

2018

SUPPORT-ZERO – EVOLUCIÓN DE PROCESO TÉRMICO EN TECNOLOGIA DE FABRICACIÓN ADITIVA EN METALES PARA LA MINIMIZACIÓN DE SOPORTES MEDIANTE ANALISIS FÍSICO Y ANALITICO DEL PROCESO

Nº Expte IMDEEA/2017/145

INFORME RESUMEN DE RESULTADOS

AIDIMME



GENERALITAT
VALENCIANA

TOTS
A UNA
veu

ivACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL



UNIÓN EUROPEA
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

*Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunidad Valenciana 2014 - 2020*



El principal objetivo del proyecto SUPPORT-ZERO es reducir e incluso eliminar la necesidad de fabricar soportes para la fabricación de piezas metálicas con tecnologías de fabricación aditiva, mediante la obtención de un método que correlaciona la geometría de las piezas, la energía aportada y la conductividad del material. Para este objetivo se pretende generar un método simplificado por MEF que será ajustado durante el proyecto con pruebas experimentales.

Para la consecución de los objetivos del proyecto se estableció el siguiente plan de trabajo:



Ilustración 1. Plan de trabajo del proyecto SUPPORT ZERO

A continuación se describen las actividades técnicas realizadas en el proyecto.

PAQUETE DE TRABAJO 1. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESADO DE EBM ENFOCADO A SIMULACIÓN POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF) SIMPLIFICADO A CONDICIONES TÉRMICAS.

En este paquete de trabajo se han realizado las siguientes actividades:

Tarea 1.1. Análisis del estado el arte para la evaluación de los parámetros del haz de electrones y como afectan dichos parámetros a la fabricación (potencia, velocidad, forma y penetración del charco de fusión del haz de electrones)

En esta tarea se ha desarrollado un análisis bibliográfico para la evaluación de los parámetros del haz de electrones y como afectan dichos parámetros a la fabricación, como son la potencia, velocidad, forma y la penetración del charco de fusión. La dificultad de la evaluación de estos parámetros se centra en que algunos de ellos están íntimamente relacionados. La máquina de EBM no cuantifica de forma clara cada uno de ellos, por ello es importante conocer como pueden ser evaluados.

En el análisis del estado de arte desarrollado se puede concluir que a nivel nacional no se conocen patentes ni estudios o publicaciones relacionadas con la evaluación de los parámetros de procesado y su influencia en la cantidad de soporte a incluir en el proceso de Electron Beam Melting (EBM). A nivel internacional se han encontrado publicaciones relacionadas con la

simulación de los procesos de fabricación aditiva y de qué modo los parámetros de procesamiento influyen en la fusión del polvo durante el proceso de construcción de una pieza.

A continuación se muestra un resumen de uno de los estudios encontrados relacionados con esta temática y que es relevante para el proyecto:

Shrestha¹ et Al, desarrollaron un modelo tridimensional 3D, termo fluido del proceso de EBM mediante el software ANSYS FLUENT, centrándose en el proceso de transformación de polvo a sólido. Se creó un dominio de 8*4*2 sobre el que simularon el entorno de trabajo, colocando el lecho de polvo entre sustrato sólido (placa de fabricación) y un volumen de alto vacío (ilustración 1). El espesor de capa de polvo teóricamente repartido es de 0.07mm sobre un sustrato previamente fundido de 0.93mm. Por otro lado, se genera un volumen de vacío de 1mm.

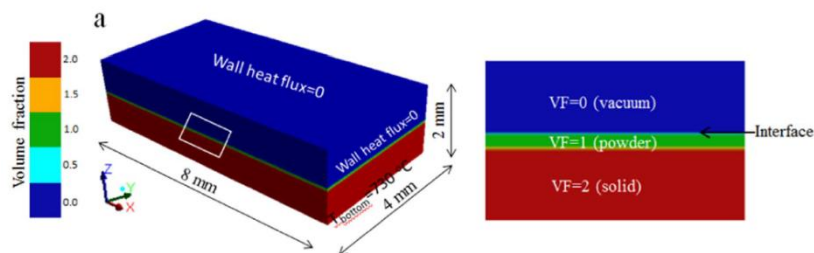


Ilustración 2. Entorno de simulación

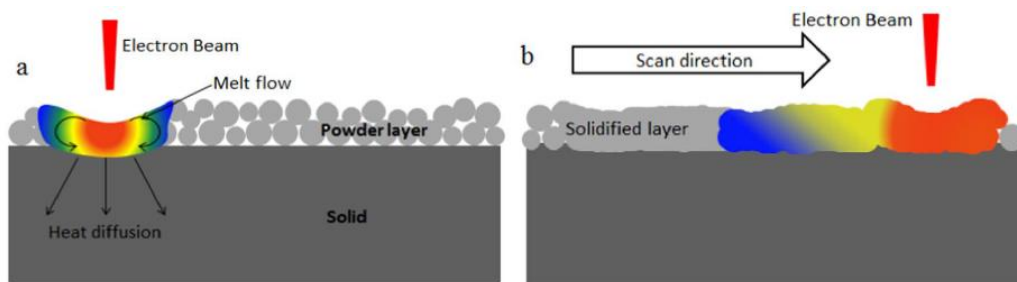


Fig. 1. (a) Melting of powder immediately after beam strikes powder layer and (b) solidification after continuous melting.

Ilustración 3. (a) Fusión de polvo inmediatamente tras la influencia del haz de electrones en una capa (b) solidificación tras la fusión continua.

Con el objetivo de simplificar la simulación, el flujo dentro de la charco de fusión se supone laminar e incomprensible. Se utiliza una malla hexaédrica, la cual es más óptima para modelos de simulación de fluidos. Definiendo un tamaño de malla de 30x30x14μm.

¹ SHRESTHA, Subin; CHOU, Kevin. A build surface study of Powder-Bed Electron Beam Additive Manufacturing by 3D thermo-fluid simulation and white-light interferometry. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, vol. 121, p. 37-49.

Informe resumen de resultados

Durante la simulación, fue necesario hacer una aproximación para definir el entorno de vacío, determinando una presión operativa de 0 y disminuyendo la viscosidad y densidad al rango en el cual se obtendría una solución convergente.

Durante la fase experimental, se utilizó una EBM de ARCAM para construir pequeñas muestras (30mm de altura) utilizando diferentes valores de speed function (SF), parámetro que controla la velocidad del haz y la corriente durante la fase de fusión, para obtener un ancho de charco de fusión deseado. Se utilizaron speed functions: SF20, SF36, SF50, SF65.

Se ha detectado que el parámetro **Speed function**, afecta en gran medida la morfología y rugosidad superficial de las piezas.

En el desarrollo de la simulación numérica, se aplica la simulación para predecir la temperatura de la zona deformada así como la deformación generada a causa del charco de fusión. La ilustración 4 muestra el resultado obtenido durante la simulación de fusión de Ti64 empelando un focus offset 36. Donde se observa que la distribución de temperaturas es simétrica respecto a la dirección de escaneo y la máxima temperatura alcanzada es de 2486.8C, lo que está por encima del punto de fusión del titanio 64. Por otro lado, se observa la generación de bordes en la sección transversal del charco de fusión debido al efecto Marangoni.

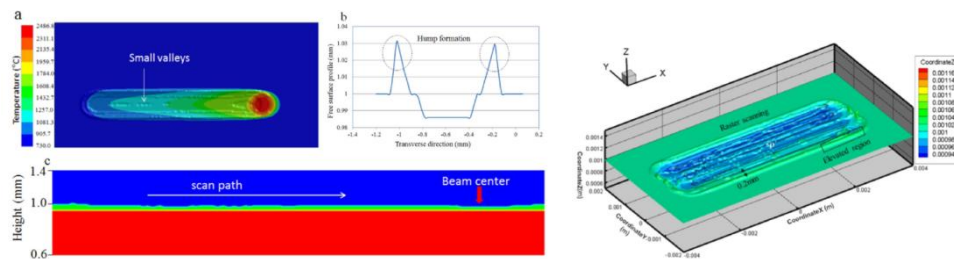


Ilustración 4. Resultado obtenido para SF36

Como conclusiones a la simulación, en la Ilustración 4 se muestran los resultados en sección transversal de la pista de escaneo que obtuvieron para diferentes configuraciones de speed function. Por otro lado, las temperaturas máximas previstas son: SF(20): 2643C, SF(36): 2487C, SF(50): 2351C, SF(65): 2322C, las cuales concuerdan con los valores experimentales: 2550C, 2420C, 2350C, 2200C respectivamente. Por otro lado, la simulación ha permitido determinar también el ancho de los charcos de fusión para los diferentes parámetros; SF(20): 1.73mm, SF(36): 1.34mm, SF(50): 1.2mm, SF(65): 1.187mm.



GENERALITAT
VALENCIANA

TOTS
A UNA
veu

IVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL

 **UNIÓN EUROPEA**
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"

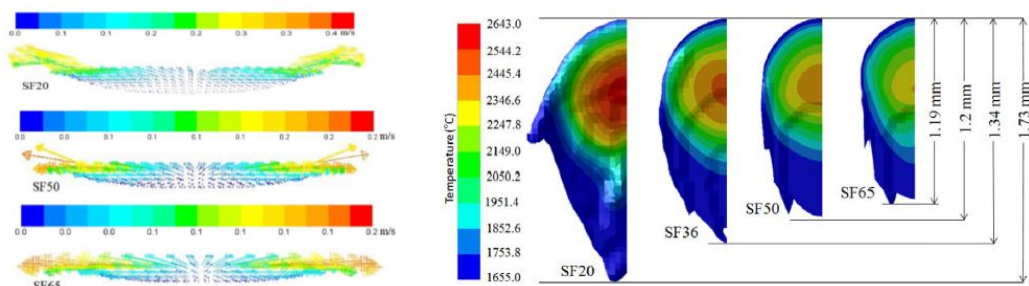


Ilustración 5. Valores obtenidos durante la simulación.

De cara al desarrollo del proyecto, se ha determinado realizar el estudio de simulación empleando el modelo 3D de elementos finitos (MEF).

Con el objetivo de ajustar la simulación a la realidad, tal como se ha podido observar en bibliografía, será necesario llevar a cabo pruebas en máquina, de las que se tratará de sacar feedback que alimente al proceso de simulación para ajustar los parámetros.

Tarea 1.2. Diseño y fabricación de los artefactos o patrones para evaluación de los parámetros del haz de electrones y su influencia en los soportes.

Se ha realizado el diseño y fabricación de los artefactos o patrones para la evaluación de los parámetros del haz con el fin de caracterizar el haz durante el proceso de fabricación (ancho y penetración del haz) y así establecer las condiciones físicas del haz de electrones para su implementación en el software de simulación. Los artefactos diseñados y fabricados sirven para evaluar la influencia de los soportes en función de los parámetros de proceso aunque no fue posible cuantificar los parámetros del charco de fusión, por este motivo se estableció un nuevo plan de experimentos basados en la refusión con el chorro de electrones sobre muestras de cobre y titanio para medir exactamente el efecto de la fuente de energía.

