



EVALUACIÓN DE LA SOBREACUMULACIÓN DE MATERIAL EN LOS CAMBIOS DE DIRECCIÓN DURANTE EL PROCESO DE APORTE POR LÁSER MEDIANTE UN MODELO INTEGRAL

JON IÑAKI ARRIZUBIETA, JOSE EXEQUIEL RUIZ, MAGDALENA CORTINA,
ENEKO UKAR,AITZOL LAMIKIZ

Universidad del País Vasco (UPV/EHU)

Departamento de Ingeniería Mecánica

Plaza Torres Quevedo, 1 - 48013 Bilbao, Bizkaia, España

(Recibido 30 de marzo de 2018, para publicación 15 de julio de 2018)

Resumen – El modelado del proceso de aporte es una herramienta muy útil en la determinación de las condiciones y estrategias de aporte óptimas, reduciendo la parte experimental necesaria para la puesta a punto del proceso, así como la realización de ensayos prueba-error. Pese a que el aporte de líneas rectas y su superposición no presenta gran dificultad, la necesidad de generar geometrías complejas requiere del empleo de estrategias complicadas que implican la interpolación simultánea de los ejes de la máquina que controla la cinemática del proceso de aporte. Como consecuencia de ello, la velocidad de avance real en la zona de aporte puede diferir de la programada y la geometría del cordón generado será diferente a la esperada. Es por ello que se hace necesario el poder modelar la influencia que tiene esta variación de velocidad en la estabilidad del proceso de aporte y, por consiguiente, en la geometría de la pieza resultante. Con el objetivo de afrontar este reto, en el presente trabajo se ha desarrollado un modelo integral del proceso de aporte que permite determinar la influencia que tiene la cinemática de la máquina en la geometría de la pieza resultante. Asimismo, la metodología propuesta tiene en cuenta el modelado del flujo de partículas dentro de la boquilla de aporte, el calentamiento de las partículas por la interacción con el haz láser, la generación de un baño fundido, así como la inyección del material en forma de polvo y su posterior solidificación.

Palabras clave – Láser, aporte, modelización.

1. INTRODUCCIÓN

El aporte por láser es un proceso aditivo que se emplea mayoritariamente para la generación de piezas nuevas o el recubrimiento de piezas ya existentes. Aunque existen diversas alternativas dentro de la tecnología de aporte por láser, en el presente trabajo se referirá siempre al aporte directo o LMD (*Laser Metal Deposition*).

En el aporte por láser, gracias al empleo de un haz láser como fuente de calor, es posible añadir material sobre un sustrato con mínimas distorsiones geométricas y zona afectada térmicamente [1]. Esto ha contribuido a una creciente aceptación del LMD entre los distintos sectores industriales como el aeronáutico, molde y matriz, naval, etc. [2]

No obstante, la calidad del aporte por láser es muy sensible a los parámetros del proceso, y es muy típico encontrar defectos dentro del material aportado que pueden llevar a que la pieza generada o reparada no sea válida para su uso [3]. Habitualmente, la determinación de los parámetros de aporte suele ser un proceso basado en experiencia previa y ensayos prueba-error. Dichos ensayos pueden ser muy tediosos y consumir mucho tiempo, lo que al final se traduce en un gran coste económico [4]. Con el objetivo de mejorar este aspecto negativo del aporte por láser, diversos investigadores han presentado modelos que permiten optimizar el proceso de aporte sin recurrir a ensayos experimentales [5].

Pinkerton realizó un análisis en profundidad de los últimos avances realizados dentro de la modelización del campo del aporte por láser [6]. Tras el análisis de los diversos modelos existentes en la actualidad, Pinkerton concluyó que el aporte por láser es un proceso muy complejo, cuyo análisis se realiza normalmente dividiendo el proceso en distintos sub-procesos, cada cual es modelado independientemente.

Autores como Li *et al.* han desarrollado un modelo multiescala capaz de calcular el campo térmico, añadir material y calcular las tensiones residuales resultantes del proceso de aporte [7]. No obstante, la gran mayoría de los modelos que se emplean para simular el proceso de aporte por láser suelen tener asociado un coste computacional desorbitado o una elevada cantidad de suposiciones que hacen inviable su empleo industrial.

