

INFORME DEL PROYECTO REF.SV-24-GIJÓN-1-04

Análisis de la calidad de las piezas MEX-TRB/P mediante sensor 3D de triangulación láser integrado en máquina

Fechas inicial y final del proyecto:

01 / 06 / 2024 al 31 / 12 / 2024

Investigador/a Principal:

Pablo Zapico García (zapicopablo@uniovi.es)

Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación, Universidad de Oviedo

Otros investigadores:

Alejandro Fernández Suárez (afs@uniovi.es)^a, Víctor Manuel Meana Díaz (meanavictor@uniovi.es)^a, Fernando Peña Cambón (penafernando@uniovi.es)^b, Gonzalo Valiño Riestra (gvr@uniovi.es)^a

^a Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación, Universidad de Oviedo,

^b Área de Expresión Gráfica en la Ingeniería, Universidad de Oviedo

Personal contratado:

Sofía Álvarez Álvarez (DNI 34293455H; uo281872@uniovi.es)

Fechas inicial y final de contratación:

01 / 09 / 2024 al 31 / 12 / 2024

Empresas o instituciones colaboradoras:

IDONIAL Centro Tecnológico

Redes sociales de investigadores y empresas:

www.ipfresearch.com, <https://www.idonial.com/es/>

En Gijón, a 19 de diciembre de 2024

Fdo.: Pablo Zapico García – Investigador Principal

Resumen Gráfico

La Figura 1 representa el punto de partida del proyecto, máquina de fabricación aditiva que aplica el proceso MEX-TRB/P y que cuenta con un sensor de triangulación láser de cortina integrado, así como las tareas desarrolladas en el mismo.

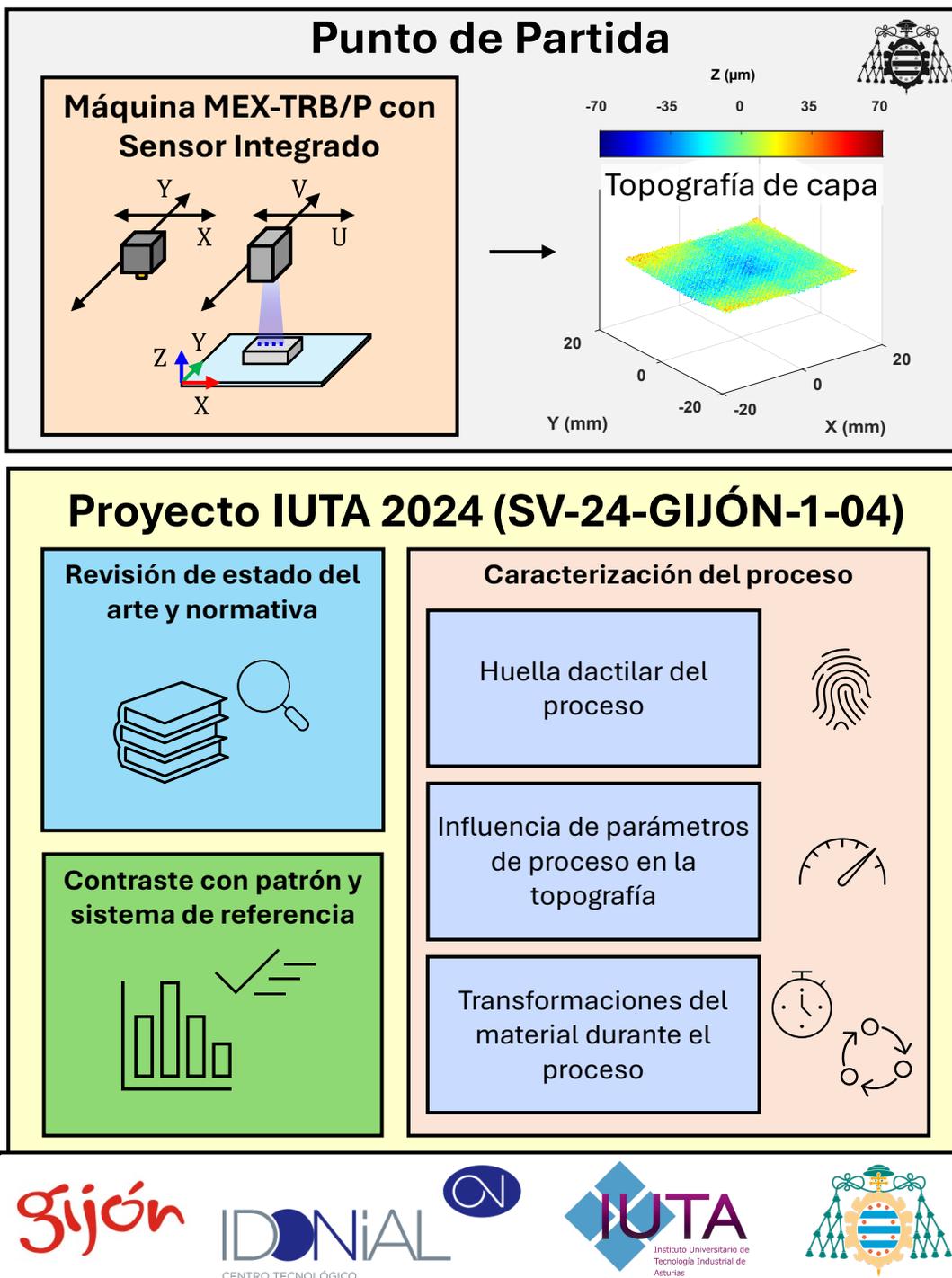


Figura 1. Esquema resumen del punto de partida y del desarrollo del proyecto.