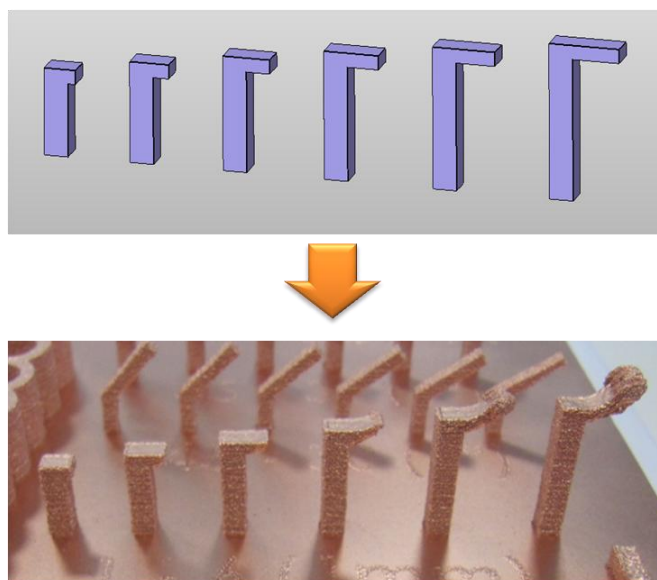


Ilustración 6. Zona del artefacto de cobre con defectos

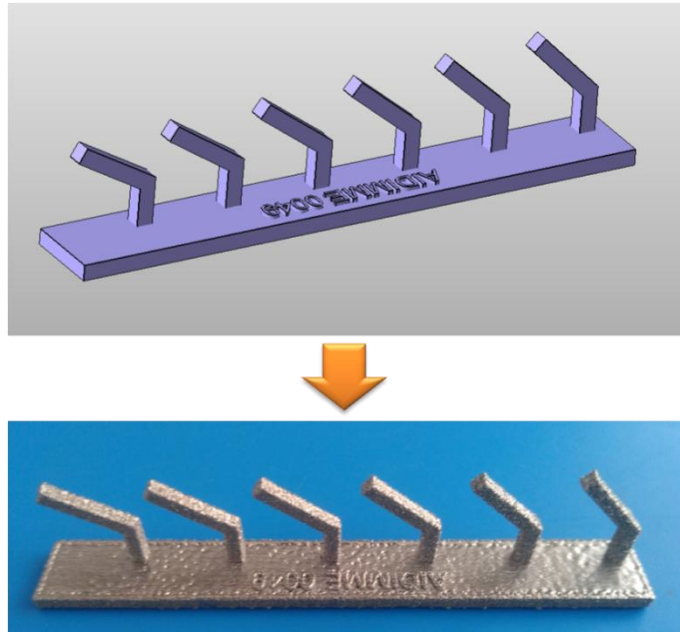


Ilustración 7. Artefacto de titanio

El experimento planteado en el proyecto tiene como objetivo, extraer feedback del proceso de fabricación aditiva conocido como Electron Beam Melting (EBM), durante la fusión empleando parámetros de proceso de cobre puro y los parámetros de titanio.

Para conocer la influencia de los parámetros de proceso en el charco de fusión resultante durante el procesado, se han diseñado diversas probetas con diferentes inclinaciones (α) y espesores (x) en el caso del cobre, sobre las que se han practicado refusiones superficiales con diferentes parámetros de procesado.

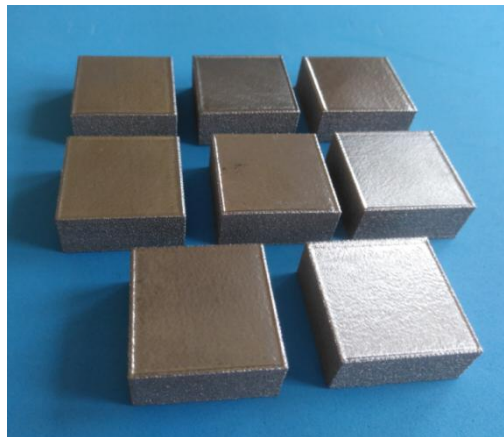


Ilustración 8. Muestras de titanio para hacer refusión

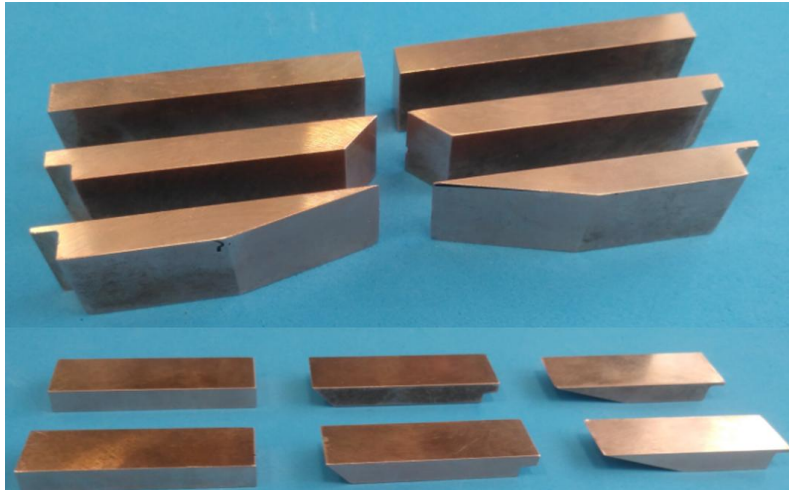


Ilustración 9. Muestras de cobre donde hacer la refusión

Una vez diseñadas y fabricadas las muestras sobre las que se hace la refusión, se plantea la colocación de las muestras en la bandeja de fabricación y se asignan los parámetros de cada línea de refusión.

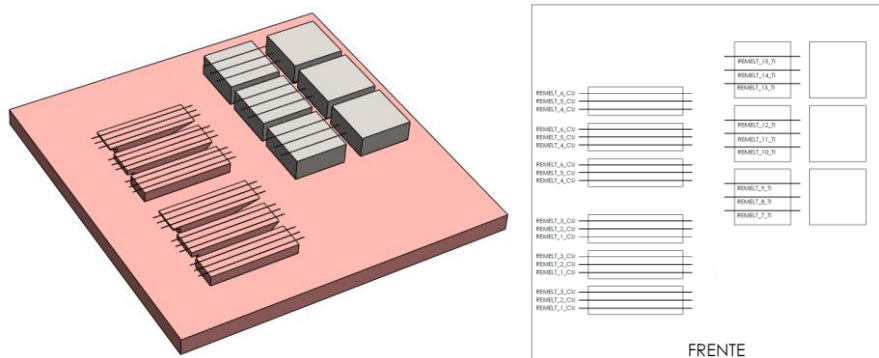


Ilustración 10. Colocación de las muestras en la bandeja de fabricación para su refusión y selección de las pistas

A cada una de las pistas diseñadas (líneas de refusión) se le asigna unos valores de Beam current o Intensidad del haz (mA) y scan speed o velocidad (mm/s) diferentes, modificando la densidad de energía por unidad lineal de forma incremental.



Ilustración 11. Resultados de la experiencia

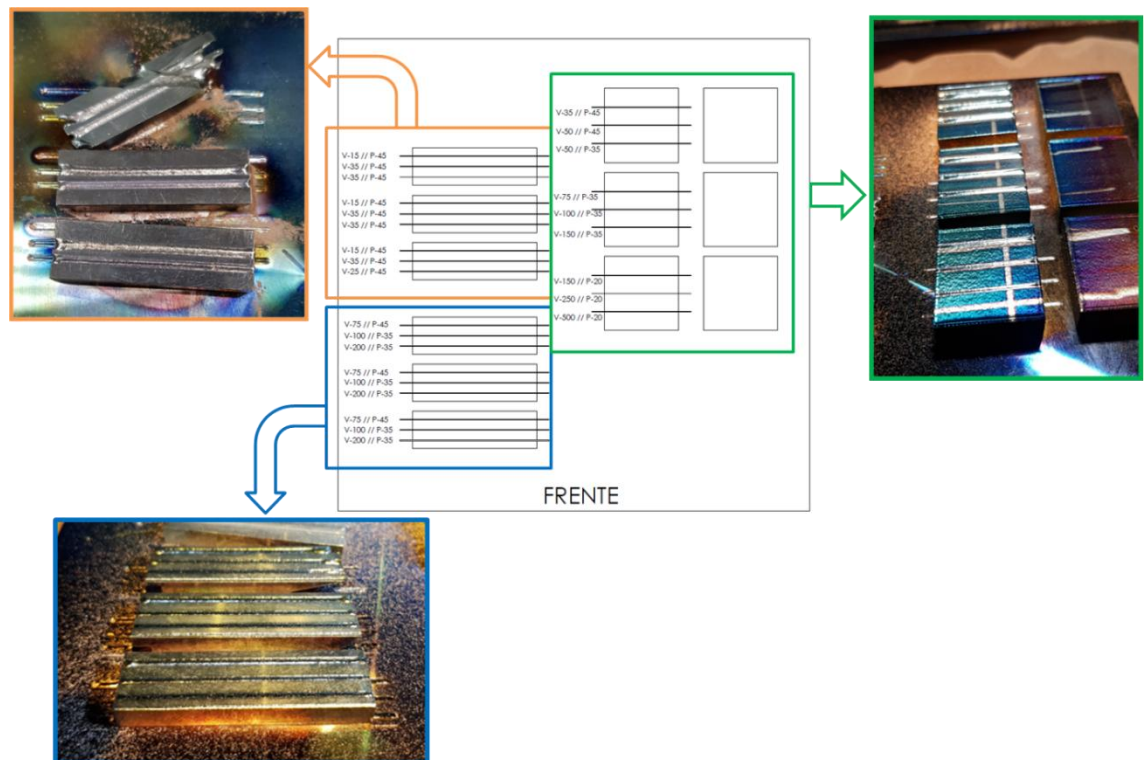


Ilustración 12. Detalle de los resultados de la experiencia de refusión

Tarea 1.3. Caracterización microestructural para la cuantificación de los parámetros del haz de electrones en condiciones estándar

Tras la fabricación de los artefactos y las experiencias de refusión superficial se han caracterizado los resultados, datos que son inputs para el software de simulación.

Tras el desarrollo de la experimentación de refusiones se han medido los charcos de fusión mediante el microscopio óptico NIKON Eclipse LV100. El objetivo de la medición de los charcos de fusión es recoger información de entrada para la simulación del proceso de EBM (diámetro de foco) así como recoger datos para validar el resultado de la simulación (ancho del charco en diferentes zonas de las probetas).

Para cada conjunto de parámetros formado por una determinada velocidad (scan speed) y corriente (Beam current), se ha calculado el Line Energy o lo que es lo mismo la energía por unidad lineal aportada en cada pasada. Se utiliza la fórmula siguiente:

$$\text{Line Energy} = \frac{\text{Acceleration voltage} \times \text{Beam Current}}{\text{Scan Speed}}$$

Siendo el valor de Acceleration voltage de 60 KV para la máquina ARCAM A2 utilizada en el desarrollo de este proyecto.

A continuación se muestran las medidas realizadas y los resultados obtenidos:

