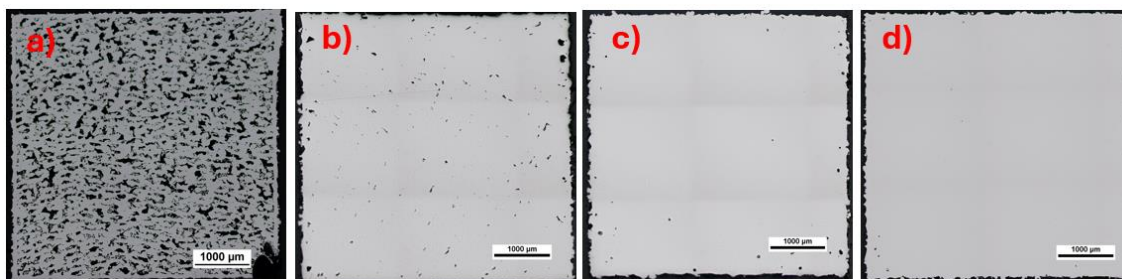


Ilustración 25. Porosidades encontradas. a) Poros por falta de fusión. b) Poros en borde de muestra. c) Poros esféricos y d) Muestra bien densificada.

Se presentan en los siguientes diagramas las porosidades observadas en función de los parámetros: velocidad de pasada (mm/s) y potencia (W), para los materiales estudiados. Donde

¹ Norma ASTM E3-01: Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens.

² <https://webshop.struers.com/es/knowledge/materials#introduction>

puede verse que hay algunas muestras que han recibido una baja densidad de energía no suficiente para obtener una buena densificación, algunas muestras sin poros con parámetros considerados correctos para esta primera fase de estudio y algunas muestras que han recibido mucha densidad de energía por lo que tienen poros esféricos.

En las imágenes obtenidas por microscopia óptica se han realizado las mediciones de la densidad, las cuales se presentan a continuación en la tabla.

