

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN 2021

INFORME DEL PROYECTO REF. SV-21-GIJON-1-13

1. Datos del proyecto

Título: Diseño de un cabezal extrusor de alta productividad para la fabricación aditiva de polímeros termoplásticos mediante procesos MEX

Fechas inicial y final del proyecto: 11/10/2021-31/12/2021

Investigador/a Principal: David Blanco Fernández

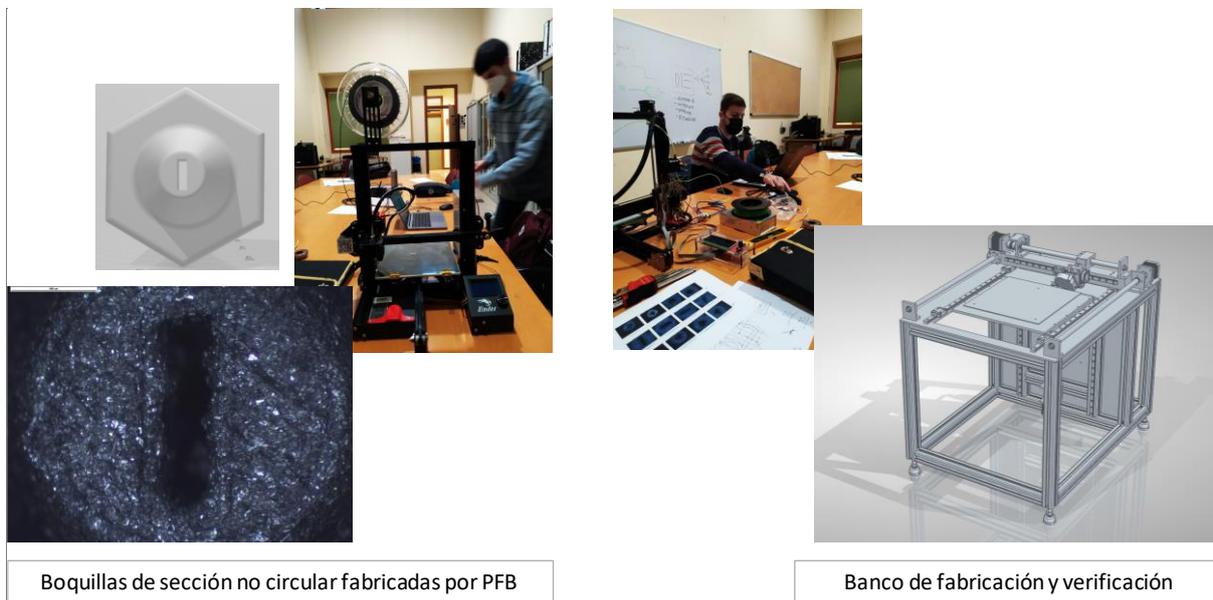
Otros investigadores: Braulio José Álvarez Álvarez, Pedro Fernández Álvarez, Natalia Beltrán Delgado, Fernando Peña Cambón

Personal contratado: Ignacio Díaz Vigil, Jorge Álvarez Patón

Fechas inicial y final de contratación: 11/10/2021-31/12/2021

Empresas o instituciones colaboradoras: LABoral Centro de Arte y Creación Industrial, Idonial Centro Tecnológico

2. Resumen Gráfico



Boquillas de sección no circular fabricadas por PFB

Banco de fabricación y verificación

3. Memoria descriptiva del proyecto

3.1 Resumen ejecutivo

El proyecto titulado: “Diseño de un cabezal extrusor de alta productividad para la fabricación aditiva de polímeros termoplásticos mediante procesos MEX” se inició a mediados de octubre de 2021, con la contratación de D. Ignacio Díaz Vigil y D. Jorge Álvarez Patón. En vista de la reducción del periodo de ejecución respecto de lo previsto en la solicitud, se abordaron dos objetivos principales: la modificación de la geometría del extrusor para lograr una mayor anchura de deposición y el diseño de conjunto de un sistema de fabricación con capacidad de verificación en máquina, capaz de medir la anchura de la deposición real.