Memoria descriptiva del proyecto

1. Resumen ejecutivo

La Fabricación Aditiva (FA) se comenzó a desarrollar en la década de 1980. Por entonces, englobaba una serie de técnicas que permitían fabricar de una manera sencilla y relativamente rápida, prototipos en material polimérico a partir de un modelo digital de los mismos, agregando sucesivas capas de material en las que previamente se había rebanado virtualmente el modelo digital del prototipo. Desde entonces, mucho han evolucionado estas técnicas consiguiendo hoy en día fabricar en un amplio espectro de materiales y con una calidad adecuada para ciertas aplicaciones, lo que permite incluso obtener componentes funcionales.

Esta tecnología muestra numerosas ventajas respecto a otros tipos de tecnologías de fabricación más convencionales como el moldeo, la forja o el mecanizado. Entre ellas, cabe destacar la elevada complejidad geométrica y personalización que permite en sus productos sin un incremento notable del coste, así como la simplificación de la cadena de suministro. Prueba de estas ventajas es el interés que han mostrado en la FA sectores industriales punteros tales como el médico, el aeroespacial, el de automoción o el de defensa, entre otros. A pesar de ello, la implantación industrial de esta tecnología no es la que cabría esperar y en los últimos años se aprecia una ralentización de la venta de máquinas que la aplican. Este hecho se puede explicar debido a ciertos fallos de calidad de las piezas para las aplicaciones más exigentes. Estos fallos de calidad pueden derivar de dos fuentes de bien diferenciadas: la máquina FA, el proceso FA.

En lo que respecta a la falta de calidad de las piezas derivadas de cuestiones relacionadas con la máquina FA, los fabricantes han realizado un gran esfuerzo en las últimas décadas para mejorar estos sistemas, por lo que esta fuente de fallo está reducida al mínimo. Este hecho pone el foco en el propio proceso FA. Teniendo en cuenta la multitud de procesos FA existentes, así como la complejidad de los cambios físicos sufridos por el material durante los mismos, como reacciones químicas, cambios de fase, procesos térmicos, entre otros, la reducción del efecto de esta fuente requiere de un profundo proceso de caracterización de cada proceso para su posterior optimización.

Al respecto de la caracterización y optimización de procesos FA, muchos son los trabajos científicos desarrollados en los últimos años que tratan de abordarlas. Para ello, la mayoría se centra en fabricar piezas de test con una cierta configuración de los parámetros del proceso FA para, una vez fabricadas, analizarlas en un equipo de inspección externo, inspección ex-situ, y relacionar su calidad con la configuración del proceso FA utilizada para su fabricación. Este enfoque, a pesar de haber demostrado su utilidad, tiene ciertas carencias, ya que no permite una caracterización integral del proceso por analizar la pieza una vez concluida su fabricación, siendo imposible detectar cambios físicos del material durante el proceso, así como la parte interna de las piezas. Para solventar esta problemática, muchos investigadores han enfocado sus esfuerzos a la utilización de sensores de inspección integrados en máquina, inspección in-situ, que permiten analizar el interior de las piezas y las transformaciones sufridas por el material durante el proceso. Estos sensores engloban, desde sistemas ópticos tipo cámara o sensores de imagen por contacto que permiten obtener imágenes, hasta sistemas de digitalizado sin contacto que permiten obtener nubes de puntos bidimensionales o tridimensionales. En lo que respecta a estos últimos sistemas, la práctica totalidad de los trabajos desarrollados utilizan sensores con baja fiabilidad metrológica, como sensores de luz estructura, sensores basados en tiempo de vuelo, etc. Esto hace que, a pesar de ser una caracterización más profunda que la conseguida con medición ex-situ, el alcance de la misma sea menor del que se podría alcanzar con sensores que cuenten con mayor fiabilidad metrológica.

En lo que respecta a procesos FA caracterizados y/u optimizados, existen trabajos centrados en prácticamente todos los procesos, dado que cada uno de ellos tiene sus propios parámetros específicos y peculiaridades. Entre todos ellos, cabe destacar el de Extrusión de Material Termoplástico (MEXTRB/P) por la sencillez y economía de su equipamiento, hecho que ha llevado a que sea el proceso FA más ampliamente utilizado. Permite obtener piezas en gran variedad de materiales poliméricos utilizando equipamiento barato, con bajo consumo energético y con pocos o nulos riesgos para el medio ambiente y para las personas. Su principio de funcionamiento implica la deposición desde una boquilla de extrusión de delgados cordones de material que se deben cohesionar con cordones previamente depositados en la misma capa o en la capa inmediatamente anterior. Esta cohesión, detectable en la topografía de las capas fabricadas, resulta crítica para la calidad de la pieza, sobre todo para su calidad superficial y para su integridad mecánica.