Con el objetivo de ir un paso más adelante, se han desarrollado modelos complejos que tienen en cuenta fenómenos dinámicos del material fundido bajo el haz láser [8]. No obstante, se ha visto que, para las condiciones habituales del aporte por láser, el proceso de solidificación es tan rápido que el movimiento del material se puede despreciar sin introducir un error elevado en el modelo. Esto se traduce en un ahorro considerable del coste computacional y del tiempo necesario para realizar la simulación.

En vista de todo ello, se ha desarrollado un modelo numérico integral capaz de predecir la geometría del cordón aportado mediante LMD. Este modelo calcula las trayectorias de las partículas a la salida de la boquilla y su distribución en el plano de trabajo. Asimismo, resuelve las ecuaciones de transferencia de calor en el substrato y permite calcular la geometría resultante del cordón en base al material que se aporta. Para la validación del modelo, se han llevado a cabo unos ensayos experimentales en forma de "L" en los que se genera una sobreacumulación del material en el cambio de dirección y los resultados obtenidos se han comparado con los proporcionados por el modelo.

2. MATERIALES Y MÉTODO EMPLEADOS

La estabilidad del proceso de aporte es de gran importancia a la hora de conseguir una altura de capa uniforme en el aporte por láser. No obstante, cuando se requiere seguir trayectorias irregulares, la cinemática de la máquina obliga a reducir la velocidad relativa entre la boquilla y el substrato. Como consecuencia de ello, se produce un incremento de la cantidad de calor y material aportados por unidad de longitud.

Con el objetivo de cuantificar este fenómeno, se han llevado a cabo unos ensayos en forma de "L" en los cuales se ha medido la sobreacumulación que se produce al cambiar la dirección de aporte. Los ensayos experimentales se han realizado empleando un láser de Fibra Rofin FL010, que tiene una potencia máxima de 1 kW en continuo. Asimismo, el polvo metálico es suministrado a la zona de procesado mediante un alimentador Sulzer Metco Twin 10-C y posteriormente es concentrado hacia el baño fundido generado por el láser mediante una boquilla continua coaxial.

En la Fig. 1 se muestran dos geometrías de forma de "L" generadas experimentalmente, las cuales han sido comparadas con los resultados del modelo. La marcada como "1" ha sido aportada con el sistema de regulación activado (se mantiene constante la cantidad de polvo aportado por unidad de longitud), mientras que la número "2" se ha aportado sin activar dicha regulación (se mantiene constante la cantidad de polvo aportado por unidad de tiempo). Los parámetros del proceso de aporte se detallan en la tabla 1.

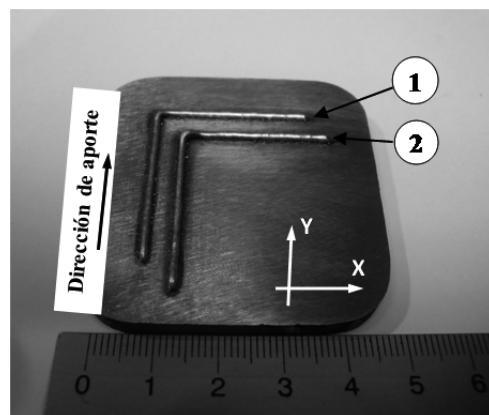


Fig. 1. Fotografía de la pieza test, donde el ensayo 1 es con caudal de polvo constante por unidad de longitud y el ensayo 2 con caudal de polvo constante por unidad de tiempo.

Tabla 1. Parámetros de aporte empleados en los ensayos.

Parámetro	Valor
Potencia del láser [W]	500
Velocidad de avance [mm·min ⁻¹]	500
Radio del haz láser [mm]	0.75
Radio del flujo de polvo en el plano focal [mm]	1.75
Tasa de aporte [g·min ⁻¹]	2

Tabla 2. Composición química del AISI 304 [ASM, 2017].

Componente	C	Cr	Fe	Mn	Ni	P	S	Si
Wt [%]	≤ 0.08	18 – 20	balance	≤ 2	8 - 10.5	≤ 0.045	≤ 0.03	≤ 1

Tabla 3. Propiedades del AISI 304 [96].