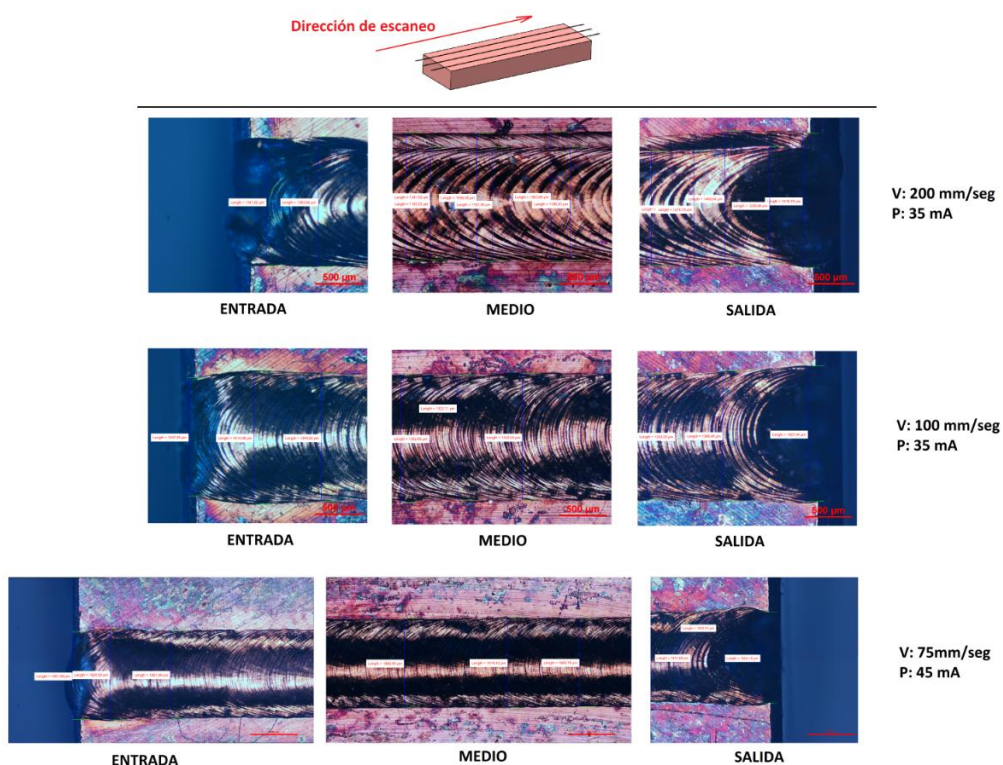


Ilustración 13. Resultados de la refusión de la probeta de cobre de 90°

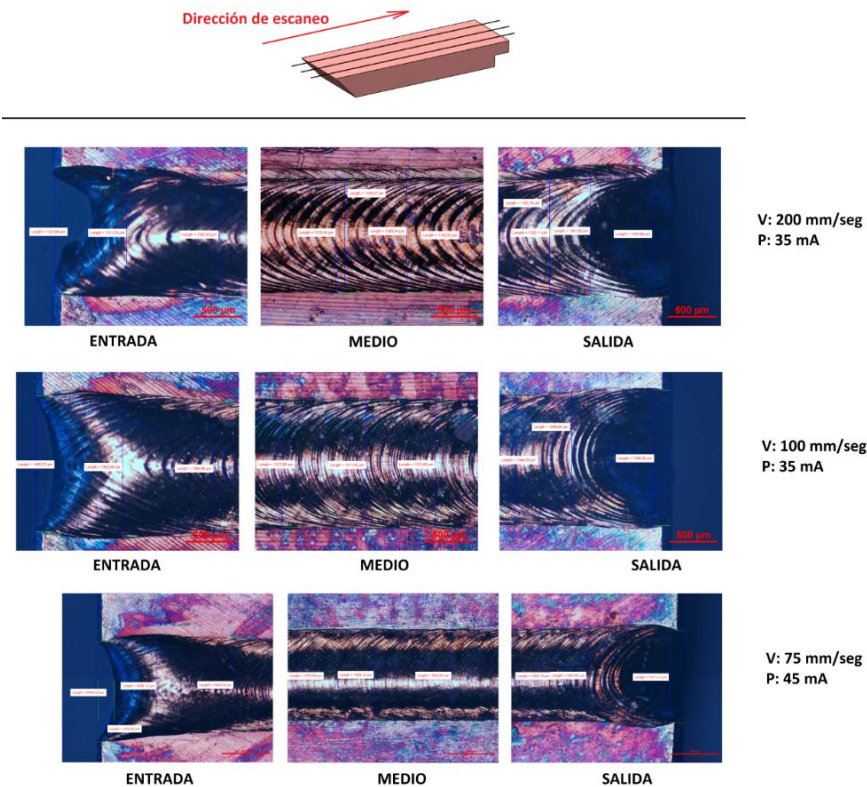


Ilustración 14. Resultados de la refusión de la probeta de cobre de 45°

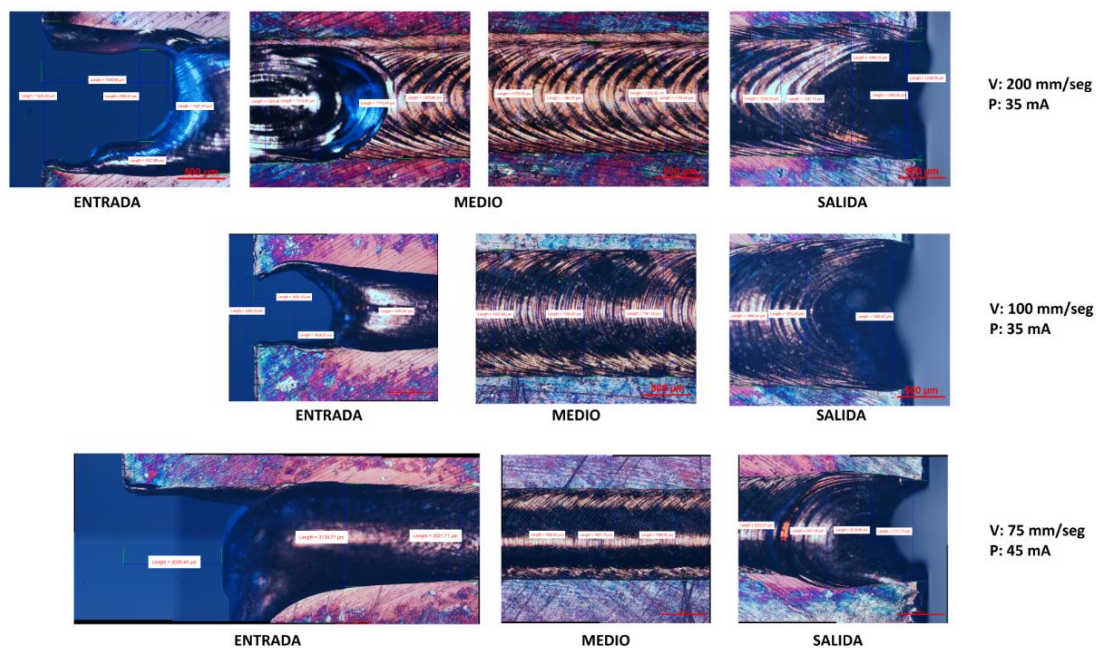
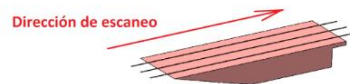


Ilustración 15. Resultados de la refusión de la probeta de cobre de 15°

A continuación se muestran las medidas tomadas en las muestras de titanio.

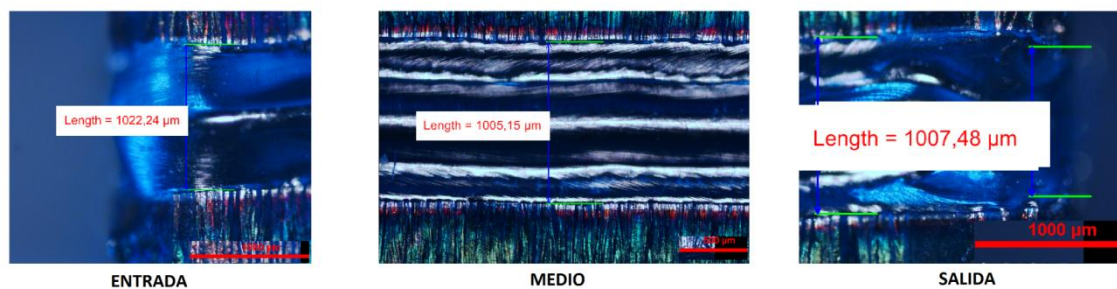


Ilustración 16. Medidas del charco de fusión en el titanio con scan speed 500 mm/s y Beam current de 20 mA

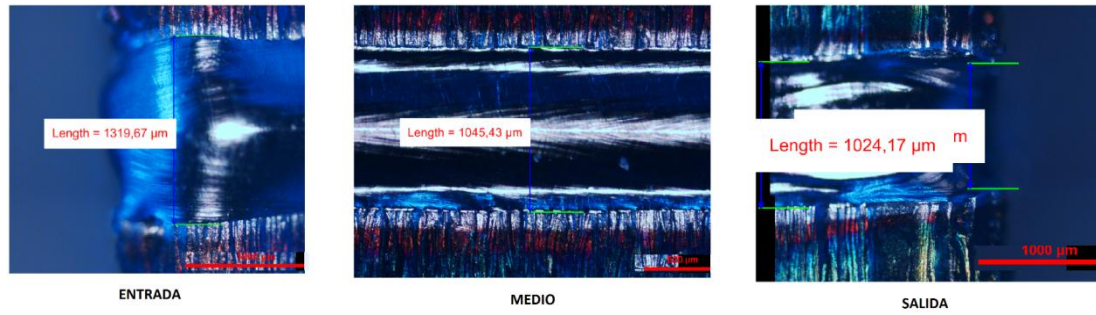


Ilustración 17. Medidas del charco de fusión en el titanio con scan speed 250 mm/s y Beam current de 20 mA

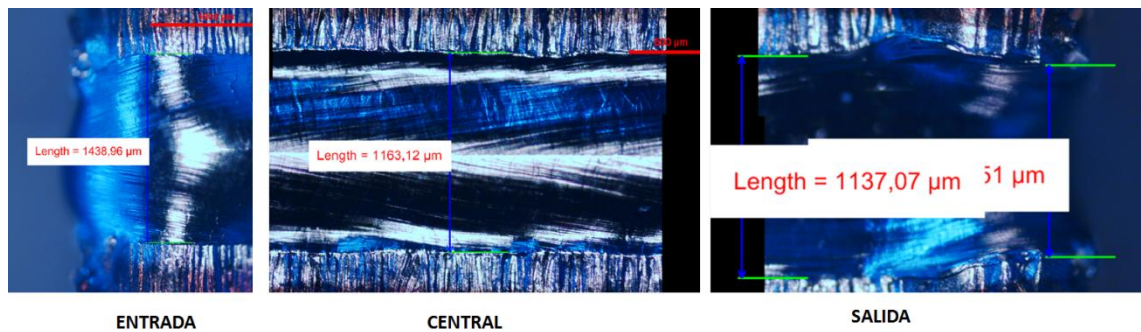


Ilustración 18. Medidas del charco de fusión en el titanio con scan speed 150 mm/s y Beam current de 20 mA

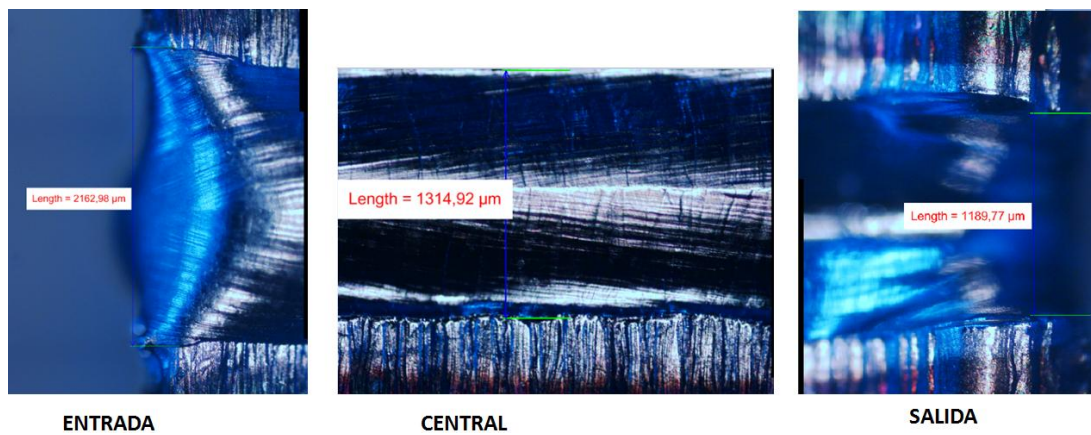


Ilustración 19. Medidas del charco de fusión en el titanio con scan speed 150 mm/s y Beam current de 35 mA

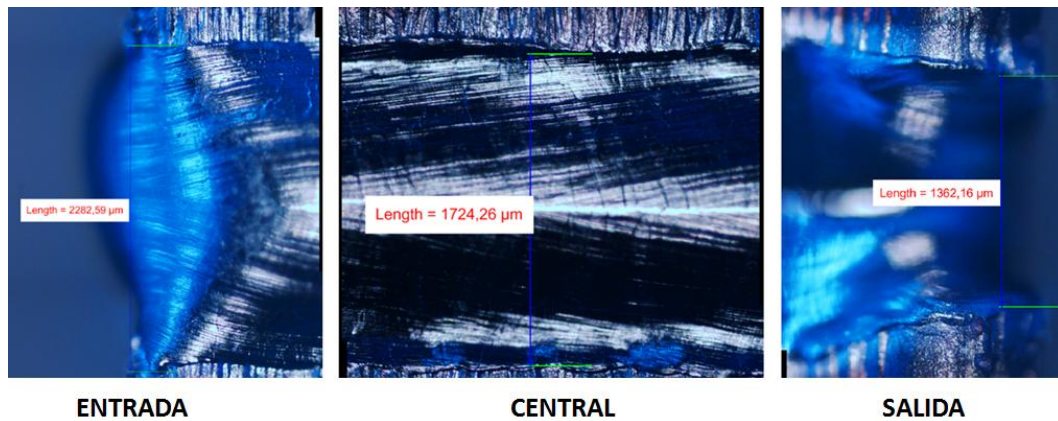


Ilustración 20. Medidas del charco de fusión en el titanio con scan speed 100 mm/s y Beam current de 35 mA

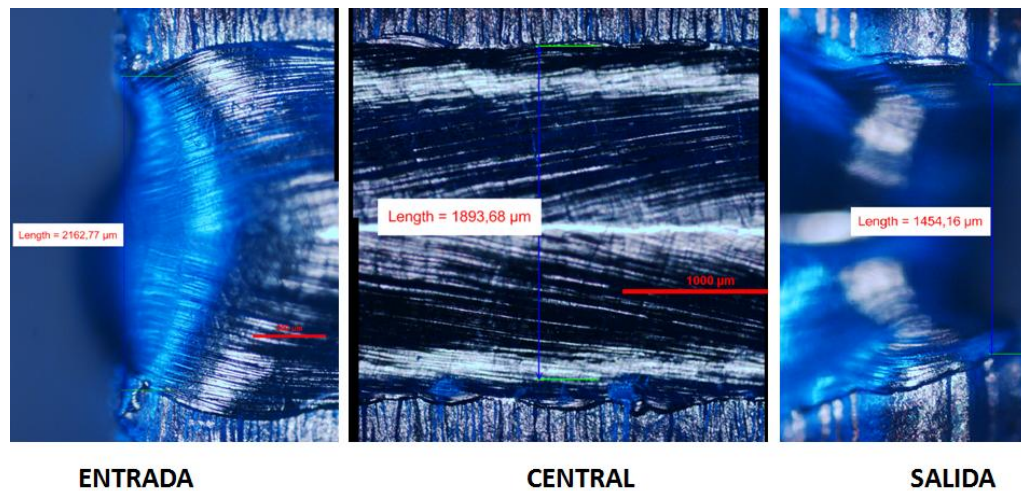


Ilustración 21. Medidas del charco de fusión en el titanio con scan speed 75 mm/s y Beam current de 35 mA

Tras el desarrollo de la experimentación de refusión con diferentes geometrías, como se ha desarrollado con el cobre, se puede concluir que la selección de los parámetros de proceso es esencial para determinar el charco de fusión de la máquina EBM. La geometría influye en el charco de fusión, sobre todo los planos inclinados, a menor ángulo, mayor es el efecto de los parámetros de proceso aumentando sustancialmente el valor del charco de fusión lo que implica la necesidad de controlar los parámetros de proceso o incluir soportes para evitar defectos en las piezas.