Sensor Gocator 2410 montado
en puente de inspección

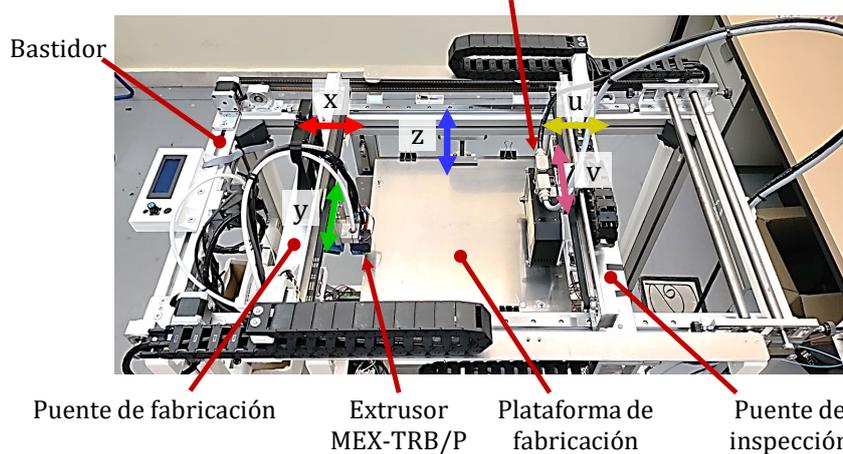


Figura 2. Banco de ensayos con el que se contó para realizar el proyecto.

Para caracterizar la topografía de las capas agregadas durante el proceso MEXTRB/P resultaría interesante la utilización de un sensor de digitalizado sin contacto integrado en máquina, sensor insitu, siendo este sensor de elevada calidad metrológica para asegurar el alcance de esta caracterización. En este proyecto se analiza esta situación partiendo de un banco de ensayos desarrollado por el Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Oviedo. Este banco es capaz de aplicar el proceso MEX-TRB/P y cuenta con un sensor de triangulación láser de cortina Gocator 2410 de LMI Technologies montado en dos ejes de movimiento (U, V) independientes de los ejes de fabricación (X, Y, Z) que permiten realizar digitalizados de la topografía de las capas agregadas en el proceso.

En este proyecto, aparte de una revisión del estado del arte y de la normativa actual en lo que respecta a caracterización y cuantificación de esta topografía, así como de una validación previa de la fiabilidad metrológica del sensor para esta aplicación específica, se analiza la viabilidad de este sistema para detectar varias cuestiones críticas para la calidad de las piezas MEX-TRB/P:

- Peculiaridades propias del proceso o huella dactilar del proceso.
- Efecto de parámetros del proceso y de fallos en su seguimiento.
- Transformaciones del material agregado durante el proceso.

La demostración de la viabilidad del sensor integrado para esta aplicación permitirá una caracterización y una futura optimización del proceso más integrales mejorando su aplicabilidad. Aparte, la metodología desarrollada será extrapolable a otros procesos FA de mayor valor añadido.

2. Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

La Tabla 1 representa el grado de consecución del objetivo principal y de los objetivos específicos del proyecto.

Tabla 1. Grado de consecución del objetivo principal y de los objetivos específicos del proyecto.

Tipo	Objetivo	Grado de consecución
Principal	Analizar la viabilidad de utilizar un sensor de digitalizado sin contacto 3D de alta precisión basado en triangulación de cortina láser integrado en una máquina de FA para analizar diferentes aspectos de calidad de las piezas fabricadas mediante el proceso MEX-TRB/P	100%
Específico 1	Evaluar la fiabilidad de la información de las capas MEX TRB/P capturada con el sensor integrado	100%
Específico 2	Estudiar diferentes peculiaridades del proceso MEX TRB/P que puedan afectar a la calidad de las piezas utilizando la información capturada con el sensor	100%
Específico 3	Analizar el efecto en la calidad de las piezas de diferentes fallos en el seguimiento exhaustivo de las consignas de fabricación a partir de la información capturada con el sensor	100%
Específico 4	Analizar las transformaciones sufridas por el material agregado durante el proceso MEX-TRB/P a partir de la información capturada con el sensor durante el proceso de fabricación	100%

3. Tareas realizadas

El trabajo abordado en este proyecto se ha dividido en siete tareas desarrolladas a lo largo de los seis meses de ejecución del proyecto entre junio y diciembre de 2024 (se descuenta agosto por ser inhábil). La realización de estas tareas ha seguido un desarrollo eminentemente secuencial, si bien ha existido solapamiento entre algunas de ellas, como se puede observar en la Figura 2. A continuación, se resume brevemente el contenido de las tareas:

- **Tarea 1:** revisión de normativa internacional relacionada con la evaluación de la calidad topográfica obtenida en piezas MEX-TRB/P, así como consulta de trabajos científicos orientados a analizar la topografía de las capas agregadas en este proceso. El fin de esta tarea fue determinar metodologías e indicadores que permitan evaluar la topografía de las capas agregadas durante el proceso.
- **Tarea 2:** validación de la fiabilidad del sensor de triangulación láser de cortina integrado en la máquina MEX-TRB/P para detectar la topografía de las capas. Se contrastaron sus resultados contra un patrón de rugosidad con topografía similar a la vista en piezas, así como contra un sistema de referencia metrológica (Holografía Conoscópica). En este último caso, se comparó el desempeño del sensor integrado y del sistema de referencia en diferentes materiales MEX-TRB/P.
- **Tarea 3:** diseño de probetas que posteriormente se utilizaron en las tareas 4, 5 y 6 del proyecto (véase el contenido de estas tareas).

ID	Descripción	MESES					
		Jun	Jul	Sept	Oct	Nov	Dic
Tarea 1	Valoración de métodos e indicadores para valorar la calidad de las piezas MEX-TRB/P	■					
Subtarea 1.1	Revisión del estado del arte	■					
Subtarea 1.2	Revisión de normativa específica	■					
Tarea 2	Evaluación de la fiabilidad de la información capturada con el sensor in situ sobre capas agregadas en el proceso MEX-TRB/P		■	■			
Subtarea 2.1	Contraste contra patrón de rugosidad		■				
Subtarea 2.2	Contraste contra sistema de referencia		■	■			
Tarea 3	Diseño de artefactos MEX-TRB/P para analizar la viabilidad del sensor de triangulación para la detección de la topografía de las capas depositadas durante el proceso		■				
Subtarea 3.1	Diseño de artefactos para Tareas 4, 5, 6		■				
Tarea 4	Detección de peculiaridades topográficas de las capas agregadas durante el proceso MEX-TRB/P			■			
Subtarea 4.1	Fabricación y digitalizado de probetas			■			
Subtarea 4.2	Análisis y elaboración de conclusiones			■			
Tarea 5	Detección del efecto de un seguimiento inadecuado de las consignas de fabricación durante el proceso MEX-TRB/P			■	■		
Subtarea 5.1	Elaboración de diseño de experimentos (DoE) en base al estado del arte			■			
Subtarea 5.2	Fabricación y digitalizado de probetas			■	■		
Subtarea 5.2	Análisis y elaboración de conclusiones				■		
Tarea 6	Detección de transformaciones del material agregado durante el proceso MEX-TRB/P				■	■	
Subtarea 6.1	Fabricación y digitalizado de probetas				■		
Subtarea 6.2	Análisis y elaboración de conclusiones					■	
Tarea 7	Elaboración del informe técnico y publicación de resultados				■	■	■
Subtarea 7.1	Elaboración de informe técnico				■		■
Subtarea 7.2*	Publicación de resultados				■	■	■

* Subtarea que se prolongará más allá del fin del proyecto, véase trabajos futuros.

Figura 3. Planificación del proyecto.

- **Tarea 4:** fabricación MEX-TRB/P y digitalizado con el sensor integrado de diferentes artefactos. Análisis de los resultados obtenidos y elaboración de conclusiones sobre peculiaridades del proceso MEX-TRB/P (huella dactilar del proceso).
- **Tarea 5:** elaboración de diseño de experimentos (*Design of Experiments* << DoE >>) en base a los principales parámetros de influencia en la topografía de las capas agregadas en MEX-TRB/P. Fabricación de las probetas y digitalizado con el sensor integrado. Análisis de resultados y elaboración de conclusiones sobre la influencia de los parámetros en la textura de las capas agregadas detectada con el sensor integrado. Adicionalmente, en esta tarea se realizó la comparativa de la topografía detectada con el sensor en artefactos fabricados con diferentes sistemas de fabricación MEXTRB/P.
- **Tarea 6:** fabricación MEX-TRB/P y digitalizado con el sensor integrado de diferentes artefactos. Análisis de resultados obtenidos y elaboración de conclusiones sobre transformaciones sufridas por el material agregado durante el proceso.
- **Tarea 7:** preparación de trabajos de difusión de resultados y redacción de este documento.

A lo largo del desarrollo de las diferentes tareas se han mantenido varias reuniones e intercambio de información y probetas con la empresa que apoyó el desarrollo de este proyecto, IDONIAL Centro Tecnológico.

4. Resultados obtenidos

A continuación, se detallan los principales resultados extraídos de las tareas en las que se ha estructurado el trabajo del proyecto excepto de la Tarea 3, por ser esta una tarea de diseño de artefactos que se utilizaron en tareas posteriores (4, 5 y 6).