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidades
Densidad	ρ	7200	[kg·m ⁻³]
Energía específica (20°C)	c	760	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
Temperatura sólidos	T _{solidus}	1697	[K]
Temperatura líquidos	T _{líquidos}	1727	[K]
Calor latente de fusión	L	$6.0 \cdot 10^4$	[J·kg ⁻¹]
Conductividad	k	$16.2 + 0.013 \cdot (T-293)$	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Absorptividad del material	α	0.3	[-]
Emisividad del material	ϵ	0.3	[-]
Coeficiente de convección	h	20	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]

Para la validación del modelo, se ha empleado el acero inoxidable AISI 304 como substrato y material de aporte. La composición del AISI 304 se detalla en la tabla 2, mientras que las propiedades termomecánicas se indican en la tabla 3.

3. BASES DEL MODELO DESARROLLADO

En este tercer apartado se detallan las bases del modelo numérico desarrollado. Toda la programación se ha realizado íntegramente empleando Matlab, ya que, al resolver las ecuaciones de forma matricial, se reduce considerablemente el coste computacional requerido y permite obtener resultados en un tiempo razonable.

3.1. Simplificaciones adoptadas

Con el objetivo de reducir el coste computacional del modelo, se han realizado las siguientes hipótesis y simplificaciones matemáticas:

- El material se considera homogéneo, continuo e isótropo.
- Las variaciones del volumen como consecuencia de las variaciones de la temperatura son despreciables.
- Se han omitido los fenómenos fluido-dinámicos que se producen dentro del baño fundido. Por lo tanto, no se ha considerado el movimiento del material dentro del baño fundido.
- La conductividad de cada elemento varía linealmente respecto a su temperatura.

3.2. Desarrollo matemático

El desarrollo numérico se basa en la resolución de la ecuación general de conducción (1), lo que permite la determinación del campo térmico en el substrato. Dicha ecuación es una ecuación diferencial de segundo orden que debe ser integrada. Durante el proceso de integración aparecen dos constantes que son determinadas mediante las condiciones iniciales y de contorno.

$$a \cdot \nabla^2 T \pm \frac{q_v}{\rho \cdot c} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

En la ecuación (1), el término c es el calor específico [$\text{kJ} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$], q_v es el calor generado por unidad de volumen [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$], k es la conductividad del material [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], ρ es la densidad [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] y a es la difusividad térmica [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], la cual se define mediante la siguiente ecuación (2).

$$a = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad (2)$$

La resolución de las ecuaciones diferenciales de manera analítica es una tarea muy compleja y en muchos casos imposible de conseguir. Es por ello que se ha optado por discretizar el volumen de la pieza y resolver la ecuación de transferencia de calor mediante diferencias finitas centrales. Se ha empleado una formulación explícita, la cual es estable siempre que se cumpla el criterio de convergencia determinado por von Neumann. Este criterio de estabilidad limita el incremento de tiempo máximo para cada paso en base a la ecuación (3). Donde Δx , Δy y Δz representan las dimensiones X , Y y Z , respectivamente, de cada elemento.

$$\Delta t_{\max} = \left[2 \cdot a \cdot \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

3.3. Condiciones iniciales y de contorno

A fin de garantizar una buena resolución de la geometría modelizada, pero sin incrementar en exceso el coste computacional, la pieza real de 50x50x5 mm de tamaño se ha discretizado en elementos cúbicos de 0.2 mm de lado, lo que se traduce en 5 elementos por cada milímetro de longitud. Por otro lado, y pese a que la pieza real tiene los bordes redondeados, en el modelo se ha supuesto un substrato paralelepípedo.

Las condiciones iniciales permiten determinar la temperatura del substrato en el instante inicial de la simulación. Como no se ha realizado precalentamiento alguno previo al aporte, se ha supuesto que la pieza se encuentra a temperatura ambiente, 25°C.

En lo que respecta a las condiciones de contorno, éstas hacen referencia a las variables geométricas. Como en este caso se ha modelado la pieza completa, se ha establecido que no existe transferencia de calor hacia el exterior por conducción (condición de contorno tipo Dirichlet). En la Fig. 2 se muestran las condiciones de contorno empleadas. El haz láser introduce calor en la cara superior de la geometría modelada. Asimismo, en todas las caras del modelo excepto la inferior, se han considerado las pérdidas por radiación y convección.