El primer objetivo se desarrolló comenzando por un estudio del estado del arte en el campo de las boquillas de extrusión de termoplásticos, del que se derivó la decisión de actuar sobre la geometría de deposición, a través de la modificación de la sección transversal del orificio de la boquilla. Se propusieron cuatro geometrías alternativas para el orificio: rectangular, ovalado, triangular equilátero y triangular isósceles. Se planteó la fabricación de dos lotes de ensayo iguales, con 6 diferentes geometrías cada uno, añadiendo, a las ya comentadas, sendas boquillas de sección circular de diámetros 0.4 mm y 0.8 mm. Con la excepción de la boquilla de 0.4 mm, se adoptó el criterio de que todas ellas presentaran aproximadamente la misma área (0.5 mm²). Las dificultades de fabricación de orificios no cilíndricos de pequeño tamaño llevaron a optar por fabricarlas en acero M300 mediante sinterizado láser selectivo (SLS), uno de los procesos de fusión en cama de polvos con mayor madurez, en las instalaciones de la empresa The Steel Printers. Gracias a la colaboración de Alberto García, del Área de Ingeniería Mecánica, se tomaron imágenes mediante microscopía de las probetas fabricadas para evaluar su exactitud geométrica. La evaluación mostró la dificultad de la fabricación mediante SLS para reproducir ciertas geometrías, como la ovalada y la triangular de tipo equilátero, así como para lograr una buena definición del orificio circular de menor tamaño. En algunas imágenes se aprecia la presencia de estructuras granulares que sobresalen de las paredes internas del orificio, lo que podría dar lugar a problemas en la estabilidad del flujo de material. En cambio, las geometrías rectangulares y triangulares de tipo isósceles presentaban un mejor aspecto. Se completó el mecanizado de las boquillas con la rosca de conexión con el resto del cabezal en las instalaciones del Área de Ingeniería de los procesos de Fabricación y, posteriormente, se integraron en un equipo ENDER para la realización de unas pruebas de deposición. En estas pruebas se trazaron seis trayectorias de deposición de doble capa, tanto horizontales como verticales. La altura de capa empleada fue de 200 μm. Los resultados fueron muy negativos en el caso de las secciones ovaladas, deficientes en el caso del orificio triangular equilátero y positivos en los casos restantes. La calidad de deposición, evaluada mediante la continuidad y estabilidad del perfil exterior de las líneas trazadas, fue óptima en el caso de la deposición mediante sección triangular isósceles. Para la evaluación de estos parámetros se utilizaron imágenes digitales de la deposición, obtenidas mediante escaneado off-line a 2400 ppp. En la actualidad se trabaja en una optimización de los parámetros de deposición del material y del diseño de las boquillas. Esta tarea tendrá continuidad en forma de un trabajo fin de máster a cargo de D. Ignacio Díaz Vigil.

El segundo objetivo fijado consistió en diseñar un sistema capaz de incorporar el digitalizado en el propio equipo de fabricación, a fin de obtener imágenes de la deposición sin un retraso excesivo, y sin el inconveniente de tener que desmontar la cama de cristal sobre la que se realiza la deposición del material. De esta forma, se minimizaría el enfriamiento del material y se evitaría el efecto de contracción volumétrica asociado. En los dos meses y medio transcurridos desde el inicio del proyecto, se ha completado la selección de componentes a nivel electrónico y de control y se han adquirido unidades de todos ellos. A nivel mecánico, el diseño de conjunto está completo, y contempla dos sistemas de desplazamiento independientes para el cabezal de impresión y el de digitalizado. En la actualidad se trabaja en el diseño de

detalle a nivel mecánico, y esta tarea tendrá continuidad en forma de un trabajo fin de máster a cargo de D. Jorge Álvarez Patón.

Todas las taras previstas en la propuesta de proyecto se han completado, toda vez que se ha demostrado la viabilidad del empleo de cabezales de extrusión con una geometría de deposición optimizada. El nivel de desarrollo, no obstante, está lejos de una aplicación comercial, por lo que se han planificado actividades para mejorar los resultados alcanzados durante los próximos meses.

3.2 Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

El objetivo de este proyecto ha sido el desarrollo de un modelo de cabezal para máquinas de fabricación aditiva mediante extrusión de polímeros termoplásticos, que permita un incremento de la productividad del proceso. Este propósito pasaba por pasar de un estado actual de desarrollo tecnológico TRL1 a un nivel de validación a nivel de componentes en laboratorio o TRL4.

Las limitaciones en el periodo de ejecución del proyecto, derivadas del retraso en la contratación de los becarios, han obligado a redefinir el alcance de las tareas, optándose por centrar la investigación en dos objetivos independientes:

- La valoración de alternativas para la sección transversal de la boquilla o nozzle.
- El diseño de un equipo con capacidad de verificación en máquina de la geometría de capa.

Para alcanzar el primer objetivo, se ha realizado un análisis exhaustivo del estado del arte en lo referido a cabezales de extrusión de material. Como parte de este estudio se han analizado las consideraciones geométricas y de proceso a tener en cuenta para el diseño de boquillas [1-5]. Las principales conclusiones de este análisis han sido que la caída de presión en el cabezal ha de ser lo más reducida posible (lo que favorece el uso de boquillas con mayor sección transversal), que el ángulo de cono que minimiza la caída de presión para el PLA sería de unos 58° y que un incremento en la temperatura de procesamiento favorece una menor fuerza de extrusión y caída de presión.