- Tarea 1: Valoración de métodos e indicadores para valorar la calidad de las piezas MEX-TRB/P

Al centrarse este proyecto en caracterización de la textura de capas agregadas en el proceso MEX-TRB/P, la búsqueda de normativa internacional se realizó orientada a Fabricación Aditiva y a calidad superficial. Al respecto se identificó la norma ISO 17296-2, desarrollada por *International Organization for Standardization*, que realiza recomendaciones de especificaciones sobre esta calidad para piezas plásticas obtenidas por este proceso en función de su nivel de restricción. Específicamente, obliga a realizar estas especificaciones en componentes funcionales críticos para la seguridad y lo recomienda en el resto de componentes. Al respecto de los métodos utilizados para valorar esta calidad, recomienda el método del perfil de la norma ISO 4288, que a día de hoy está sustituida por la ISO 21920.

En lo que respecta a trabajos científicos, se realizó una búsqueda en diferentes repositorios de revistas, artículos y aportaciones en congresos científicos. En total se revisaron 41 trabajos centrados en analizar la topografía o la calidad superficial de piezas obtenidas por MEX-TRB/P, véase apartado de bibliografía. El 95% de estos trabajos utilizan parámetros de rugosidad del método del perfil para caracterizar la topografía de las piezas. De ellos, el 84,6% utilizan el parámetro Ra (altura media aritmética), el 23,1% Rz (altura máxima) y el 18% Rq (altura media cuadrática). De modo que en este proyecto fundamentalmente se utiliza el parámetro Ra.

En cuanto a la reunión con IDONIAL, desde la empresa indicaron que este tipo de piezas no suelen tener especificaciones de calidad superficial, pero que, si las tuviesen, verificarían las piezas mediante algunos de los parámetros obtenidos por el método del perfil.

- Tarea 2: Evaluación de la fiabilidad de la información capturada con el sensor in situ sobre capas agregadas en el proceso MEX-TRB/P.

Esta tarea del proyecto se amplió respecto a la planificación inicial. Por un lado, según se había previsto en dicha planificación, se comparó la calidad superficial detectada con el método del perfil utilizando el sensor de triangulación láser de cortina con los resultados obtenidos con un sistema de referencia basado en Holografía Conoscópica en la cuantificación de la calidad superficial de varias probetas MEX-TRB/P de diferente textura. De esta comparativa se obtuvieron valores similares con ambos sistemas, lo que permitió validar el desempeño del sensor para esta tarea.

Aparte, también se contrastó la capacidad del sensor de detectar diferentes grados de rugosidad, es decir, amplitud de la textura de la superficie, utilizando un patrón de rugosidad de un proceso de fabricación distinto al MEX-TRB/P, pero que deja marcas lineales similares: proceso de cepillado. Los resultados obtenidos garantizan la fiabilidad del sensor de triangulación para rugosidades por encima de $1,6 \mu\text{m}$ de R_a , que está por debajo de la rugosidad que normalmente se encuentra en piezas MEX-TRB/P, por encima de $4 \mu\text{m}$.

Adicionalmente, IDONIAL proporcionó al equipo investigador seis probetas fabricadas en distintos materiales técnicos con diferentes aplicaciones (PLA, PETG, ABS, PP, PA, TPU) que permitieron comparar el desempeño del sensor respecto al sistema de referencia basado en Holografía Conoscópica. Asimismo, en esta comparativa también se incluyó una probeta obtenida en material polimérico recargado con 316L desarrollado por Zetamix que fue proporcionada por el Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Oviedo. En muchos casos, el desempeño del sensor de triangulación fue mejor que el del sistema de referencia, por tener éste mejor comportamiento ante cambios en las propiedades ópticas del material digitalizado. Los resultados de esta comparativa están en vías de difusión a través de un congreso internacional, véase apartado divulgación de los resultados.

- Tarea 4: Detección de peculiaridades topográficas de las capas agregadas durante el proceso MEX-TRB/P.

Para esta tarea se fabricaron probetas de diferente tamaño y diferente relación de aspecto a lo largo de los ejes horizontales de fabricación, ejes X e Y, véase Figura 1. Tras el digitalizado de estas probetas se analizaron las nubes de puntos de la superficie superior de las mismas identificando diferentes peculiaridades del proceso críticas para caracterizar la cohesión del material de las piezas:

- Falta de material en la posición de inicio de agregación de cada capa y exceso en el punto de finalización
- Deformación en aristas vivas verticales
- Irregularidades de la textura cerca del contorno de la capa
- Falta de material entre la zona central de relleno de las capas y el contorno
- Huecos entre cordones o solapamiento excesivo entre ellos en diferentes zonas

Con la batería de ensayos realizada se determinó que la presencia y magnitud de estas peculiaridades varía en función de los parámetros de proceso utilizados, del tamaño de las probetas, así como de su relación de aspecto geométrica respecto a los ejes horizontales de fabricación.

- Tarea 5: Detección del efecto de un seguimiento inadecuado de las consignas de fabricación durante el proceso MEX-TRB/P

Para analizar la capacidad del sensor de detectar defectos en el seguimiento de las consignas de fabricación, entendiéndose por estas consignas, parámetros del proceso MEX-TRB/P se plantearon dos situaciones con las que probar que el sensor es capaz de detectar en la topografía de las capas la modificación de estos parámetros.