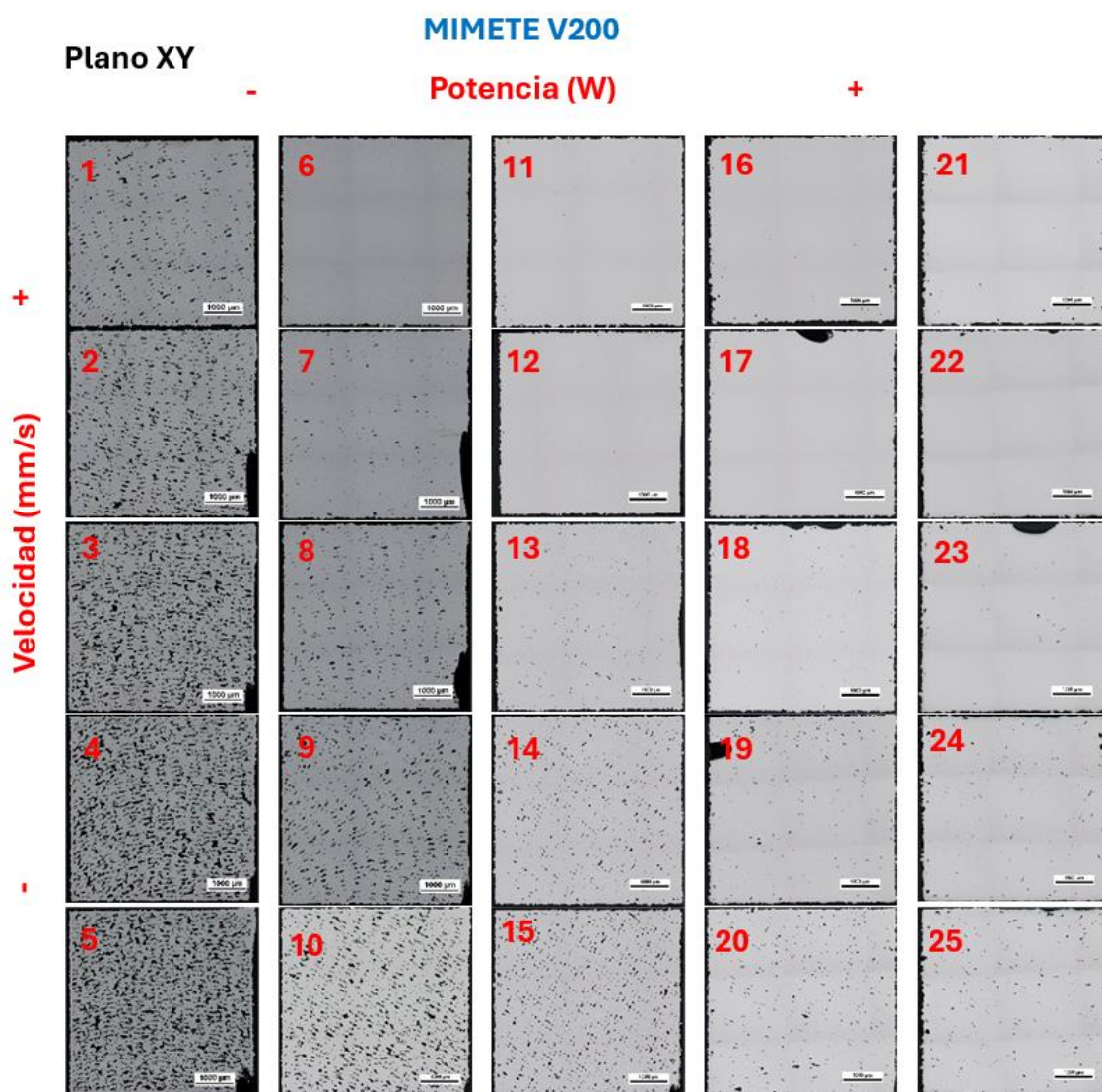


Ilustración 26. Porosidades observadas en el material MIMETE V200 en función de la velocidad (mm/s) y la potencia (W) utilizados en el proceso de fabricación