El uso de secciones transversales no circulares se ha tratado en el campo de la extrusión de hormigón y materiales no termoplásticos. Una de las conclusiones de este tipo de estudios es que el resultado de la deposición varía respecto de la forma de la sección teórica, debido a fenómenos como el recrecimiento del material a la salida de la boquilla. Uno de estos estudios indica que la caída de presión no se ve afectada por la forma de la sección transversal, siempre que el área de dicha sección se mantenga constante [7]. Una de las desventajas del uso de secciones no circulares es que la anchura de la proyección varía en función de la dirección de deposición, por lo que sería necesario que el cabezal rotase sobre sí mismo para mantenerla constante. Sin embargo, la rotación del cabezal produce un fenómeno en el que el material se retuerce sobre sí mismo. Por otra parte, varios estudios han tratado la modificación de la sección transversal con diferentes fines, como conseguir una sección variable [7-8].

El análisis de estos trabajos llevó a la conclusión de que un diseño de cabezal boquilla capaz de proporcionar una anchura de deposición mayor debería basarse en una sección transversal no circular, lo que obligaría a dotar al cabezal de un mecanismo de rotación para trazar trayectorias con cambios de dirección. Sin embargo, antes de abordar un cabezal así, habría que demostrar que la modificación de la sección transversal de las boquillas permite una deposición adecuada del material. Este aspecto se ha abordado en el trabajo desarrollado.

Para demostrar la capacidad de este diseño alternativo, el primer paso a dar debía ser la fabricación y ensayo de un lote de boquillas con diferentes geometrías, a fin de evaluar la calidad de la deposición

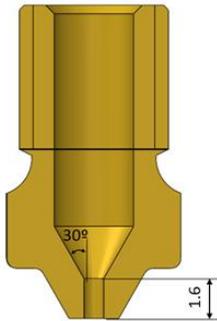
obtenida. En consecuencia, se decidió centrar los esfuerzos para el diseño del cabezal en la validación del uso de geometrías no circulares para la sección transversal de las boquillas de impresión. Para ello se decidió plantear la fabricación de cinco tipos diferentes de orificios: circular (empleado como referencia), rectangular, ovalado, triangular equilátero y triangular isósceles. Se adoptó el criterio de mantener un área equivalente a la de la boquilla circular de mayor tamaño y uso común, que es la de 0.8 mm de diámetro. La Tabla 1 recoge los principales parámetros de las diferentes secciones consideradas.

Tabla 1 – Parámetros geométricos de las boquillas de test.

Sección	Parámetros (mm)		Área (mm ²)
Circular	d= 0.8		0.5026
Rectangular	b= 1.25	h= 0.4	0.5
Óvalo	$r_{mayor}=0.8$	$r_{menor}=0.2$	0.5026
Triángulo equilátero	l= 0.76		0.5
Triángulo isósceles	b=1.2	h=0.8	0.48

La obtención de orificios no circulares de pequeñas dimensiones en piezas metálicas constituye un reto a nivel de fabricación. En la práctica, este tipo de geometrías solo pueden obtenerse mediante procesos de mecanizado por electroerosión o mecanizado electroquímico, aunque en una producción seriada podrían valorarse procesos basados en la deformación plástica del material. Dado que el desarrollo del proyecto requería de la fabricación de varios prototipos, se consideró una alternativa basada en el sinterizado láser selectivo de metal. Este proceso se engloba dentro de la categoría de fabricación aditiva por fusión en lecho de polvos, y consiste en el sinterizado por capas de áreas localizadas de materiales en forma de polvo mediante la aplicación de energía térmica por medio de un láser.

La fabricación de estas boquillas se realizó en la empresa The Steel Printers, con sede en Avilés, especializada en la fabricación por SLS de piezas en aceros de diferentes calidades. Para esta aplicación se seleccionó un acero martensítico para herramientas M300, que ofrece excelentes características de dureza y resistencia a tracción y es empleado en fabricación aditiva como una alternativa a los aceros alto carbono H13 y M2. la Figura 1 contiene una sección de la boquilla, donde se puede apreciar el semiángulo de 30 para la zona de transición del material hacia el orificio.



Property		As built	After Heat Treatment
Tensile Strength [1]	Horizontal Direction (XY)	1000 - 1200 MPa	1900 - 2100 MPa
	Vertical Direction (Z)	1000 - 1200 MPa	1900 - 2100 MPa
Yield Strength [1]	Horizontal Direction (XY)	1000 - 1100 MPa	1850 - 2050 MPa
	Vertical Direction (Z)	900 - 1100 MPa	1850 - 2050 MPa
Young's Modulus [1]	Horizontal Direction (XY)	150 - 170 GPa	160 - 200 GPa
	Vertical Direction (Z)	140 - 160 GPa	160 - 200 GPa
Elongation [1]	Horizontal Direction (XY)	6 - 14 %	2 - 4 %
	Vertical Direction (Z)	6 - 14 %	2 - 4 %
Hardness [2]		30 - 40 HRC	50 - 60 HRC
Coefficient of Thermal Expansion [3]	10 - 11 × 10 ⁻⁶ m/mK		
Thermal Conductivity [3]	15 - 20 W/mK		

Figura 1 · Esquema básico de la sección transversal de la boquilla y tabla con las propiedades orientativas del acero M300.