La primera de estas situaciones consistió en analizar cómo afecta a la topografía la variación de ciertos parámetros del proceso en distintos sistemas de fabricación. Específicamente, se comparó el efecto sobre esta topografía de los parámetros altura de capa y ancho de línea en tres máquinas diferentes, dos comerciales, Ultimaker S5 y Anycubic Vyper, y el propio banco de ensayos en el que está integrado el sensor. En este análisis se detectó influencia de ambos parámetros en el valor de Ra obtenido para las capas y diferencias entre sistemas de fabricación a pesar de utilizar idénticos parámetros MEX-TRB/P. Los resultados de este análisis están en vías de difusión a través de un congreso internacional, véase apartado divulgación de los resultados.

La otra situación analizada consistió en desarrollar un diseño de experimentos (*Design of Experiments* <<DoE>>) para comprobar la capacidad del sensor para caracterizar la influencia que tienen en la topografía diferentes parámetros del proceso MEX-TRB/P. En este DoE se analizaron 5 parámetros del proceso extraídos de la revisión del estado del arte realizada para la Tarea 1 como los más influyentes en la topografía de las capas: altura de capa, velocidad de impresión, temperatura de extrusión, ancho de línea, flujo de extrusión. Aplicando un análisis de la varianza a los resultados (*ANalysis Of VAriance* <<ANOVA>>) se determinó la influencia de estos parámetros en la rugosidad y ondulación de las capas agregadas. De forma aislada se determinó que el parámetro más influyente es la altura de capa, seguido del factor de extrusión. Asimismo, se determinó que la velocidad de impresión afecta a la rugosidad de las capas, mientras que el ancho de línea a la ondulación. Estos resultados demuestran la capacidad del sensor para detectar la influencia de variaciones de parámetros de proceso en la topografía de las capas.

- Tarea 6: Detección de transformaciones del material agregado durante el proceso MEX-TRB/P

En esta tarea se estudió la capacidad del sensor para detectar evoluciones sufridas por el material durante el proceso MEX-TRB/P. Para ello se analizaron diferentes situaciones en las que se conoce que el material agregado sufre algún tipo de evolución de origen térmico, para tratar de detectar esta evolución con el sensor integrado.

Una de estas situaciones correspondió a realizar sucesivos digitalizados de una capa sólida de material, desde el instante inmediatamente posterior a la finalización de su agregación, material recién agregado, hasta que este material se enfría hasta la temperatura ambiente, material totalmente estabilizado. De estos digitalizados se determinó una evolución en la topografía del material que disminuya el valor de Ra en $0,1 \mu\text{m}$ a razón de $0,002 \mu\text{m}/\text{min}$.

Otra situación analizada consistió en comparar la topografía de capa obtenida en una pieza cuando ésta se fabrica de manera aislada con la que se obtiene al fabricarla conjuntamente con otras piezas en la misma puesta de máquina. En esta última situación, las sucesivas capas que se van agregando para cada pieza sufren cierto enfriamiento antes de que se agregue sobre ellas la siguiente capa, pues antes de que esto ocurra se deben agregar las correspondientes capas a la misma cota Z del resto de piezas que se estén fabricando. De este análisis se concluyó que el valor de Ra de las capas agregadas se incrementa entre un 11 y un 29% cuando la pieza se fabrica conjuntamente con otras en la misma puesta de máquina. Este análisis demuestra la capacidad del sensor de detectar pequeñas variaciones en la topografía de las capas derivadas de evoluciones del material durante el proceso.

Por último, también se analizó con el sensor integrado un caso de fabricación de una probeta en la que se forzó el efecto *warping*, habitual en el proceso MEXTRB/P. Para esta probeta se detectó un valor de Ra un 20,8% menor del habitual para la configuración del proceso utilizada. Este hecho se debe a que el material de la pieza se empuja hacia el extrusor por efecto de la deformación no deseada produciendo una superficie superior más lisa, aunque en una probeta totalmente deformada en su parte inferior. Con este ensayo se demuestra una vez más la capacidad del sensor de detectar cambios imprevistos en la configuración del proceso que ocurren durante este y que afectan a la calidad de las piezas.

5. Trabajos o necesidades futuras

Tal como se indicó en el apartado de este documento titulado objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución, en este proyecto se consideran completamente conseguidos los objetivos específicos y, en consecuencia, el objetivo principal. Por tanto, al respecto de ellos no se considera que existan trabajos o necesidades futuras más allá de realizar divulgación de los resultados obtenidos en el proyecto, véase apartado divulgación de los resultados.