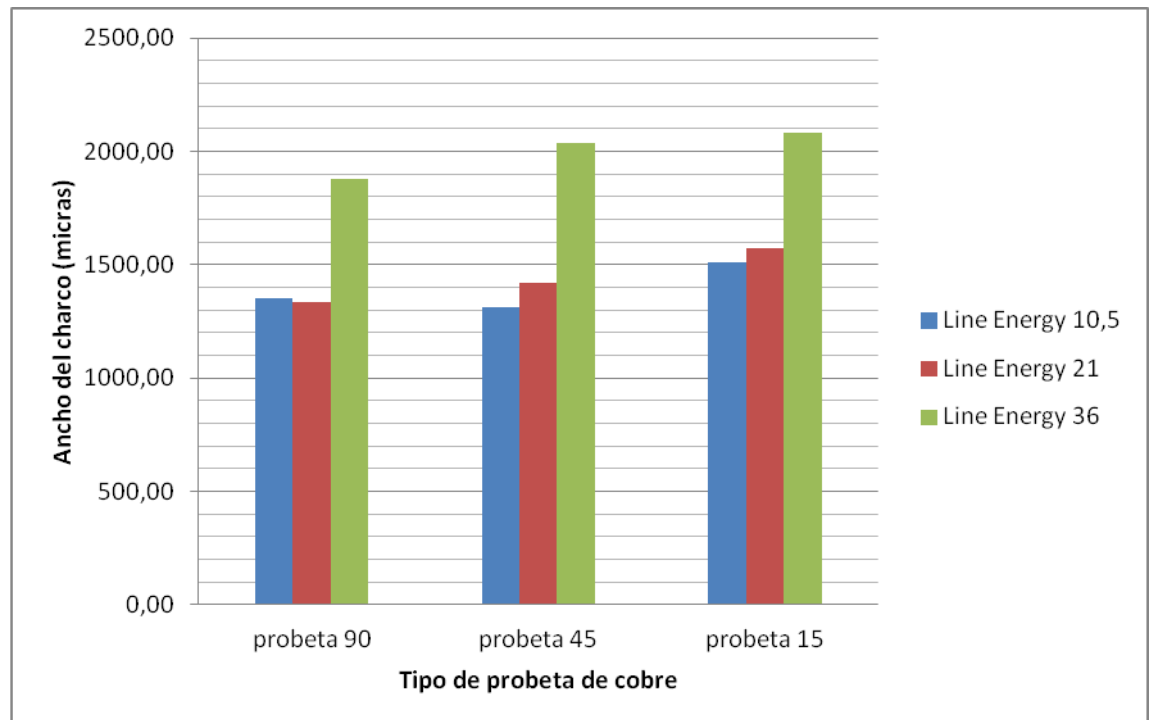


Ilustración 22. Sección de entrada (zona de planos inclinados)

En el caso del titanio, teniendo en cuenta que las probetas son iguales y no hay diferencias geométricas entre la entrada, zona central y la salida se puede concluir que a medida que aumenta la energía, mayor es el charco de fusión siendo la zona de la entrada la que mayores valores presenta. Este valor de charco aumenta con la energía aportada.

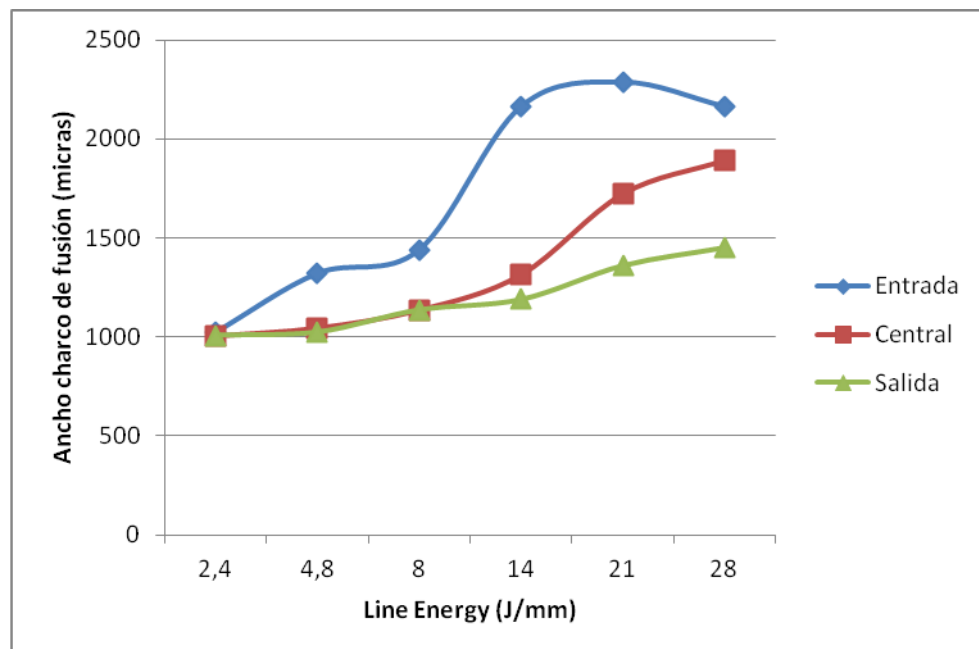


Ilustración 23. Ancho de charco de fusión en función de la energía para el titanio

El desarrollo de esta experimentación ha dado como resultado los input para la simulación en el PT2 así como los datos para validar la correcta simulación del proceso de EBM.

PAQUETE DE TRABAJO 2. DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA DE SIMULACIÓN SIMPLIFICADA DEL PROCESO EBM MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

En este paquete de trabajo se han realizado las siguientes actividades:

Tarea 2.1. Evaluación de la capacidad del software de cálculo para simular el proceso de EBM.

Esta tarea se ha centrado en la evaluación de diferente software de cálculo para la simulación del proceso de EBM simplificado a las condiciones térmicas siguiendo la trayectoria de fusión del haz de electrones. En la simulación no se tendrá en cuenta la transformación de fases que ocurre durante el proceso de fusión del polvo ya que se centra en la función de los soportes de evacuar el calor y esto como influye en general al proceso de fabricación.

Se han evaluado diferente software de cálculo y además se ha seleccionado aquel que es capaz de simular el proceso físico de la EBM.

Existen varios tipos de software de cálculo de software general o software específico para procesos de fabricación aditiva.

Dentro del software de cálculo general, la mayoría tiene la capacidad de hacer cálculos térmicos, entre ellos destaca, ANSYS, ABAQUS, MSC SOFTWARE, etc.. La mayoría de este tipo de software disponen de módulos especiales de simulación de procesos de fabricación convencionales como son mecanizado, inyección, etc... en los que en los últimos meses se han incluido módulos especiales de fabricación aditiva tanto para metales como para polímeros.

Además se han creado diversas plataformas de diseño y simulación basadas cada una de ellas en un software de diseño y calculo específico. Todas estas plataformas están incluyendo módulos de optimización topológica que permiten diseñar una pieza con el material mínimo necesario para soportar las cargas de uso y que normalmente no se pueden fabricar con métodos tradicionales y sí con fabricación aditiva. Dentro de los programas de optimización topológica cabe destacar el Optistruct que está incluido en la Plataforma Hyperworks de Altair y nuevos programas basados en software libre como es el Z88, plataforma TOSCA, SIMUFAC, etc..

Además existe software específico para fabricación aditiva, inicialmente se crearon para preparar los ficheros de capas para su transferencia a las máquinas de fabricación aditiva y actualmente son capaces de simular todas las fases desde la adaptación del diseño a fabricación aditiva, el propio proceso de fabricación así como post-procesos, separación de la pieza de la placa y diseño de la contra deformada en el caso del procesado de metales con ciertas tecnologías que distorsionan la pieza. Dentro de este tipo de software específico para fabricación aditiva cabe destacar Magics y 3-Matic de Materialise, Netfabb Studio.

A continuación se muestra más información de la plataforma Hyperworks de Altair que se ha utilizado en el proyecto.



GENERALITAT
VALENCIANA

TOTS
A UNA
veu

IVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL

 **UNIÓN EUROPEA**
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"

PLATAFORMA HYPERWORKS DE ALTAIR: <https://www.altairhyperworks.com/>

La plataforma de Hyperworks de Altair dispone de numerosos módulos diferentes cada uno de ellos con unas características determinadas. Algunos de los módulos disponibles son:

- OptiStruct. Análisis estructural lineal y no lineal que permite optimizar diseños en función de las cargas de aplicación y siguiendo las restricciones planteadas por el usuario.
- Radioss. Analisis estructural para resolver problemas de grandes no linealidades, cargas dinámicas, impactos, estampaciones, etc...
- AcuSolve. Cálculos de dinámica de fluidos (CFD)
- Flux. Módulo de Elementos Finitos para aplicaciones de campos electromagnéticos y simulaciones termo físicas.