El diseño de la boquilla se completó con las características geométricas necesarias para su integración en el equipo de prueba previsto: una impresora EDEN de bajo coste. Par ello, la preforma fabricada en The Steel Printers tenía una forma exterior hexagonal (Figura 2), que sería posteriormente mecanizada en su tramo superior para generar una rosca M6x1.

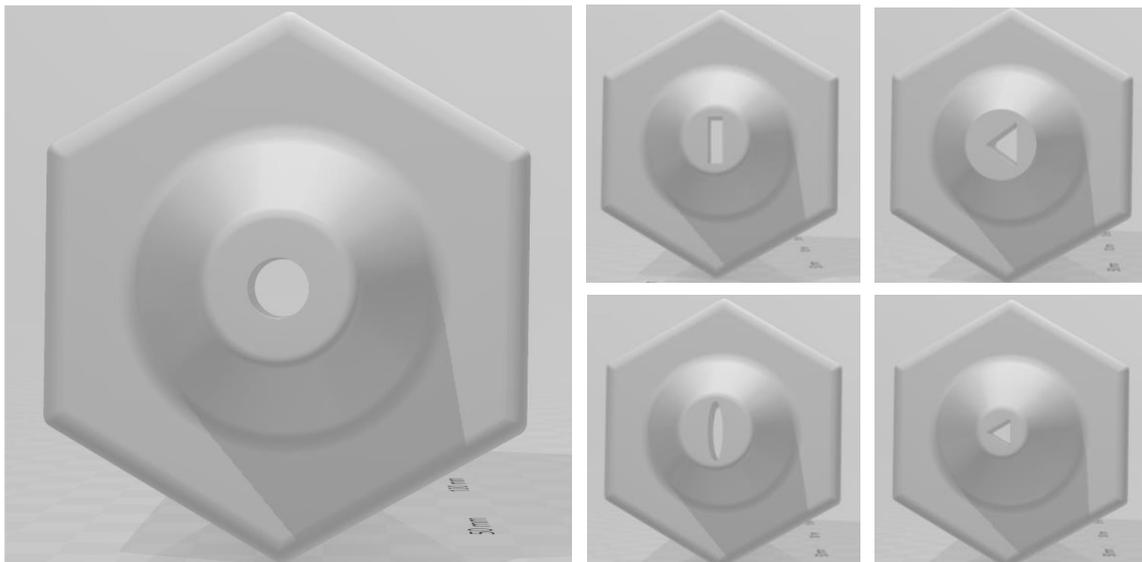


Figura 2 · Vista frontal de la parte delantera de los extrusores, tal como fueron diseñados.

Una vez completada la fabricación de las piezas, se tomaron imágenes de los orificios mediante microscopía digital en el Área de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Oviedo. Las imágenes obtenidas se recogen en la Figura 3. Se puede apreciar como la fabricación mediante SLS no proporciona una definición adecuada del contorno en el caso de las probetas circulares de menor tamaño (01 y 02), ovaladas (07 y 08) y triangulares equiláteros (09 y 10). En el caso de las ovaladas, se aprecia que, hacia los extremos del óvalo, aparecen cuerpos extraños en un plano inferior al de salida del material. Estos cuerpos parecen ser protuberancias debidas a un sinterizado inadecuado de los polvos de material en esa zona. La consecuencia de esta anomalía es una reducción en la sección de paso, que, previsiblemente, puede tener consecuencias negativas para el flujo de material. En el caso de los orificios de menor tamaño, la longitud de las aristas resulta pequeña en comparación con la resolución proporcionada por el equipo SLS, lo que da lugar a una deformación del contorno esperado que es mucho más notable que en el caso de los orificios de mayor longitud de arista.

Una vez verificadas las secciones, se realizó una prueba de impresión, consistente en seis trayectorias de deposición de 50 mm de longitud: tres según la dirección Y, y tres según la dirección X. Cada trayectoria se realizó con una altura de capa de 200 μm y un total de dos capas, hasta una altura total de pieza de 0.4 mm. La impresión se realizó en el equipo EDEN con una configuración estándar, a la que solo se alteró el parámetro de temperatura. La temperatura se elevó hasta los 265°C para compensar la menor conductividad térmica del M300 (20 W/mK) frente al latón de uso habitual en boquillas de impresión 3D (110 W/mK).

Cada uno de los modelos de boquilla empleados dio lugar a una pieza de test. Las boquillas circulares solo se emplearon como medio de verificar que la impresión con la boquilla impresa no presentaba diferencias notables respecto de la impresión con boquillas convencionales mecanizadas. Así se comprobó para el caso de la boquilla de 0.8 mm, con la única diferencia de la temperatura de impresión antes mencionada.