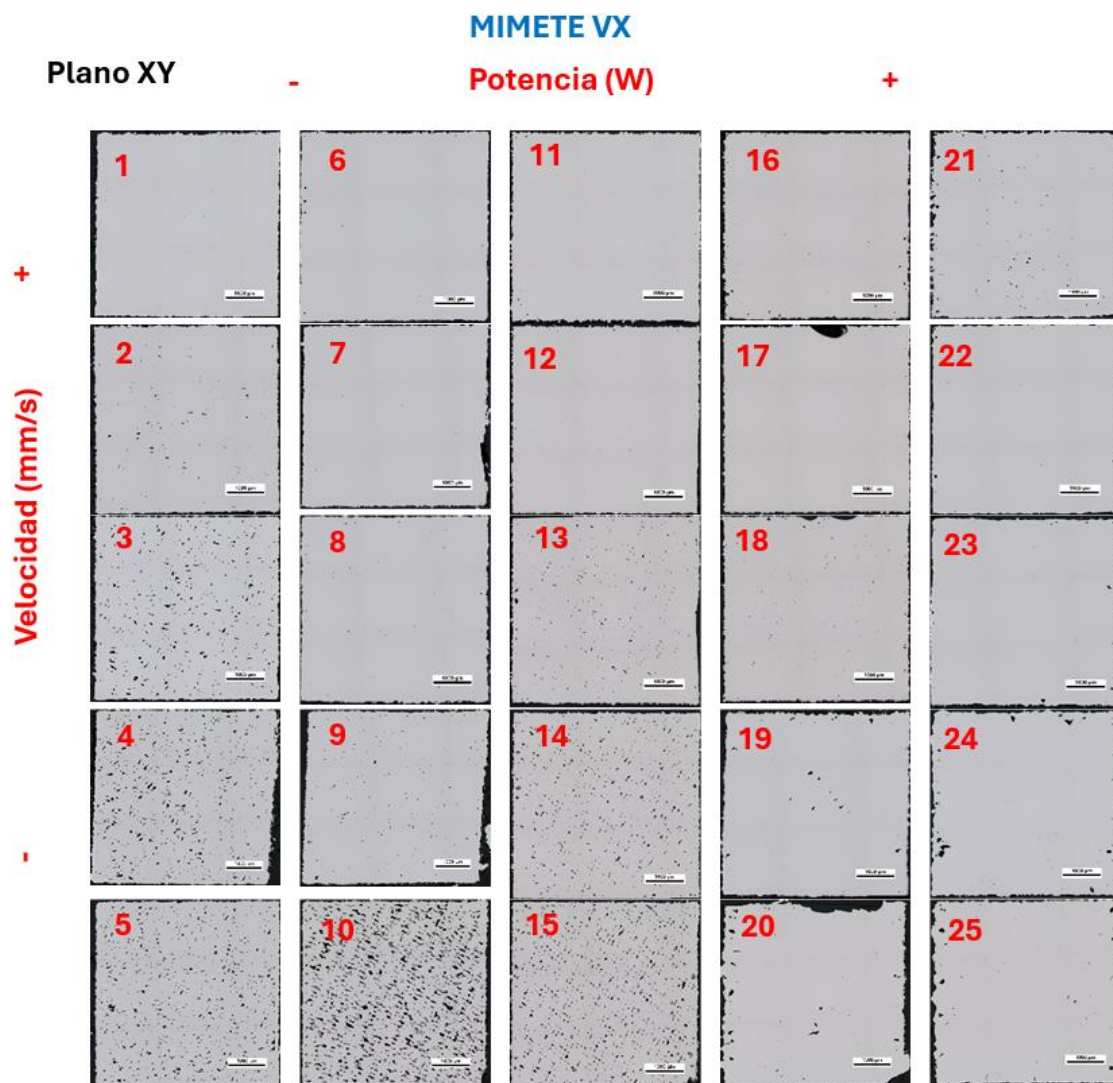


Ilustración 27. Porosidades observadas en el material MIMETE VX en función de la velocidad (mm/s) y la potencia (W) utilizados en el proceso de fabricación.

En las imágenes obtenidas por microscopía óptica se han realizado las mediciones de la densificación, a través de las porosidades encontradas con el software NIS Elements AR, se realizó el cálculo en un área de estudio de 9 mm². Se muestra el software utilizado y la tabla con los resultados de densificación.

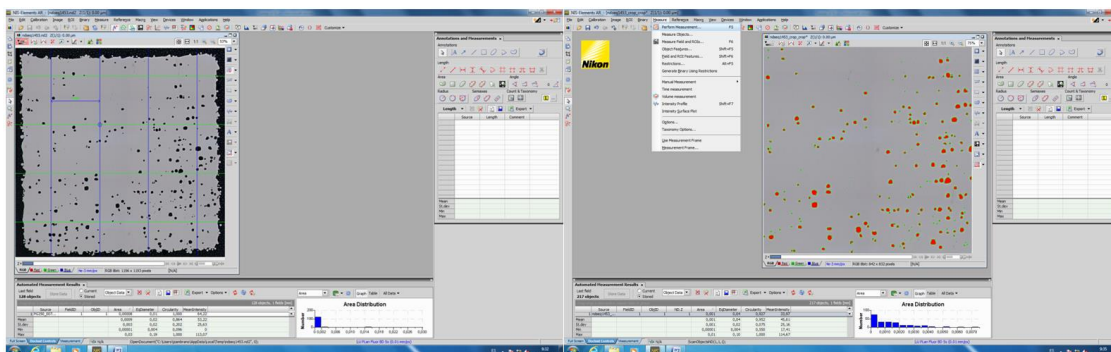


Ilustración 28. Imágenes del Software NIS Elements AR.

Tabla 6. Porosidades calculadas para los materiales MIMETE V200 y MIMETE VX

Experimental AIDIMME	Densidad de energía (J/mm ³)	DENSIFICACIÓN XY (%)	Experimental AIDIMME	Densidad de energía (J/mm ³)	DENSIFICACIÓN XY (%)
	55,56	95,920		55,56	99,972
	41,75	90,436		41,75	99,366
	33,59	83,967		33,59	96,913
	27,99	81,788		27,99	96,11
	24,07	79,330		24,07	96,138
	81,20	99,969		81,20	99,986
	61,01	99,251		61,01	99,969
	49,10	96,542		49,10	99,908
	40,91	93,912		40,91	99,361
	35,19	90,092		35,19	87,362
	106,84	99,989		106,84	99,985
PG250 MIMETE V200	80,28	99,977	PG250 MIMETE VX	80,28	99,975
	64,60	99,282		64,60	98,777
	53,83	96,984		53,83	97,068
	46,30	94,679		46,30	94,749
	132,48	99,974		132,48	99,957
	99,55	99,998		99,55	99,983
	80,10	99,751		80,10	99,727
	66,75	99,287		66,75	99,762
	57,41	98,173		57,41	99,766
	158,12	99,979		158,12	99,663
	118,82	99,999		118,82	99,985
	95,61	99,815		95,61	99,975
	79,67	99,457		79,67	99,973
	68,52	98,996		68,52	99,877

Con la información obtenida en la tabla anterior se han establecido las ventanas de proceso para cada uno de los materiales, la zona verde de las siguientes gráficas muestran la zona de parámetros con los que hay una estabilidad y una correcta fabricación.