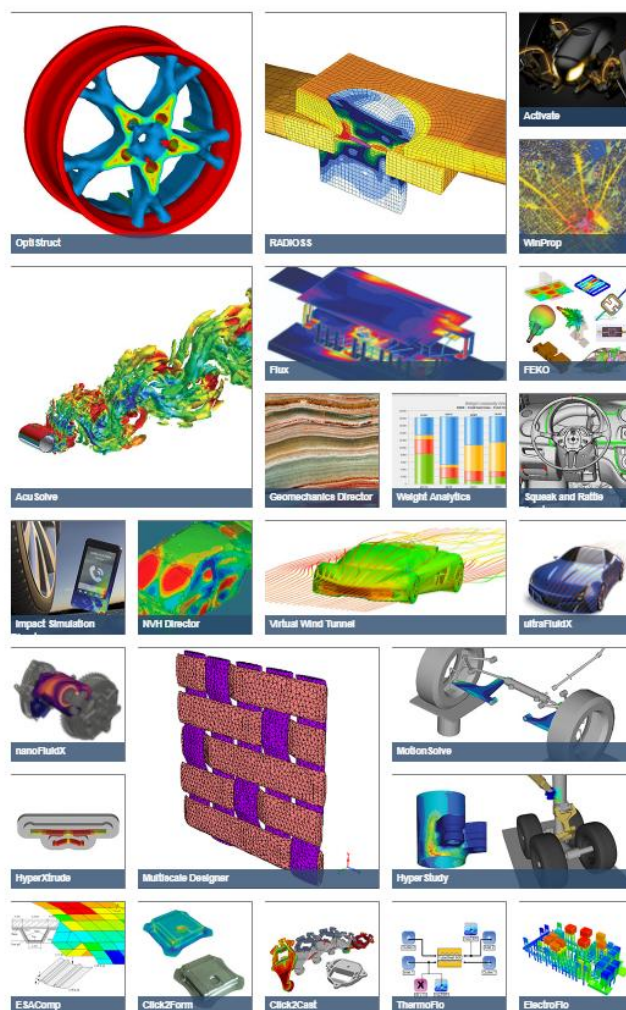


Ilustración 24. Módulos disponibles en la Plataforma de Hyperworks de Altair

En concreto para procesos de fabricación aditiva, dispone varios módulos:

- Evaluación del comportamiento estructural: Mediante el módulo Optistrustruct, Inspire y Evolve.
- Estructuras: Modulos Optistrustruct, 3-matic



GENERALITAT
VALENCIANA

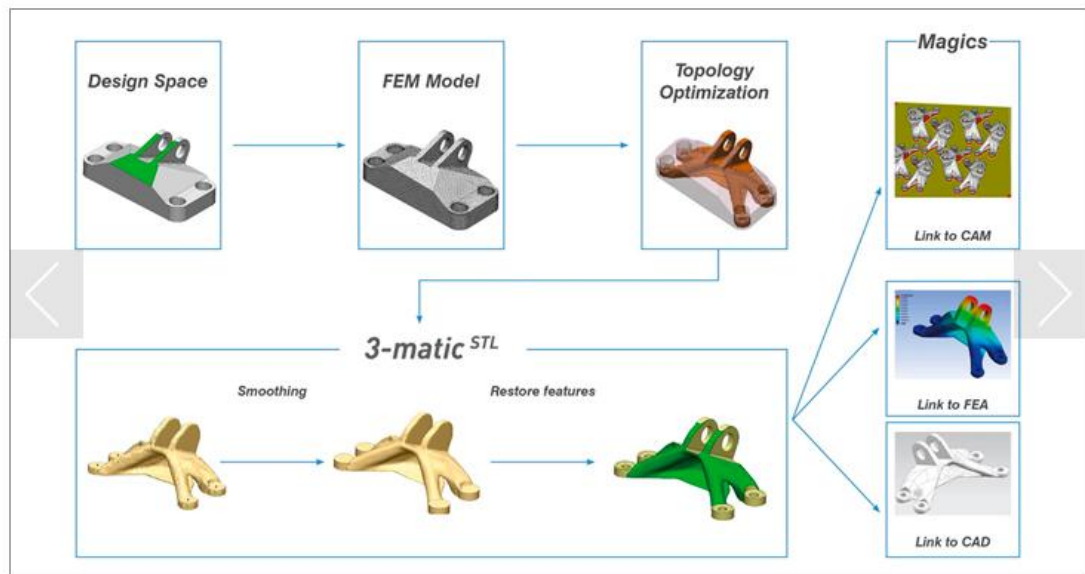
TOTS
A UNA
veu

IVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL

 **UNIÓN EUROPEA**
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"

- Comportamiento térmico y de fluidos. Módulos AcuSolve y HyperStudy



Fast workflow of topology data clean-up. Easy link to 3D Printing, FEA and CAD. Project of TUDelft, KMWE & TNO.

Ilustración 25. Ejemplo del Workflow para el diseño de piezas para fabricación aditiva con la plataforma Hyperworks

Tras una evaluación de los software comerciales relacionados con fabricación aditiva, para conseguir la simulación del proceso de fabricación de la EBM requerida en este proyecto no es válido el uso de un software específico puesto que el objetivo en el proyecto no es la simulación capa a capa del proceso de EBM sino la simulación térmica del charco de fusión del proceso de EBM para varios parámetros de proceso y así conocer la influencia de los parámetros de fusión a la hora de colocar soportes en las piezas de fabricación aditiva.

Tras la evaluación de varios software, se ha seleccionado el modulo Radioss de la plataforma Hyperworks de Altair. Este módulo está muy enfocado al estudio del fenómeno de choque. Pero es interesante su uso en el proceso de simulación del proceso térmico de EBM porque permite hacer cálculos multifísicos, en **concreto cálculos dinámicos para mover una fuente de calor**.

Tarea 2.2. Simulación del proceso de EBM.

Antes de iniciar la simulación del proceso de EBM, se ha comprobado que los cálculos de elementos finitos son correctos mediante la simulación del proceso de SLM, del que se dispone de información de la evolución de la temperatura registrada mediante una cámara termográfica de un proyecto anterior.

El proceso concreto que se simula es la exposición de una placa rectangular de una refusión que sigue una trayectoria tipo serpiente.

En el proyecto se examinaba el aumento de temperatura en los defectos o inclusiones preexistentes en las probetas. En este proyecto dichos defectos añaden otra incertidumbre al

Informe resumen de resultados

problema y como el objetivo es analizar la distribución de temperaturas y poder correlacionarla con una simulación teórica se decide descartar esas zonas y trabajar en la simulación sobre una superficie plana sin defectos.

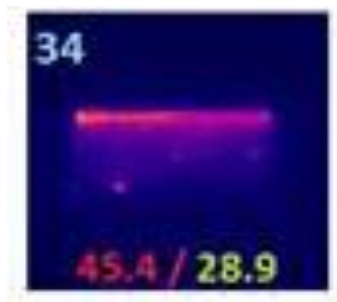


Ilustración 26. Resultados cámara termográfica

Se modelan el sólido base de partida utilizado en el experimento mediante elementos 3D tipo HEXA8 y el foco mediante elementos 2D tipo SHELL. El tamaño de los elementos es importante para obtener un resultado detallado pero penaliza el tiempo de cálculo y se ha decidido utilizar 0,2 mm.

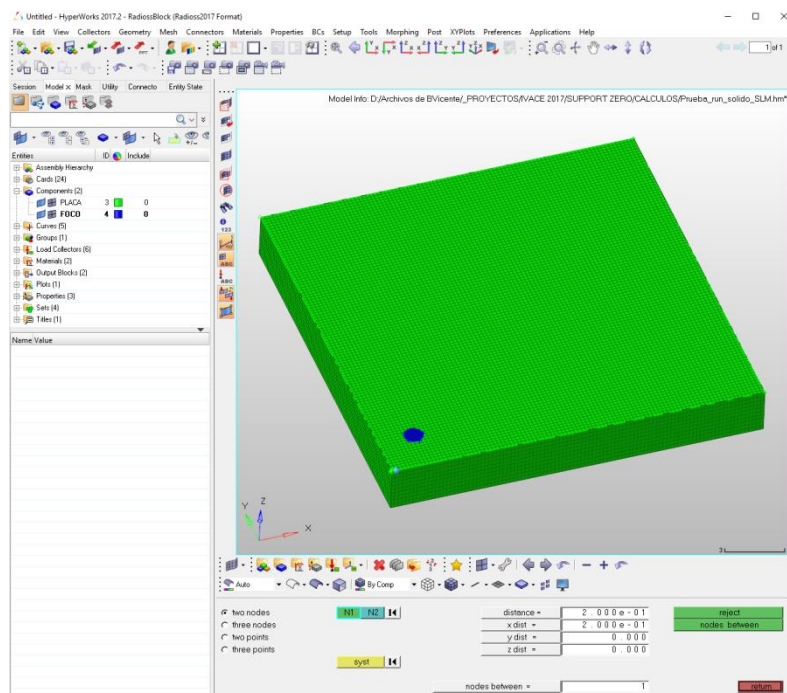


Ilustración 27. Modelado de elementos de simulación en Hyperworks

Se introduce en el modelo de cálculo la trayectoria tipo serpiente junto con la velocidad del laser 1000mm/s y se ajustan los parámetros característicos del material de conductividad y transmisión de temperatura. Además se considera también la convección de las caras expuestas al ambiente de la cámara de fusión.

Los resultados obtenidos muestran el movimiento del foco de energía que representa el laser y se aprecia la distribución de la temperatura en la placa a lo largo de la simulación.



GENERALITAT
VALENCIANA

TOTS
A UNA
VEU

IVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL

 **UNIÓN EUROPEA**
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"

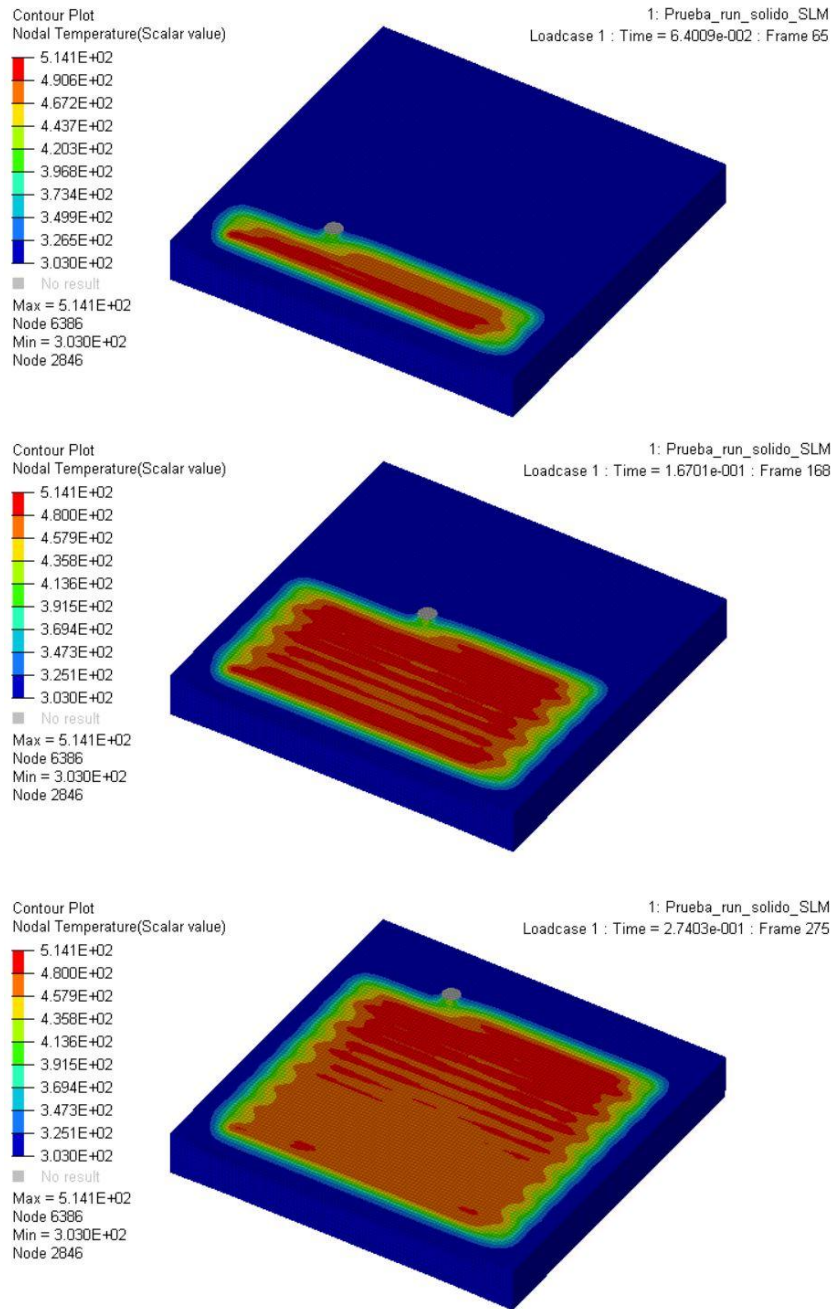


Ilustración 28. Secuencia simulación del proceso de SLM

La propia evolución de la temperatura muestra cómo se genera un aumento de temperatura en las curvas de cambio de dirección de la trayectoria. Se puede identificar la zona afectada por el paso del laser y se pueden diferenciar distintos rangos de temperaturas que traducidos a la temperatura de fusión y ebullición indicarían las zonas de refusión y de sublimación del material. Así mismo también se puede observar en la última captura como va descendiendo la temperatura a lo largo del tiempo en la primera parte de la trayectoria.

Informe resumen de resultados

La simulación ha permitido corregir problemas de funcionamiento del modelo (interfaz foco-probeta, propiedades del material, ajuste de trayectoria, etc.) y se ha comprobado las capacidades y la validez del solver Radioss y el paquete hyperworks para su utilización en este tipo de procesos.

Simulación del proceso de EBM:

La simulación del proceso de EBM se plantea con el objetivo de obtener un modelo de cálculo ajustando principalmente las propiedades de la fuente de calor que reproduce el efecto del haz de electrones sobre el material a fundir.