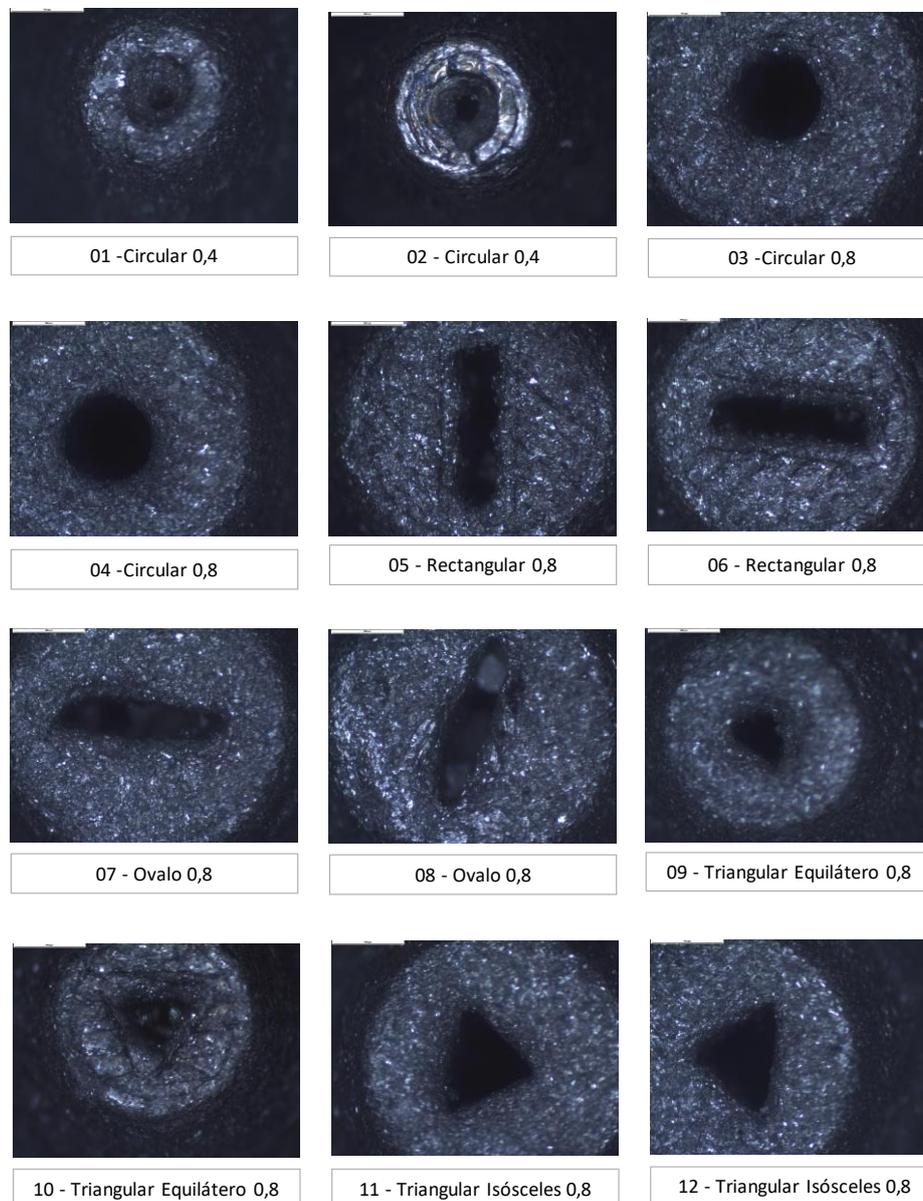


Figura 3 · Imágenes obtenidas mediante microscopía digital de los orificios de las boquillas.

Las cuatro geometrías restantes, por tanto, dieron lugar a cuatro piezas de test. Para evaluar la continuidad y la calidad de la deposición de material, se realizó un digitalizado mediante un escáner de sobremesa, con una resolución de 1200 ppp. Este procedimiento está en línea con algunos de los trabajos recientemente publicados por el equipo investigador [9].

Los resultados obtenidos para las cuatro geometrías alternativas a la circular se muestran en la Figura 4. La deposición de material con la boquilla ovalada presenta problemas de continuidad y estabilidad del flujo, resultando además en una anchura menor de la esperada. Este resultado se corresponde con las deficiencias observadas en la geometría del orificio, durante el análisis de las imágenes. De forma similar, el orificio equilátero tampoco proporciona una deposición adecuada. En este caso, la hipótesis es que la pequeña longitud de los lados del triángulo potencia el efecto negativo de la falta de definición debida al sinterizado. Las dos geometrías restantes, por el contrario, proporcionan una deposición continua y estable, aunque no exenta de oscilaciones locales, que estarían en el rango de las observadas para el caso de la boquilla circular. Las diferencias en la orientación de la trayectoria se traducen en diferencias en la anchura de deposición, como era de esperar, lo que permite lograr anchuras de 1.16 mm en el caso del orificio rectangular y de 0.95 en el caso de la triangular isósceles. En ambos casos se trata de anchuras inferiores a las teóricamente proyectadas, lo que indica que la definición del contorno que proporciona el método de fabricación empleado no permite alcanzar un perfil delimitado correctamente en esas zonas.