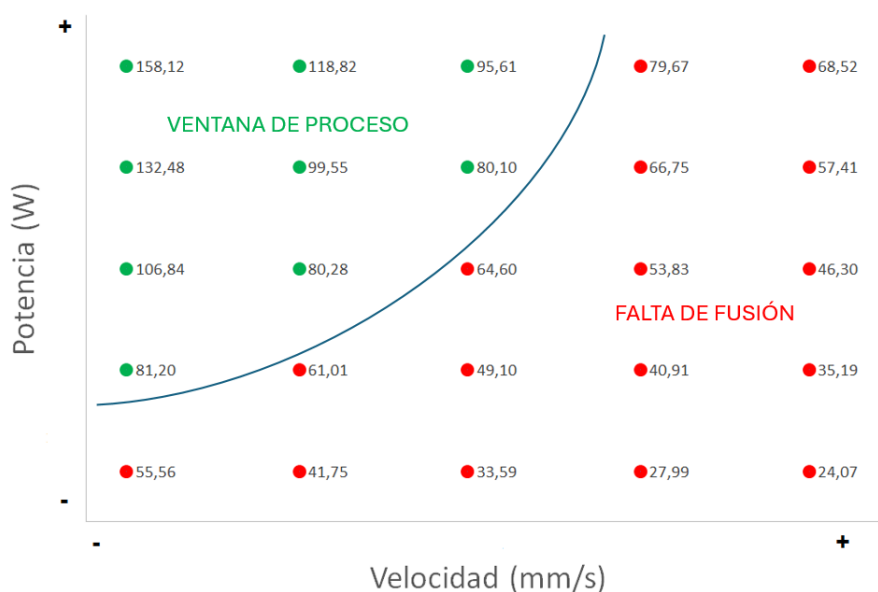


Ilustración 29. Presentación de la densidad energética (J/mm^3) en el Gráfico Velocidad-Potencia del procesado del material MIMETE V200 donde se presenta la ventana de proceso del material

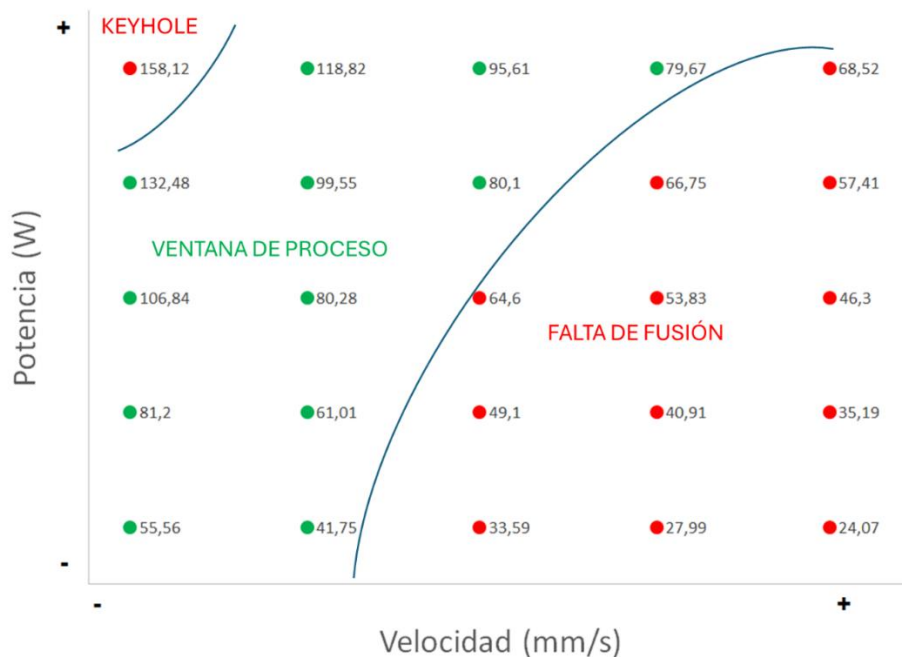


Ilustración 30. Presentación de la densidad energética (J/mm^3) en el Gráfico Velocidad-Potencia del procesado del material MIMETE VX donde se presenta la ventana de proceso del material