En cualquier caso, sí es cierto que se podría ampliar el alcance de este proyecto orientando nuevos trabajos de investigación que se sirviesen de la capacidad del sensor de triangulación para detectar la topografía de las capas agregadas en el proceso MEX-TRB/P que se ha demostrado en este proyecto. En este sentido, se podría utilizar este sensor para:

- Analizar la topografía de las capas MEXTRB/P utilizando parámetros de rugosidad areales en lugar de parámetros basados en el método del perfil. Esto permitiría una caracterización más integral del proceso.
- Aplicar el mismo procedimiento desarrollado en este proceso, pero a otros materiales y sistemas de fabricación MEX-TRB/P. Esto permitiría un mayor conocimiento de las peculiaridades de cada material y sistema de fabricación confiriendo mayor trazabilidad al proceso MEX-TRB/P.
- Utilizar el sensor en otros procesos de fabricación aditiva. Esto permitiría analizar la capacidad del sensor en materiales y procesos de distinta naturaleza permitiendo obtener en ellos los potenciales beneficios de contar con una técnica capaz de caracterizar la topografía de las capas agregadas.

6. Divulgación de los resultados

En la Figura 4 se muestran dos ponencias en las que se presentarán resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto. Específicamente, por un lado, la ponencia titulada “Feasibility of non-contact digitizing for topography characterization of MEX/P parts” trata de la comparativa del desempeño del sensor de triangulación frente al sistema de referencia basado en Holografía Conoscópica para detectar la topografía de capas agregadas en el proceso MEX-TRB/P en diferentes materiales, abordada como parte de la Tarea 2 de este proyecto. Por otro lado, la ponencia titulada “Surface Quality Comparison in MEX/P Manufactured Parts Across Different Machines and Process Parameters” trata sobre la comparativa de la topografía obtenida en las capas MEX-TRB/P obtenida utilizando diferentes sistemas de fabricación e idénticos parámetros de proceso, abordada como parte de la Tarea 5 del proyecto.

Aparte de estas dos ponencias, se pretende seguir haciendo difusión de otros resultados alcanzados en el proyecto, como los del análisis del efecto de los parámetros de proceso en la topografía de las capas agregadas abordada en la Tarea 5. Estos resultados se pretenden publicar en revistas indexadas en el Journal Citation Reports, JCR, colocadas en posiciones de alto impacto y con temática relacionada con fabricación aditiva y e inspección sin contacto insitu, tales como Additive Manufacturing (ISSN: 2214-8604), Rapid Prototyping Journal (ISSN: 1355-2546) o IEEE-ASME Transactions on Mechatronics (ISSN: 1083-4435), entre otras.

En las ponencias anteriores y en futuras publicaciones se incluirá en el apartado de agradecimientos al IUTA indicando la referencia de este proyecto (SV-24-GIJON-1-04).

Título	Autores	PTT	Congreso	Lugar y fecha
<i>Feasibility of non-contact digitizing for topography characterization of MEX/P parts</i>	Fernando Peña Alejandro Fernández Sofía Álvarez Pablo Zapico Víctor Meana Raúl Marqués Miguel Ángel Viñuela	PTT Oral	<i>Manufacturing Engineering Society International Conference 2025 (MESIC 2025)</i>	Bilbao (ES), 06/2025
<i>Surface Quality Comparison in MEX/P Manufactured Parts Across Different Machines and Process Parameters</i>	Alejandro Fernández Fernando Peña Pablo Zapico David Blanco Pedro Fernández	PTT Oral	<i>Manufacturing Engineering Society International Conference 2025 (MESIC 2025)</i>	Bilbao (ES), 06/2025

Figura 4. Divulgación de los resultados.

Memoria económica:

1. Gastos:

Concepto	Gasto
Personal (IUTA)	4.000 €
Fungibles	100 €
Amortización	3.550 €
Otros (Desplazamientos, Inscripciones a Congresos, etc)	550 €
TOTAL GASTOS	8.200 €

2. Ingresos:

Entidad/Empresa financiadora Ref. Proyecto/Contrato	Concepto	Ingreso
IUTA	Ayuda IUTA: Contratación de personal	4.000 €
Otras entidades / empresas financiadoras		0 €
Financiación propia		4.200 €
TOTAL INGRESOS		8.200 €

Bibliografía:

ISO 21920 - Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile, Organización internacional para la estandarización (ISO), Génova, Suiza, 2021.

ISO 17296 - Additive manufacturing – General principles, Organización internacional para la estandarización (ISO), Génova, Suiza, 2015.

ISO/ASTM 52900 - Additive manufacturing – General principles, Organización internacional para la estandarización (ISO) y Sociedad Estadounidense para pruebas y materiales (ASTM), 2021.