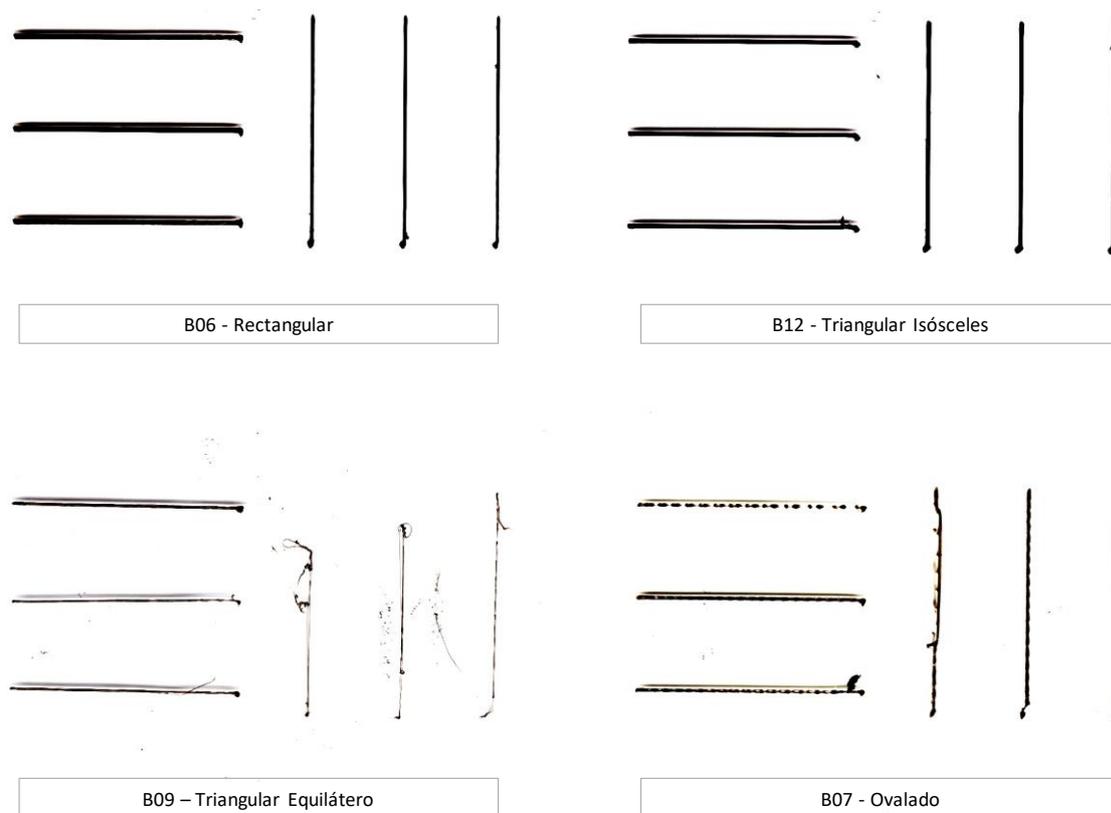


Figura 4 · Imágenes digitalizadas de las pruebas de deposición.

Los resultados obtenidos indican que es posible emplear geometrías alternativas para el orificio de la boquilla y que estas geometrías proporcionan una anchura mayor en la deposición sin que esto

implique un incremento igual de la longitud puntual de la deposición. Esto representa una ventaja de cara a la obtención de detalles pequeños en la cara exterior de la trayectoria y, al mismo tiempo, permite incrementar la productividad del proceso. De este modo, se posibilita el uso de una única trayectoria de contorno, capaz de depositar el material con una anchura de 1.2 mm, en lugar de la opción empleada en la actualidad, que emplea tres trayectorias de 0.4 mm. El ahorro de tiempos en este caso sería de un 66.6%.

En cuanto al segundo objetivo, se ha diseñado un sistema capaz que incorporar la fase de digitalizado de capa en el propio equipo de fabricación. El propósito de este diseño es el de obtener imágenes de la deposición entre capa y capa, evitando tener que desmontar la cama de cristal sobre la que se realiza la deposición del material. Así se minimiza el enfriamiento del material y los resultados de la medición. El objetivo de este diseño es, además, disponer de un banco de ensayos propio, que permita superar las limitaciones que plantean los equipos comerciales como el empleado en las pruebas realizadas. La Figura 5 contiene una representación del diseño en su estado actual.