El ajuste de la simulación incluye también la posibilidad de modificar las propiedades del material para reproducir el efecto que tiene el haz de electrones sobre las probetas ensayadas.

En este apartado se utilizan los resultados experimentales, obtenidos del PT1 para ajustar el modelo de cálculo.

Se modelan los sólidos de partida para la simulación que corresponden por tanto a las probetas fabricadas en cobre mediante elementos 3D tipo HEXA8 y PENTA6. Los focos, por otra parte, se modelan mediante elementos 2D tipo SHELL.

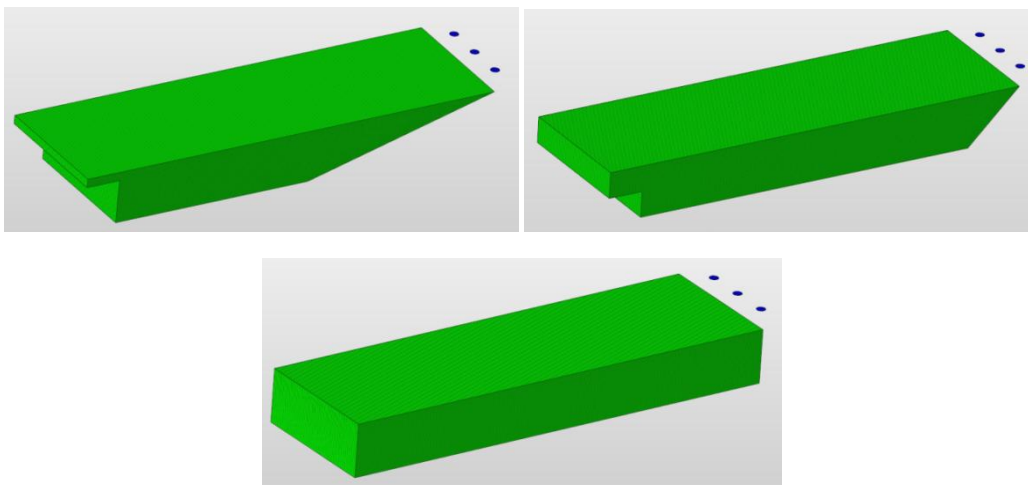


Ilustración 29. Modelo de las probetas para la simulación

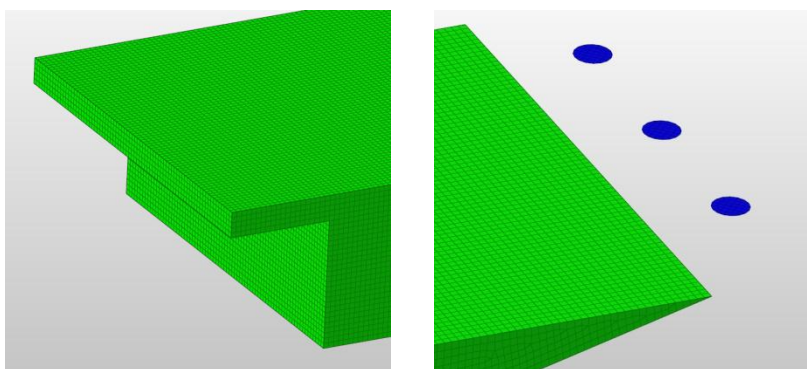


Ilustración 30. Detalle modelo simulación EBM.



GENERALITAT
VALENCIANA

TOTS
A UNA
veu

IVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL

 **UNIÓN EUROPEA**
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"

Informe resumen de resultados

Debido a las dimensiones reducidas del área de acción del haz de electrones es necesario escoger un tamaño de elemento pequeño que permita extraer un resultado con suficiente calidad pero como contrapartida provoca que el tiempo de cálculo se incremente notablemente. Es necesario encontrar un punto óptimo que permita obtener unos resultados de calidad aceptable y a la vez resulte práctico para ofrecer una solución en un tiempo razonable.

Previamente a la realización del experimento se realizan pruebas con la simulación para corregir posibles problemas.

- Inestabilidad del modelo. Se dan problemas de estabilidad del modelo debidos al incorrecto funcionamiento de la interfaz foco-demostrador. Se produce una deformación muy elevada del demostrador que exige la corrección de los parámetros de la interfaz.

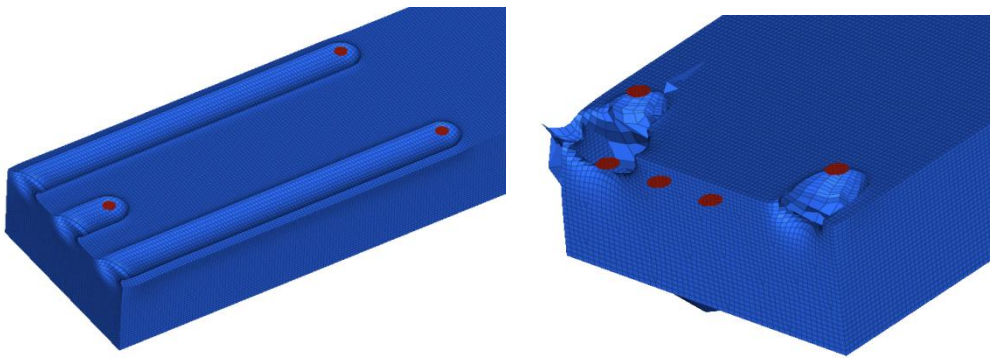


Ilustración 31. Detalle modelos fallidos.

- Interfaz foco-demostrador no uniforme. Otro problema debido a la interfaz produce discontinuidades en la transmisión de la temperatura. En las zonas de voladizo se pierde el contacto de la interfaz debido a que existe demasiada penetración del foco y a la disminución de rigidez en esas zonas.

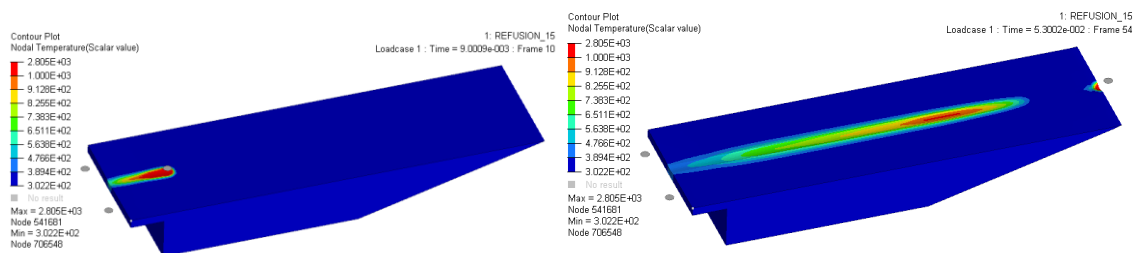


Ilustración 32. Detalle problemas interfaz foco-demostrador.

Se asignan los valores de 75, 100 y 200 mm/s para las velocidades de los focos de acuerdo al ensayo experimental, la temperatura inicial del proceso (303K) y se desprecia el efecto de la convección dado que se establece vacío en el interior de la cámara durante la experimentación.

GENERALITAT
VALENCIANATOTS
A UNA
veu


INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL



UNIÓN EUROPEA
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"

Informe resumen de resultados

Con respecto al foco se realizan distintas pruebas variando la temperatura, coeficiente de transmisión de la interfaz, forma del foco o distribución de la temperatura del foco en la superficie.

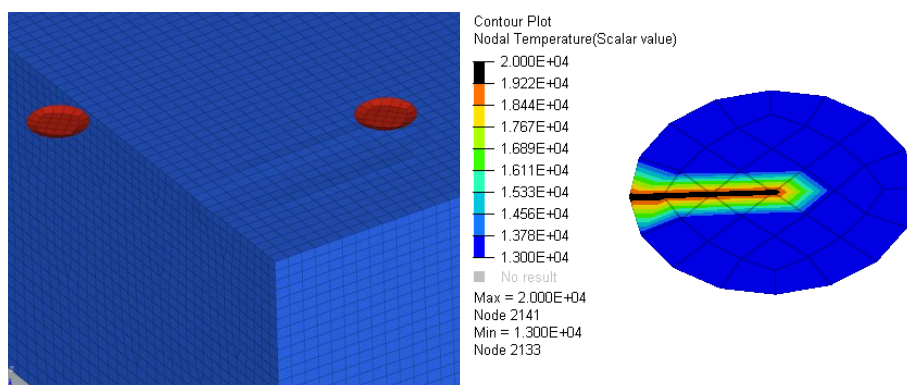


Ilustración 33. Detalle variación focos.

Se analizan las temperaturas que se obtienen en la simulación para controlar que dimensiones se tienen para el rango de temperaturas delimitado por la temperatura de fusión y la temperatura de ebullición en el caso del cobre (2835-1357 K). Además se verifica que las zonas donde se supera la temperatura de ebullición sean las zonas donde se reduce la cantidad de material.

La visualización de los resultados se puede adaptar a dicho rango permitiendo detectar dichas zonas de forma más sencilla y mostrar los máximos alcanzados durante el proceso. En el ejemplo siguiente las zonas en gris están por debajo de la temperatura de fusión y las zonas en negro por encima de la temperatura de ebullición.

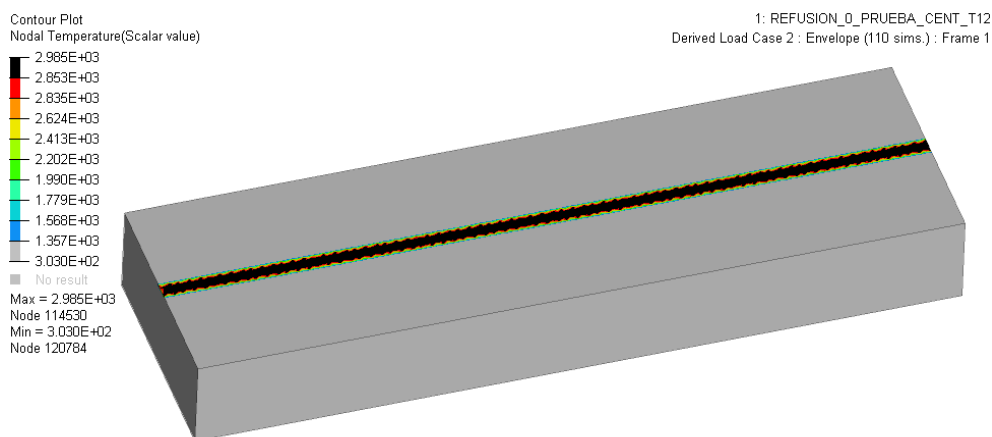


Ilustración 34. Resultado con ajuste del rango de fusión.

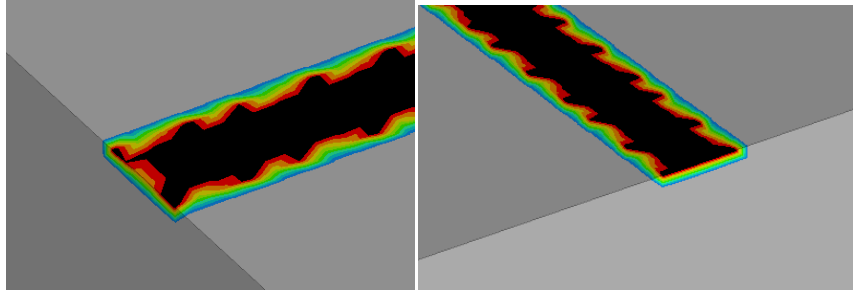


Ilustración 35. Detalle extremos de la probeta.

Otros de los aspectos clave del estudio es analizar las entradas y salidas del haz de electrones en los demostradores o la forma del avance de temperaturas del foco. Todo esto sirve tanto para el ajuste como para correlacionar los resultados de la refusión.

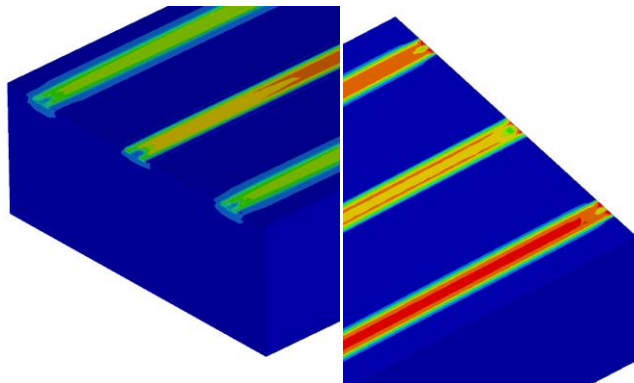


Ilustración 36. Detalle entrada/salida haz de electrones.