Como la conductividad del aire es muy inferior a la del substrato, se ha despreciado la conducción en el aire. Además, las pérdidas por radiación y convección se han modelado como sumideros de calor. La ecuación (4) representa estas pérdidas, donde n es el número de caras de cada elemento que están en contacto con el aire.

$$q_{losses} = [h \cdot (T - T_{\infty}) + \varepsilon \cdot \sigma_b \cdot (T^4 - T_{\infty}^4)] \cdot n \quad (4)$$

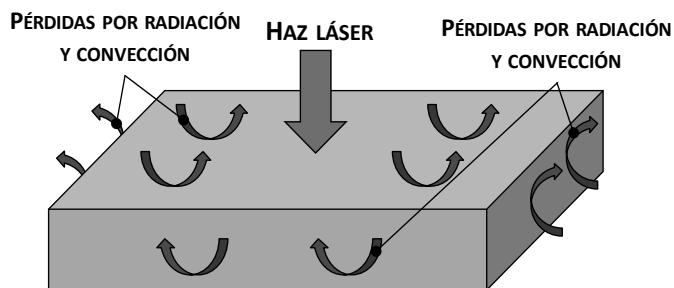


Fig. 2. Condiciones de contorno de la geometría modelizada.

El haz láser se ha modelado como una fuente de calor, donde la energía del mismo tiene una distribución Gaussiana de radio r_l . La densidad de energía que se introduce en cada elemento se calcula mediante la ecuación (5), donde P_{real} es la potencia del haz láser, α es la absorbtividad del material y x_0 e y_0 son la distancia planar entre un elemento determinado y el centro del haz láser.

$$q_{laser} = \frac{2 \cdot \alpha \cdot P_{real}}{\pi \cdot r_l^2} \cdot e^{-2 \cdot \left(\frac{x^2 + y^2}{r_l^2} \right)} \quad (5)$$

3.4. Aporte de material

En el proceso de aporte por láser, el material es inyectado a través de una boquilla en el baño fundido generado por el haz láser. Es por ello que el modelo calcula cuánto material se adhiere al substrato para cada incremento de tiempo Δt . Tras un análisis mediante elementos CFD de la boquilla, se ha determinado que el flujo de polvo tiene una distribución gaussiana de radio 1.75 mm en el plano de trabajo (dicho plano de trabajo se sitúa a 15 mm respecto a la salida de la boquilla). Se ha impuesto la condición de que todas las partículas que caigan dentro del baño fundido se adhieren al substrato, mientras que todas las que caigan fuera, rebotan y se pierden.

El porcentaje de cada elemento llenado en un incremento de tiempo Δt se determina mediante la ecuación (6), donde r_p es el radio de la distribución gaussiana del flujo de partículas y \dot{m} es el flujo másico de polvo por unidad de tiempo.

$$\%_{llenado} = \frac{2 \cdot \dot{m} \cdot \Delta t}{\rho \cdot \Delta z \cdot \pi \cdot r_p^2} \cdot e^{-2 \cdot \left(\frac{x_0^2 + y_0^2}{r_p^2} \right)} \quad (6)$$

Cuando un elemento determinado alcanza un nivel de llenado del 100%, esto significa que está completamente lleno, por lo que el modelo comienza a llenar automáticamente el elemento superior al mismo. Todos aquellos elementos llenos se comportan como substrato para los siguientes instantes de tiempo de la simulación.

4. SISTEMA PARA EL CONTROL DEL FLUJO DE POLVO

La estabilidad del proceso de aporte es un aspecto crítico en el aporte, especialmente cuando se generan geometrías complejas. Es por ello que el modelo debe ser compatible con el empleo de sistemas que permitan por ejemplo un control instantáneo del flujo de partículas de polvo que se inyectan al baño fundido [10]. Con este objetivo, se ha repetido la misma simulación para una situación en la cual no se emplea ningún control del flujo de partículas y para el caso en el que se emplea.

4.1. Bases del sistema desarrollado

El sistema desarrollado para el control del flujo de partículas se basa en el empleo de una electroválvula 5/2 aguas arriba de la boquilla. La posición de apertura de la electroválvula se controla actuando sobre el mismo en avance en base a la velocidad real de la máquina de aporte. En la Fig. 3 se muestra el esquema de funcionamiento del sistema.