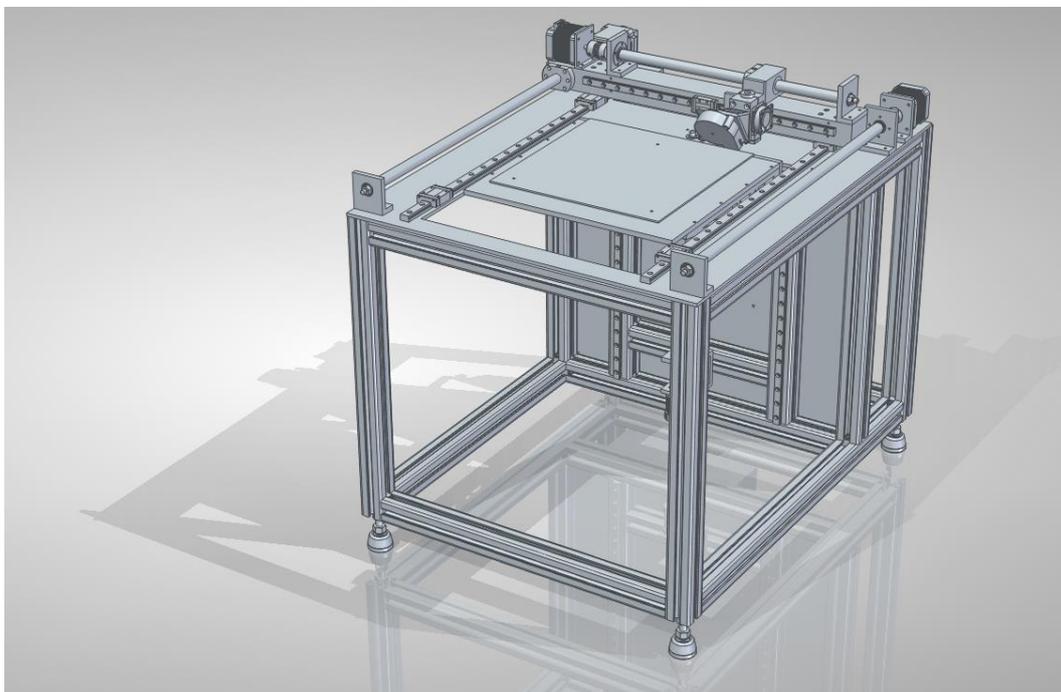


Figura 5 · Equipo de fabricación con sistema de verificación en máquina integrado.]

3.3 Tareas realizadas

[Las actividades previstas para este proyecto están recogidas en la Tabla 2.

Tabla 2 – Actividades previstas.

- A1 - Análisis del estado del arte. Cabezales de extrusión para procesos MEAM
- A2 - Desarrollo y valoración de alternativas conceptuales
- A3 - Elaboración de las especificaciones de diseño y evaluación del prototipo
- A4 - Diseño de un modelo pre-industrial de cabezal optimizado

A5 - Fabricación del cabezal extrusor

A6 - Integración del cabezal en un equipo MEAM

A7 - Pruebas preliminares de funcionamiento y ajuste de parámetros de fabricación

A8 - Validación del cabezal en base a test de fabricación y verificación dimensional

A9 - Elaboración del informe técnico y publicación de resultados

Todas ellas han sido ejecutadas como se recoge en el apartado 3.3. Adicionalmente, se ha avanzado en el diseño del equipo de fabricación con un sistema de verificación integrado.]

•

3.4 Resultados obtenidos

[Los principales resultados obtenidos se listan a continuación:

1. Se han diseñado y fabricado mediante SLS una serie de boquillas con secciones no circulares para el orificio de deposición.
2. Dichas boquillas se han integrado en un equipo comercial de fabricación por extrusión de termoplásticos.
3. Se ha ajustado la configuración de fabricación del equipo para adaptarse al material de las boquillas (acero M300), resultando en un incremento de la temperatura del cabezal.
4. Se han analizado las secciones fabricadas, observando que el proceso SLS no resulta adecuado para ciertas geometrías de orificio (ovalado, triángulo equilátero), al menos para los tamaños usados en las pruebas.
5. Se han realizado pruebas de impresión, con resultados prometedores para los casos de sección rectangular y triangular isósceles.
6. Se ha realizado un diseño de conjunto para un equipo de fabricación con sistema de verificación de capa mediante escaneado]

3.5 Trabajos o necesidades futuras

[Los resultados obtenidos permiten anticipar que la extrusión de material con secciones transversales asimétricas permite una mayor productividad, reduciendo los tiempos de fabricación de piezas mediante extrusión de termoplástico. El trabajo llevado a cabo hasta la fecha es una prueba de concepto que valida esta posibilidad a nivel de laboratorio, por lo que resta mucho trabajo de investigación y desarrollo antes de que esta posibilidad se traduzca en un dispositivo comercial robusto.