6. Resumen y conclusiones

En relación las actividades desarrolladas con los tratamientos químicos de mejora superficial a piezas polimérica, realizadas por AIDIMME con la máquina PostPro SF50, se han obtenido las siguientes conclusiones:

Piezas de poliamida 12:

- El suavizado químico es altamente eficaz con la poliamida 12 reduciendo la rugosidad superficial (Ra) del material en más de un 50%.
- El granallado previo de las muestras es un paso necesario pero insuficiente, el salto cualitativo en la reducción de la rugosidad superficial ocurre con el suavizado químico.
- Mediante una Intensidad 1 se consigue un equilibrio mejorando significativamente la rugosidad sin comprometer la geometría.

A diferencia de la poliamida 12, el TPU presenta desafíos críticos:

- El suavizado químico ha resultado demasiado agresivo para espesores pequeños.
- El tratamiento químico ha deformado la geometría y ha rigidizado el material eliminando la elasticidad del TPU.
- No se ha obtenido un acabado adecuado incluso con intensidades bajas.
- Se necesita continuar trabajando en las condiciones del uso de este tratamiento químico con piezas de TPU para la obtención de un resultado satisfactorio.

En relación con el desarrollo de algoritmo de cálculo de productividad y costes en Tecnologías de Fabricación Aditiva (TFA).

- El proceso PBF-IrL/P requiere un cálculo de costes complejo, donde se han determinado cuatro factores principales que forman parte del algoritmo cálculo.
- Se ha implementado una lógica condicional para separar casos donde la pieza, por tamaño sea altamente anidable pero limitada por volumen, y casos donde la pieza (de mayor tamaño) tenga peor índice de anidado aunque no limite el volumen total.
- Dentro de cada caso, se han desarrollado dos tramos de cotización, un tramo con descuentos progresivos donde cuanto más cantidad se solicita, más bajo es el coste unitario hasta alcanzar la cantidad óptima, y un tramo fijo con coste unitario no variable, que se da cuando el cliente solicita un número de piezas igual o mayor a la cantidad óptima (bandeja completa).
- El algoritmo se ha implementado en la plataforma de gestión Fabrex y se ha realizado una prueba piloto extensa con piezas reales con el objetivo de poner a prueba posibles fallos de cálculo del algoritmo.

- Podemos concluir que el algoritmo desarrollado funciona correctamente, y que no se dan casos donde, por las circunstancias específicas de la geometría o la cantidad solicitada, el algoritmo de un valor anómalo.

Respecto al desarrollo de parámetros de proceso de nuevos materiales para PBF-LB/M, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Se ha desarrollado un procedimiento para el desarrollo de nuevos materiales con la tecnología PBF-LB/M basado en tres fases, estudio de la densificación de cubos y piezas inclinadas, desarrollo de probetas y desarrollo de parámetros para soportes.
- El éxito del procedimiento se basa en la primera fase donde el objetivo se centra en encontrar el equilibrio térmico basado en los parámetros de proceso, encontrando la ventana de proceso y evitar los fallos comunes que son Keyhole, exceso de energía que atrapa burbujas de gas (porosidad esférica), Lack of Fusion (Falta de fusión), energía insuficiente que impide que las capas se unan (huecos irregulares) y Balling (Goteo) que implican inestabilidad por alta velocidad/potencia que rompe el cordón de fundición en gotas.
- Se ha obtenido la ventana de proceso de dos materiales metálicos.

7. Anexos y bibliografía

- Calignano, Flaviana & Galati, Manuela & Iuliano, Luca. (2019). A Metal Powder Bed Fusion Process in Industry: Qualification Considerations. Machines. 7. 72. 10.3390/machines7040072.
- Wang, Jintao & Liu, Shouping & Fang, Yunpeng & He, Zhongrui. (2020). A short review on selective laser melting of H13 steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 108. 10.1007/s00170-020-05584-4.

AIDIMME

Instituto Tecnológico

Domicilio fiscal —

C/ Benjamín Franklin 13. (Parque Tecnológico)
46980 Paterna. Valencia (España)
Tlf. 961 366 070 | Fax 961 366 185

Domicilio social —

Leonardo Da Vinci, 38 (Parque Tecnológico)
46980 Paterna. Valencia (España)
Tlf. 961 318 559 - Fax 960 915 446

aidimme@aidimme.es
www.aidimme.es