4.2. Mejora de la altura de capa conseguido

Gracias al control del flujo de polvo, se consigue un proceso de aporte más estable y se reduce la sobreacumulación de material como consecuencia de una velocidad real inferior a la programada. Con el objetivo de cuantificar la mejora que se consigue con este control del flujo de polvo, se ha empleado este sistema en los ensayos experimentales realizados para validar el modelo. En la zona de cambio de dirección se ha conseguido una reducción de la sobreacumulación del 46% con respecto a la situación en la que no se emplea control alguno. Asimismo, prácticamente se ha conseguido eliminar la sobreacumulación de material al inicio del cordón.

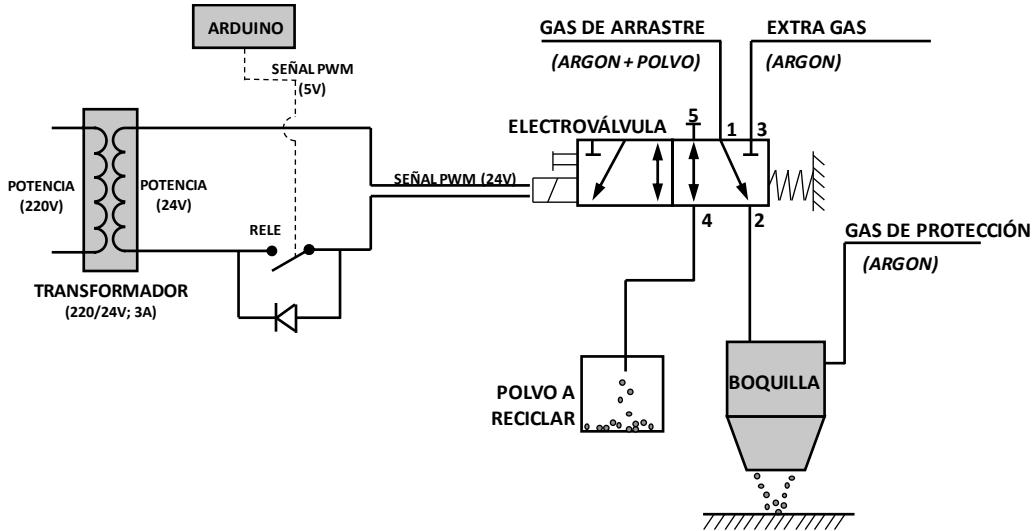


Fig. 3. Diagrama del control del flujo de polvo empleado.

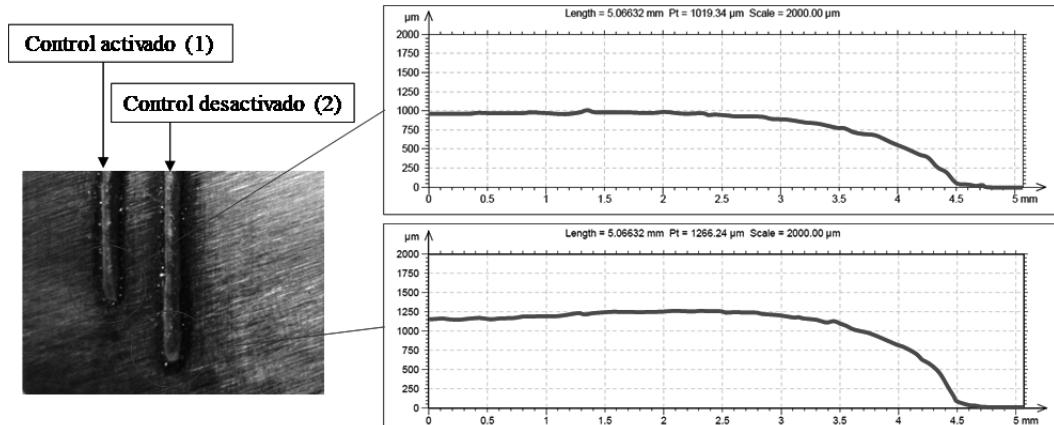


Fig. 4. Análisis de la sobreacumulación al inicio del cordón, para los casos en los que se emplea control del flujo de polvo (marcado como (1) en la Fig. 1) o no se emplea (marcado como (2) en la Fig. 1).

5. RESULTADOS OBTENIDOS

En un primer paso, se ha modelado el proceso de aporte para cuando no se emplea control alguno. En la Fig. 5 se muestra la geometría resultante en el instante correspondiente a 5.7 s desde el comienzo del proceso de aporte. En la parte recta del cordón se ha medido una altura de 0.1 mm, mientras que en la zona de cambio de dirección se ha medido una altura de 0.192 mm.