Entre los trabajos futuros figurarían:

1. Optimización del diseño y el tamaño de la sección transversal, a partir de las geometrías que han acreditado mejores resultados en la fase que ahora concluye.
2. Optimización del proceso de fabricación, a nivel de trayectorias de deposición y procesos de acabado post-sinterizado.

3. Valoración del empleo de otros materiales con mejor conductividad térmica.
4. Evaluación de las diferencias a nivel de capacidades mecánicas entre piezas fabricadas con estrategias convencionales y piezas fabricadas con la nueva estrategia.

3.6 Divulgación de los resultados

En los dos meses y medio transcurridos desde la formalización de las becas no ha sido posible desarrollar ninguna acción de divulgación de resultados en forma de artículo científico o comunicación en congreso. En cambio, en línea con los compromisos de divulgación recogidos en la propuesta, sí se han planteado dos propuestas de trabajo fin de máster. Ambos trabajos han sido recientemente aprobados por la Comisión Académica del Máster Universitario en Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de Oviedo y se completarán a lo largo del primer semestre de 2020. Los trabajos son:

1. Desarrollo de un cabezal de alta productividad para equipos de fabricación aditiva mediante extrusión de termoplásticos. Alumno: Ignacio Díaz Vigil. Tutores: David Blanco Fernández y Natalia Beltrán Delgado.
2. Desarrollo de equipo de fabricación aditiva mediante extrusión de termoplásticos con capacidad de inspección y verificación en máquina. Alumno: Jorge Álvarez Patón. Tutores: David Blanco Fernández y Fernando Peña Cambón.

De cara al futuro, la investigación en desarrollo se presentará a través de las webs de los grupos de investigación que participan de este proyecto: IPFResearch (<http://www.ipfresearch.com>) y ARAMO (<https://aramoblog.wordpress.com/>). Igualmente, en caso de que los resultados finales sean exitosos, se presentarán en una revista científica indexada dentro del campo de la ingeniería de fabricación.

4. Memoria económica

4.1 Gastos:

CONCEPTO	GASTOS
Personal	4260
Fungibles	-
Amortización	-
TOTAL GASTOS	4260

4.2 Ingresos:

Entidad/Empresa financiadora Ref. Proyecto/Contrato	Personal	TOTAL INGRESOS

5. Bibliografía

1. V. Nienhaus, K. Smith, D. Spiehl, and E. Dörsam, "Investigations on nozzle geometry in fused filament fabrication," *Addit. Manuf.*, vol. 28, pp. 711–718, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.ADDMA.2019.06.019
2. H. S. Ramanath, C. K. Chua, K. F. Leong, and K. D. Shah, "Melt flow behaviour of poly-epsilon-caprolactone in fused deposition modelling," *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, vol. 19, no. 7, pp. 2541–2550, Jul. 2008, doi: 10.1007/S10856-007-3203-6
3. J. Z. Liang, "Influence of die angles on pressure drop during extrusion of rubber compound," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 80, no. 8, pp. 1150–1154, May 2001, doi: 10.1002/APP.1198.
4. N. A. Sukindar and M. K. A. Mohd Ariffin, "An Analysis on Finding the Optimum Die Angle of Polylactic Acid in Fused Deposition Modelling," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 835, pp. 254–259, May 2016, doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.835.254
5. E3D, "V6 Nozzles – E3D Online." [https://e3d-online.com/collections/nozzles/products/v6-nozzles?utm_source=V6 Spares Diagram&utm_medium=organic&utm_campaign=V6_Spares&utm_content=Nozzle](https://e3d-online.com/collections/nozzles/products/v6-nozzles?utm_source=V6%20Spares%20Diagram&utm_medium=organic&utm_campaign=V6_Spares&utm_content=Nozzle) (accessed Dec. 02, 2021)
6. E. A. Papon, A. Haque, M. Ali, and R. Sharif, "Effect of Nozzle Geometry on Melt Flow Simulation and Structural Property of Thermoplastic Nanocomposites in Fused Deposition Modeling Additive manufacturing of fiber reinforced composites View project Annular Turbulent non-swirling and swirling impinging," doi: 10.12783/asc2017/15339
7. B. Gharehpapagh, M. Dolen, and U. Yaman, "Automation and Intelligent Manufacturing," 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.007
8. R. Löffler and M. Koch, "Innovative Extruder Concept for Fast and Efficient Additive Manufacturing," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 10, pp. 242–247, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.IFACOL.2019.10.071.
9. D. Blanco, P. Fernandez, A. Noriega, B.J. Alvarez, G. Valiño, "Layer Contour Verification in Additive Manufacturing by Means of Commercial Flatbed Scanners" *Sensors*, vol. 20, no. 1, 2020, doi: 10.3390/s20010001.