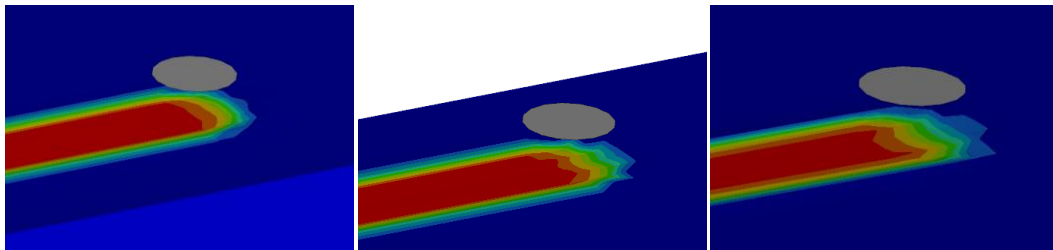


Ilustración 37. Detalle forma de avance.

En relación a esto se varían los parámetros comentados anteriormente para obtener un ajuste acorde a los resultados experimentales obtenidos. A continuación se muestran algunas de las pruebas realizadas para el ajuste.

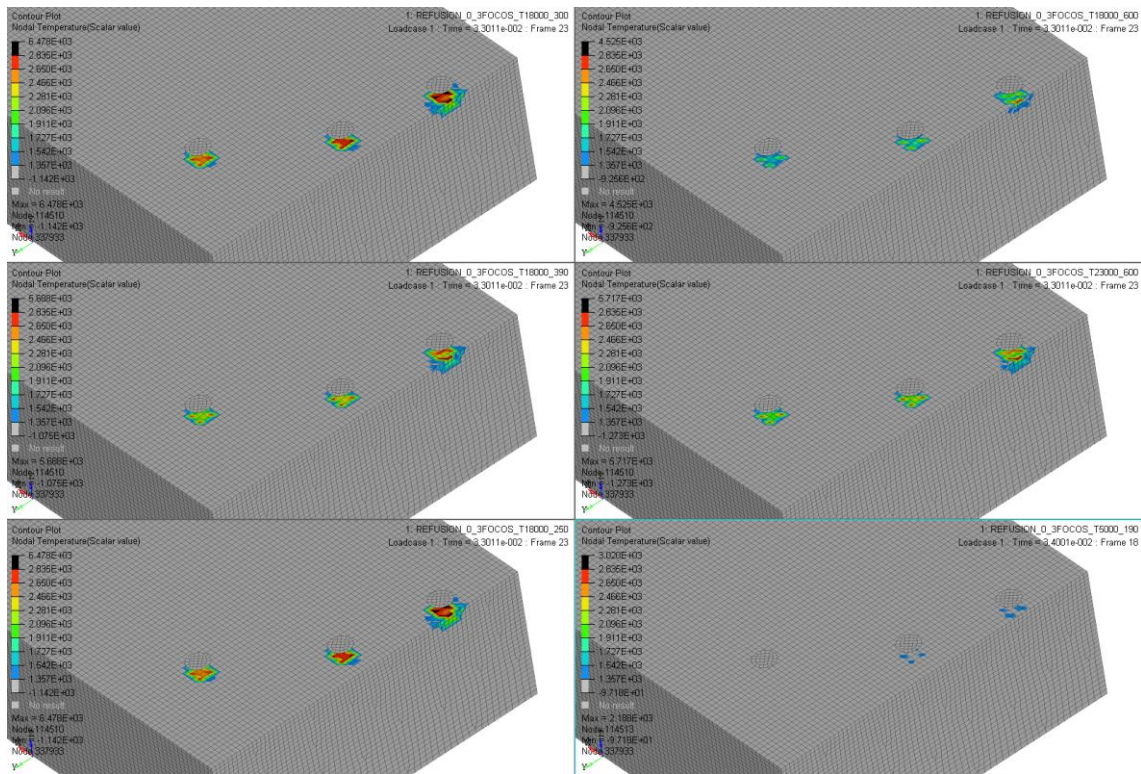


Ilustración 38. Pruebas de ajuste del modelo de simulación.

Finalmente, tras ajustar el modelo de simulación variando los parámetros referentes al foco y a las propiedades térmicas del material se realiza el cálculo de las probetas consideradas más representativas a partir del ensayo experimental:

- Refusión 0º

Contour Plot
Nodal Temperature(Scalar value)

5.096E+03
2.835E+03
2.650E+03
2.466E+03
2.281E+03
2.096E+03
1.911E+03
1.727E+03
1.542E+03
1.357E+03
4.718E+02
No result

Max = 5.096E+03
Node 349130
Min = 4.718E+02
Node 411928

1: REFUSION_0_3FG_T13000_600_TC20000
Derived Load Case 2 : Envelope (480 sims.) : Frame 1

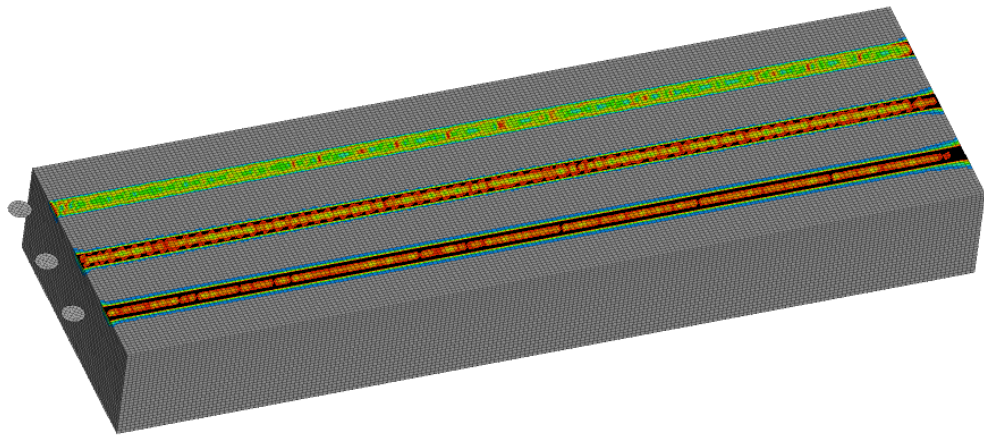


Ilustración 39. Resultado simulación 0º.

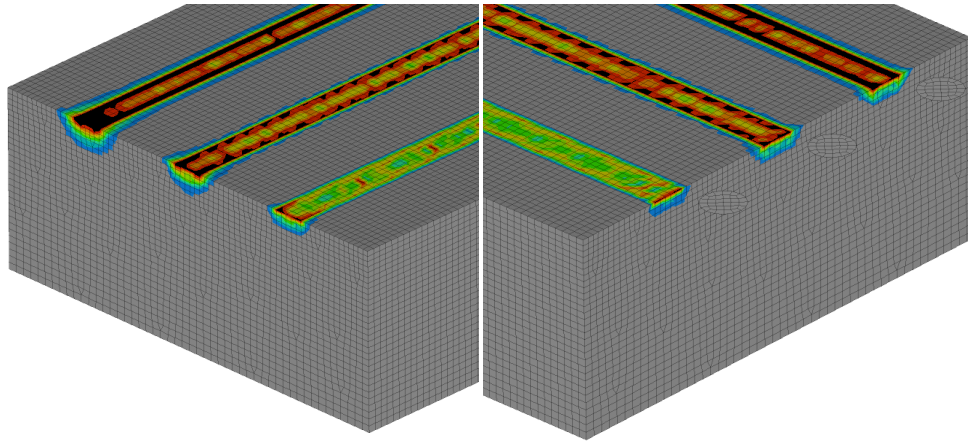


Ilustración 40. Zona entrada y zona salida probeta 0º.



GENERALITAT
VALENCIANA

TOTS
A UNA
veu

iVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL

 **UNIÓN EUROPEA**
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunidad Valenciana 2014 - 2020"

- Refusión 15º

Contour Plot
Nodal Temperature(Scalar value)

1.083E+04
2.835E+03
2.650E+03
2.466E+03
2.281E+03
2.096E+03
1.911E+03
1.727E+03
1.542E+03
1.357E+03
5.654E+02
No result

Max = 1.083E+04
Node 569169
Min = 5.654E+02
Node 735787

1: REFUSION_15_3F_600
Derived Load Case 2 : Envelope (481 sims.) : Frame 1

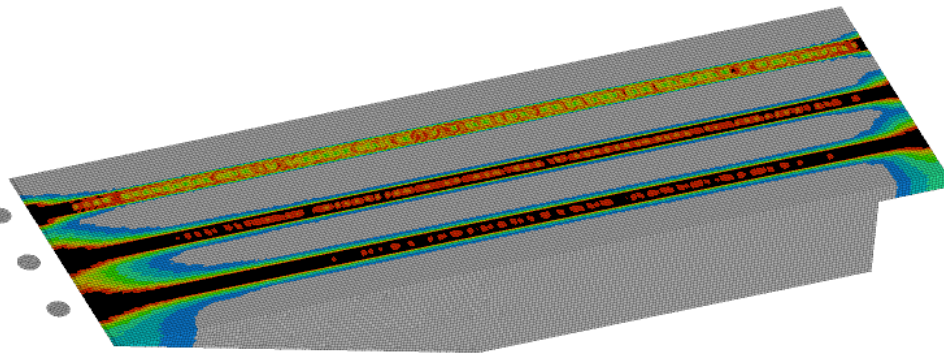


Ilustración 41. Resultado simulación probeta 15º.

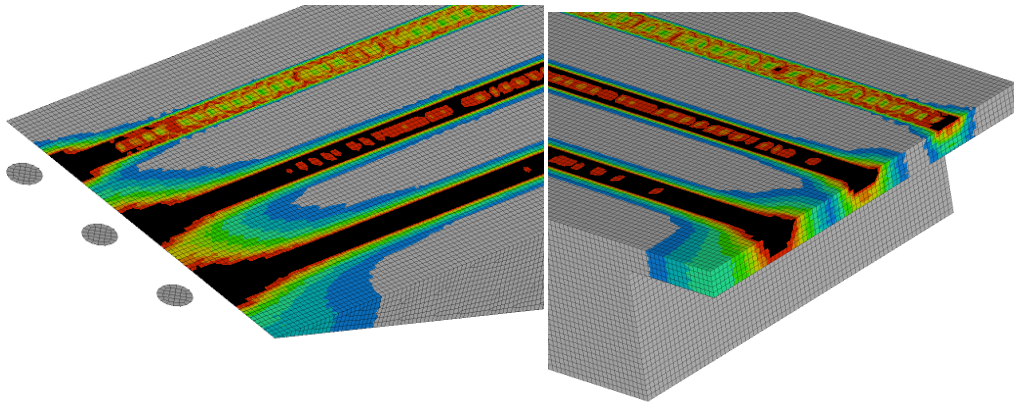


Ilustración 42. Zona entrada y zona salida probeta 15º



GENERALITAT
VALENCIANA

TOTS
A UNA
veu

iVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL

 **UNIÓN EUROPEA**
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"

- Refusión 45º

Contour Plot
Nodal Temperature(Scalar value)