En la Fig. 6 se muestran la geometría y el campo térmico durante el aporte de la tercera capa. Tal y como puede apreciarse, la sobreacumulación de material que se produce en el cambio de dirección se va incrementando con cada pasada.

Para el análisis de la geometría resultante tras los ensayos experimentales, se ha empleado el microscopio confocal Leica DCM3D. Este microscopio permite obtener la topografía del material aportado, así como medir las dimensiones del mismo. En la Fig. 7a se muestra el microscopio empleado, el cual está situado sobre un colchón de aire que lo aísla de las vibraciones del entorno. En la Fig. 7b se muestra la topografía del material aportado en la sección recta. En la Fig. 7c se han comparado las secciones transversales del material aportado experimentalmente y numéricamente, y como puede apreciarse, se han alcanzado unas alturas totales muy similares, 1.006 mm y 1.094 mm respectivamente.

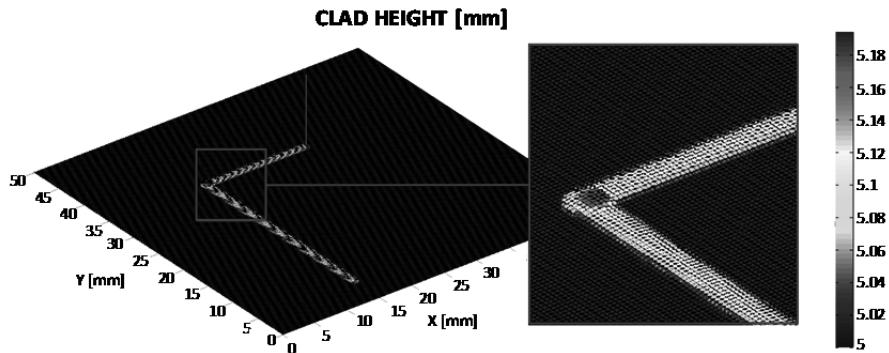


Fig. 5. Geometría del material aportado durante la generación de la primera capa, después de 5.7 segundos de iniciar el proceso de aporte.

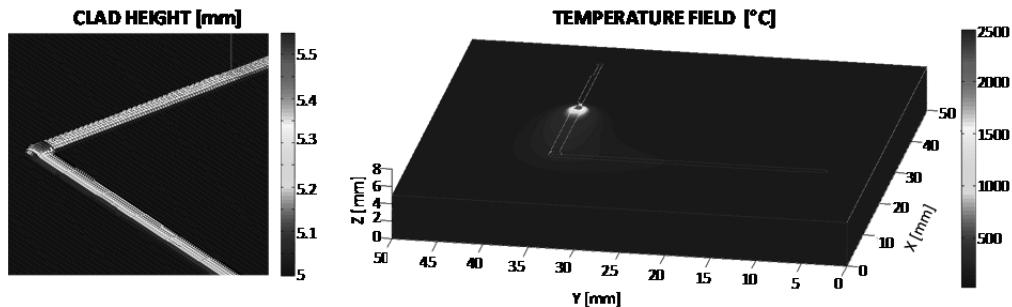


Fig. 6. Geometría (izquierda) y campo térmico (derecha) durante el aporte de la tercera capa. Las imágenes han sido tomadas al de 5.7 s dese el inicio de la tercera capa.

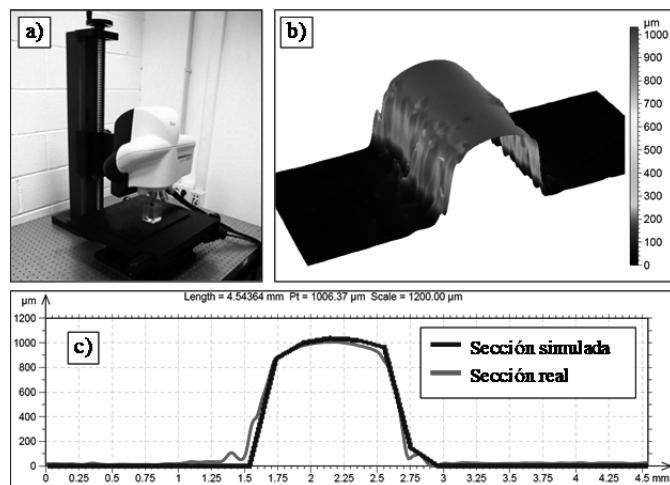


Fig. 7. a) Microscopio Leica DCM 3D; b) topografía del material aportado en la zona recta; c) comparación entre las secciones real y modelizada del material aportado.

En la esquina, la dirección de aporte cambia 90° con respecto a la dirección de aporte inicial. Por lo tanto, debido a la variación de la velocidad de avance, la tasa de aporte de material es mayor que en la zona recta, lo que se traduce como una altura de cordón mayor. Por un lado, el modelo simula una altura total de 1.628 mm, mientras que experimentalmente se ha medido una altura de 1.651 mm.

Posteriormente, se han realizado los mismos ensayos, pero activando el control del flujo de polvo. Gracias al mismo, la sobreacumulación de material en la zona de cambio de dirección es menor. En este caso, el modelo predice una altura total de 1.358 mm, mientras que experimentalmente se ha medido una altura de 1.352 mm. Las topografías de las geometrías reales y modelizadas, tanto cuando se ha activado el control del flujo de partículas, como cuando no se ha empleado control alguno, se muestran en Fig. 8.

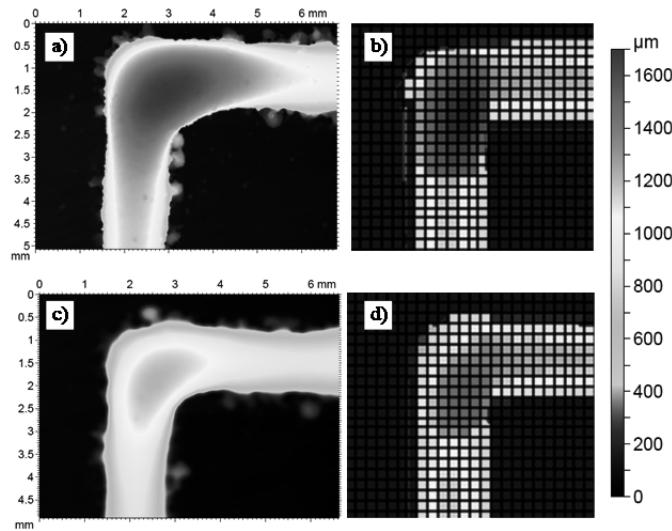


Fig. 8. Topografías de los cambios de dirección; a) Pieza real sin control de flujo; b) Pieza modelizada sin control de flujo; c) Pieza real con control de flujo; d) Pieza modelizada con control de flujo.

Tabla 4. Comparación entre las dimensiones reales y modelizadas en los ensayos de cambio de dirección.

Dimensión	Real [mm]	Modelo [mm]	Error [%]
Altura	1.006	1.036	2.982
Anchura	1.250	1.300	4.000
Altura en la esquina (sin control)	1.651	1.637	-0.848
Altura inicial (sin control)	1.266	1.227	-3.081
Altura en la esquina (con control)	1.352	1.358	0.444
Altura inicial (sin control)	1.019	1.051	3.140

Tal y como puede verse en la tabla 4, se ha obtenido una buena correlación entre los ensayos experimentales y los resultados de la modelización. El valor del error se define mediante la ecuación (7).

$$Error(\%) = \frac{Simulation - Real}{Real} \cdot 100 \quad (7)$$

Finalmente, en la Fig. 9 se muestra una vista 3D de la pieza modelizada, a la vez que una fotografía de la pieza real. Se ha obtenido una buena correlación entre ambas.

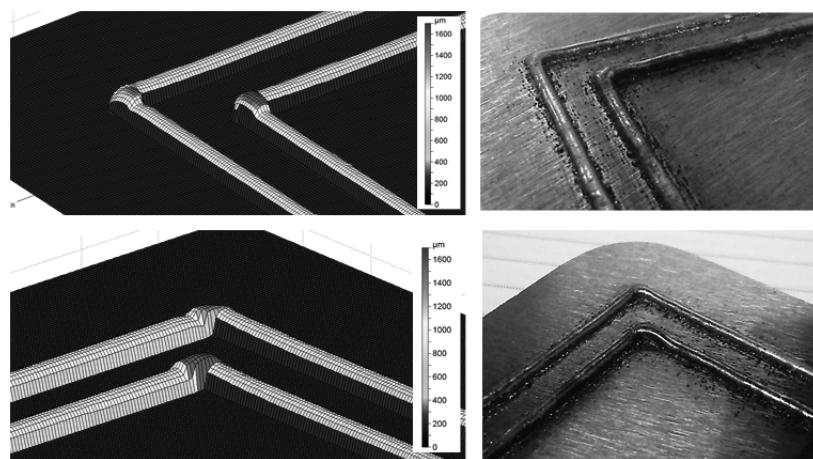


Fig. 9. Comparación entre los resultados del modelo y experimentales.