7.011E+03
2.835E+03
2.650E+03
2.466E+03
2.281E+03
2.096E+03
1.911E+03
1.727E+03
1.542E+03
1.357E+03
5.331E+02

No result
Max = 7.011E+03
Node 626007
Min = 5.331E+02
Node 875335

1: REFUSION_0_3FG_600
Derived Load Case 2 : Envelope (480 sims.) : Frame 1

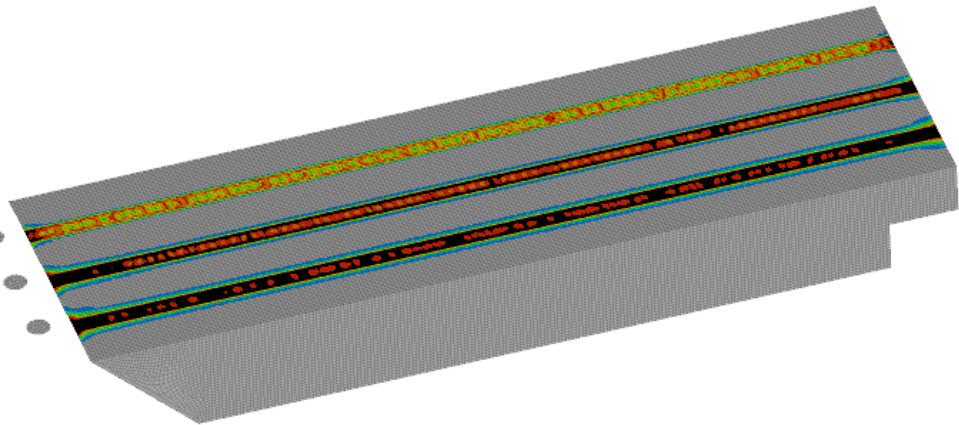


Ilustración 43. Resultado simulación probeta 45º

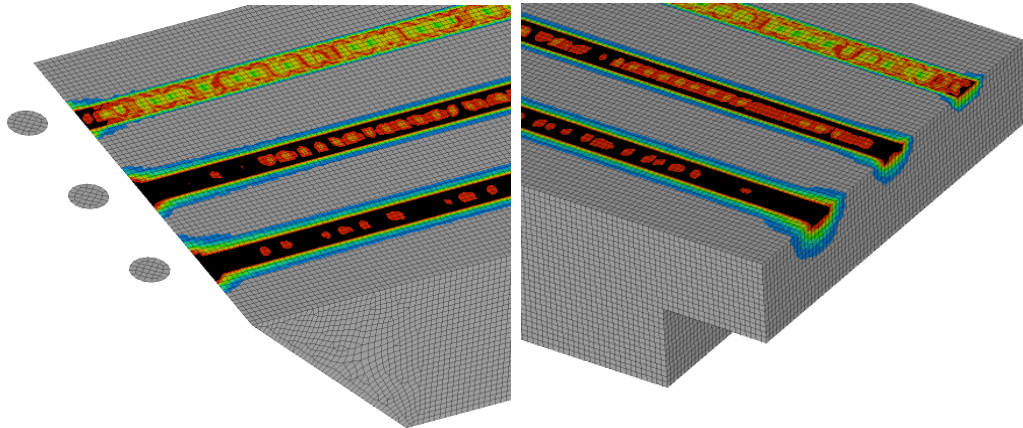


Ilustración 44. Zona entrada y zona salida probeta 45º



GENERALITAT
VALENCIANA

TOTS
A UNA
veu

iVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL

 **UNIÓN EUROPEA**
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"

Tarea 2.3 Comparativa de los resultados.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos mediante simulación y se comparan con los obtenidos en los ensayos experimentales incluidos en el PT1.

Zona entrada-Planos inclinados						
Line Energy (J/mm)	Probeta 90		Probeta 45		Probeta 15	
	Ancho charco fusión central (micras)	Simulación (micras)	Ancho charco fusión central (micras)	Simulación (micras)	Ancho charco fusión central (micras)	Simulación (micras)
10,5	1352,6	1400	1310,1	1400	1512,7	3000
21	1335,05	1400	1418,17	2200	1574,71	-
36	1876,16	1800	2034,79	2200	2080,74	-

Zona central-Planos inclinados						
Line Energy (J/mm)	Probeta 90		Probeta 45		Probeta 15	
	Ancho charco fusión central (micras)	Simulación (micras)	Ancho charco fusión central (micras)	Simulación (micras)	Ancho charco fusión central (micras)	Simulación (micras)
10,5	1353,53	1400	1277,7	1400	1273,61	1400
21	1335,97	1500	1312,87	1800	1333,2	1800
36	1888,38	1800	1888,65	2000	1913,05	2200

Zona central-Planos inclinados						
Line Energy (J/mm)	Probeta 90		Probeta 45		Probeta 15	
	Ancho charco fusión central (micras)	Simulación (micras)	Ancho charco fusión central (micras)	Simulación (micras)	Ancho charco fusión central (micras)	Simulación (micras)
10,5	1327,65	1400	1329,5	1400	1390,02	-
21	1375,7	1400	1379,39	1800	1529,06	-
36	1904,19	1800	1920,16	2200	1913,05	-

De los resultados se puede observar como los valores para la probeta de 90º se ajustan mejor para las tres medidas consideradas de entrada, central y salida.



Los valores extremos para la probeta de 15º no se correlacionan bien dado que existe una sublimación muy acusada y las medidas de la simulación son desproporcionadas con la realidad. Esto puede ser debido a que el material necesita más energía para el cambio de fase y además el material líquido se desliza por la pared vertical.

En las zonas centrales de las tres probetas el ajuste es bastante bueno pero se observa como en la simulación aumenta al disminuir el volumen de la probeta mientras en el experimento se mantiene constante. Posiblemente el efecto de los focos colindantes afecta sobrecalentando la pieza, y esto es más acusado en las probetas con menor material.

En general, el ajuste de la simulación es aceptable dada la utilidad buscada ya que se pretende evitar que exista sublimación de material.

La comparación de los resultados de la simulación del proceso EBM permite extraer las siguientes conclusiones:

- La simulación permite estimar las zonas que entran en fase de fusión y aquellas que se verán afectadas por temperaturas superiores a las de ebullición con un error aceptable.
- El proceso de sublimación en los bordes produce que el material base cambien su geometría y por tanto el efecto del haz de electrones sobre el mismo se modifica disminuyendo la zona afectada por la refusión.
- Las zonas intermedias afectadas se ajustan bastante al proceso dado que la sublimación es menor y continua habiendo material base.

PAQUETE DE TRABAJO 3. ACTIVIDADES DE DEMOSTRACIÓN APLICADO A PIEZAS INDUSTRIALES

En este paquete de trabajo se han realizado las siguientes actividades, todas ellas centradas en demostrar que el control de parámetros es clave para la eliminación de soportes en las tecnologías de fabricación aditiva:

Tarea 3.1. Diseño de casos estudio.

Se han diseñado piezas básicas con diferentes formas, ángulos y espesores. En las siguientes imágenes se muestra la geometría de estas piezas:



**GENERALITAT
VALENCIANA**

**TOTS
A UNA
veu**

iVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL

 **UNIÓN EUROPEA**
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional
Una manera de hacer Europa

"Proyecto cofinanciado por los Fondos FEDER,
dentro del Programa Operativo FEDER
de la Comunitat Valenciana 2014 - 2020"

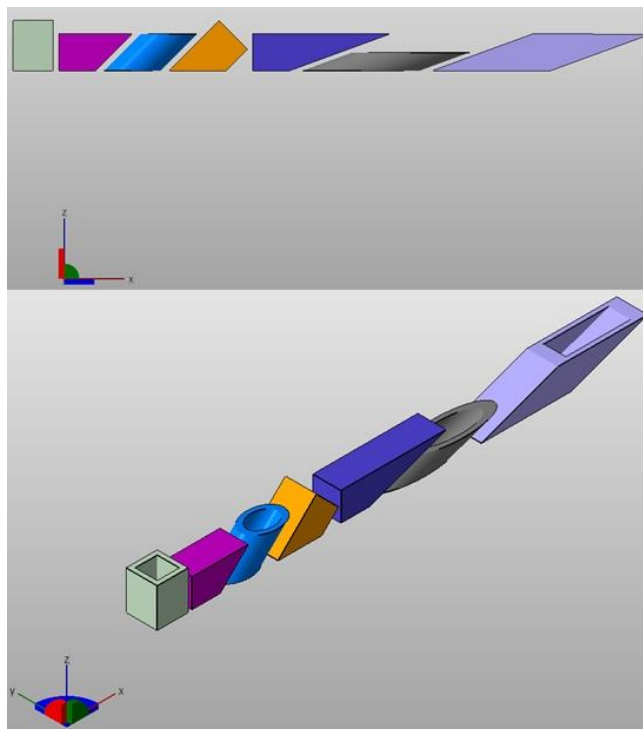


Ilustración 45. Diseño de los casos

Para corroborar la relación que existe entre la geometría de las piezas y los parámetros de proceso, se estableció una experiencia donde se fabricó nueve veces las piezas anteriores pero con parámetros de proceso diferentes.

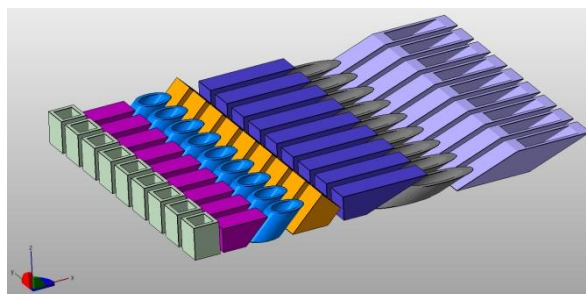


Ilustración 46. Piezas fabricadas con diferentes parámetros

Tarea 3.2. Simulación de los casos estudio y rediseño.

Tras el desarrollo del PT2 se ha comprobado que es posible simular el efecto que tienen los parámetros de proceso en la necesidad o no de tener que incluir soportes para el control de la temperatura. Si la temperatura que alcanza el material es superior a una temperatura límite (temperatura de sublimación) entonces es necesario incluir soportes o reducir la potencia o velocidad para controlar dicha temperatura.

Dada la dificultad de realizar una simulación con geometría no plana, se ha descartado realizar la simulación de las piezas diseñadas en la tarea anterior. Se ha optado por hacer piezas sencillas con parámetros diferentes y corroborar mediante su fabricación que la necesidad de soporte depende del material, la geometría y de los parámetros de proceso seleccionados.

Tarea 3.3. Fabricación, evaluación de resultados y validación.

Tras el diseño desarrollado en la tarea 3.1, se ha asignado a cada grupo de piezas los parámetros correspondientes para su fabricación:



Ilustración 47. Piezas fabricadas con diferentes parámetros de fabricación

En función de los parámetros de proceso, para una misma geometría se obtienen piezas correctas y piezas con defectos, los defectos se producen por una falta de material (soporte) para evacuar el calor durante el proceso de fusión y por lo tanto sería necesario incluir soportes.



Ilustración 48. Detalle de los resultados

Como se observa en la anterior figura las piezas correctas se han obtenido con los parámetros de proceso utilizados en las piezas de la zona 2, 3, 4 y 5. Viendo con detalle las piezas las piezas de la línea 2 y 5 son las mejores.

Con el desarrollo del proyecto se ha demostrado que si se implementara en las máquinas de fabricación aditiva un mayor control de los parámetros de proceso por cada capa sería posible reducir e incluso eliminar los soportes tal y como se muestra en la siguiente imagen.

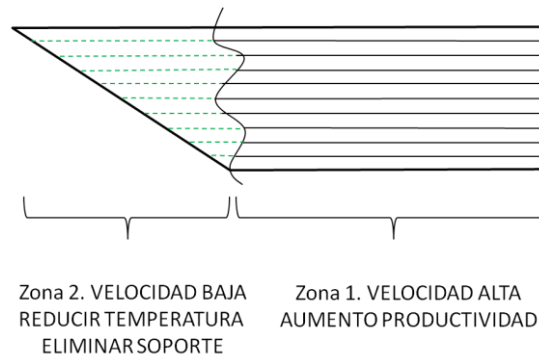


Ilustración 49. Control de los parámetros de proceso por capa

De este modo sería posible dividir el procesado de una pieza con varios tipos de parámetros:

1. Donde no hay problemas de evacuación de calor, zona central de cada capa y con material continuo en capas anteriores, se incluirían parámetros de procesado que permitirían un aumento de la productividad, **a nivel experimental y con probetas se ha podido comprobar que es posible aumentar una variable como la función de velocidad (speed function) de 20 a 35 lo que supone un aumento en velocidad del 175% respecto a los valores estándar de velocidad.**
2. Donde hay problemas de evacuación de calor como consecuencia de la geometría de la pieza, se modificarían los parámetros para aumentar la velocidad o reducir la potencia con el objetivo de minimizar los soportes o eliminarlos. **Experimentalmente en el proyecto se ha podido comprobar que aumentando las aceleraciones del haz de electrones en las zonas finales de cada trayectoria se consigue aportar menor energía en los bordes de las capas lo cual influye muy positivamente en la no aparición de fenómenos de abultamientos por exceso de temperatura**, con ello, se han podido fabricar adecuadamente y sin soportes muestras de 45º totalmente macizas sin defectos lo cual supone la condición más severa de necesidad de disipación, este resultado se ha obtenido gracias al aumento de la velocidad en las zonas finales de las trayectorias de fusión en cada capa. Las condiciones de procesado aseguran que es posible fabricar cualquier geometría sin soportes en ángulos superiores a 45º sin obtener defectos de fabricación.