6. CONCLUSIONES

Tras la realización del presente trabajo de investigación, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Por un lado, se ha validado un modelo tridimensional que modela el campo térmico generado por un haz láser en el substrato y el aporte de material.
- Se ha visto que los cambios de dirección son problemáticos en el proceso de aporte, ya que en ellos se genera sobreacumulación de material. No obstante, el modelo ha resultado una herramienta útil a la hora de predecir y cuantificar las variaciones en altura resultantes.
- El tamaño de la pieza a modelar es un factor crítico, ya que un mayor número de elementos conlleva un incremento del coste computacional. En base a distintas simulaciones, se ha determinado que para un tamaño de elemento de 0.2 mm el volumen máximo que se puede modelar es de 100x100x10 mm, o lo que es lo mismo, 12.5 millones de elementos.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación se ha llevado a cabo dentro del marco del proyecto H2020-FoF13-2016 PARADDISE (Nº de contrato No.: 723440).

REFERENCIAS

- [1] Toyserkani, E. *et al.*, *Laser Cladding*, CRC Press LLC (2005)
- [2] Appleyard, D., “Powering up on power technology”, *Metal Powder Rep.*, **70**, 285-289 (2015)
- [3] Cortina, M. *et al.*, “Analysis of the Influence of the Use of Cutting Fluid in Hybrid Processes of Machining and Laser Metal Deposition (LMD)”, *Coatings*, **8**, 61 (2018)
- [4] El Cheikh, H. *et al.*, “Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process”, *Optics and Lasers in Engineering*, **50**, 413-422 (2012)
- [5] Thompson, S.M. *et al.*, “An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics”, *Additive Manufacturing*, **8**, 36-62 (2015)
- [6] Pinkerton, A.J., “Advances in the modeling of laser direct metal deposition”, *J. Laser Appl.*, **27**: S15001 (2015)
- [7] Li, C. *et al.*, “A multiscale modeling approach for fast prediction of part distortion in selective laser melting”, *Journal of Material Processing Technology*, **229**, 703-712 (2016)
- [8] Arrizubieta, J.I. *et al.* “Continuous coaxial nozzle design for LMD based on numerical simulation”, *Phys. Procedia*, **56**, 429-438 (2014)
- [9] Pang, S. *et al.*, “Efficient multiple time scale method for modeling compressible vapor plume dynamics inside transient keyhole during fiber laser welding”, *Opt Laser Technol.*, **77**, 203-214 (2016)
- [10] Arrizubieta, J.I. *et al.* “Instantaneous powder flux regulation system for Laser Metal Deposition”, *Journal of Manufacturing Processes*, **29**, 242-251 (2017)

EVALUATION OF THE MATERIAL OVER-ACCUMULATION IN DIRECTION CHANGES DURING LASER MATERIAL DEPOSITION BY MEANS OF A HOLISTIC MODEL

Abstract – The modeling of the Laser Material Deposition process is a useful tool when determining the process parameter values and optimum strategies, what results in a reduction of the required experimental work as well as the trial-and-error tests. Despite the generation of straight lines and their superposition does not represent much difficulties, the necessity to generate complex geometries requires the usage of complex strategies and this involves the simultaneous interpolation of various axes of the machine. Consequently, the real velocity during the deposition process may differ from the programmed value and the resulting geometry of the clad would be different from that expected. Therefore, it is mandatory to model the influence of the velocity varia-

tion in the process stability, and thus, the resulting geometry of the part. With the aim of solving this issue, in the present research work a holistic model that evaluates the influence of the machine kinematics in the final shape of the clad is developed. Moreover, the proposed methodology considers the particle flow inside the cladding head, the heating of the powder particles due to their interaction with the laser beam, the generation of the melt pool, the addition of the filler material and the following solidification..

Keywords – Laser, Additive manufacturing, Modeling.