Abas, M., Awadh, M.A., Habib, T., Noor, S., 2023. Analyzing Surface Roughness Variations in Material Extrusion Additive Manufacturing of Nylon Carbon Fiber Composites. *Polymers* 15, 3633. <https://doi.org/10.3390/polym15173633>

Alsoufi, M.S., Elsayed, A.E., 2018. Surface Roughness Quality and Dimensional Accuracy—A Comprehensive Analysis of 100% Infill Printed Parts Fabricated by a Personal/Desktop Cost-Effective FDM 3D Printer. *Mater. Sci. Appl.* 09, 11–40. <https://doi.org/10.4236/msa.2018.91002>

Aslani, K.-E., Vakouftsi, F., Kechagias, J.D., Mastorakis, N.E., 2019. Surface Roughness Optimization of Poly-Jet 3D Printing Using Grey Taguchi Method, in: 2019 International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics & Optimization (ICCAIRO). Presented at the 2019 International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics & Optimization (ICCAIRO), IEEE, Athens, Greece, pp. 213–218. <https://doi.org/10.1109/ICCAIRO47923.2019.00041>

Bechný, V., Czán, A., Holubják, J., Matúš, M., Kozový, P., Timko, P., Beránek, L., 2023. Roughness surface analysis of samples produced by the additive manufacturing process. *Transp. Res. Procedia* 74, 702–708. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.200>

Beniak, J., Križan, P., Šooš, L., Matúš, M., 2018. Roughness and compressive strength of FDM 3D printed specimens affected by acetone vapour treatment. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 297, 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/297/1/012018>

Boschetto, A., Bottini, L., Miani, F., Veniali, F., 2022. Roughness investigation of steel 316L parts fabricated by Metal Fused Filament Fabrication. *J. Manuf. Process.* 81, 261–280. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.077>

Buj-Corral, I., Domínguez-Fernández, A., Gómez-Gejo, A., 2020. Effect of Printing Parameters on Dimensional Error and Surface Roughness Obtained in Direct Ink Writing (DIW) Processes. *Materials* 13, 2157. <https://doi.org/10.3390/ma13092157>

Buj-Corral, I., Sánchez-Casas, X., Luis-Pérez, C.J., 2021. Analysis of AM Parameters on Surface Roughness Obtained in PLA Parts Printed with FFF Technology. *Polymers* 13, 2384. <https://doi.org/10.3390/polym13142384>

Butt, J., Bhaskar, R., Mohaghegh, V., 2022. Investigating the Effects of Ironing Parameters on the Dimensional Accuracy, Surface Roughness, and Hardness of FFF-Printed Thermoplastics. *J. Compos. Sci.* 6, 121. <https://doi.org/10.3390/jcs6050121>

Butt, J., Bhaskar, R., Mohaghegh, V., 2021. Investigating the effects of extrusion temperatures and material extrusion rates on FFF-printed thermoplastics. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 117, 2679–2699. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07850-5>

Caputo, M., Rashwan, O., Waryoba, D., McDade, K., 2022. Surface texture and thermo-mechanical properties of material extruded and ironed polylactic acid. *Addit. Manuf.* 59, 103084. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103084>

Chai, Y., Chen, X.-B., Zhang, D., Lynch, J., Birbilis, N., Qin, Q.-H., Smith, P.N., Li, R.W., 2020. Laser polished fused deposition poly-lactic acid objects for personalized orthopaedic application. *SN Appl. Sci.* 2, 1838. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03637-7>

Chaidas, D., Kitsakis, K., Kechagias, J., Maropoulos, S., 2016. The impact of temperature changing on surface roughness of FFF process. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 161, 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012033>

Dezs, G., Kósa, P., 2012. ROUGHNESS OF PLANE FACES PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING. *Int. J. Eng.*

Downing, D., Rogers, J., Tino, R., Elambasseril, J., Wallbrink, C., Qian, M., Brandt, M., Leary, M., 2023. A virtual stylus method for non-destructive roughness profile measurement of additive manufactured lattice structures. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 125, 3723–3742. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10865-9>

García-Martínez, F., Carou, D., De Arriba-Pérez, F., García-Méndez, S., 2023. Toward data-driven research: preliminary study to predict surface roughness in material extrusion using previously published data with machine learning. *Rapid Prototyp. J.* 29, 1640–1652. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2023-0028>

Gupta, A.K., Krishnanand, Taufik, M., 2022. The effect of process parameters in material extrusion processes on the part surface quality: A review. *Mater. Today Proc.* 50, 1234–1242. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.110>

Hasdiansah, H., Yaqin, R.I., Pristiansyah, P., Umar, M.L., Priyambodo, B.H., 2023. FDM-3D printing parameter optimization using taguchi approach on surface roughness of thermoplastic polyurethane parts. *Int. J. Interact. Des. Manuf. IJIDeM* 17, 3011–3024. <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01304-w>

Hawthorn, B., Mummery, A., Mahmoodi, N., Farhan Khan, M., Triantaphyllou, A., Dyson, R.J., Thomas-Seale, L.E.J., 2024. Tailoring surface roughness through the temporal variation of additive manufacturing process parameters. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 132, 3553–3566. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13532-9>

Jakupi, K., Dukovski, V., Hodolli, G., 2023. Surface Roughness Modeling of Material Extrusion PLA Flat Surfaces. *Int. J. Polym. Sci.* 2023, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2023/8844626>

Jiang, S., Hu, K., Zhan, Y., Zhao, C., Li, X., 2022. Theoretical and Experimental Investigation on the 3D Surface Roughness of Material Extrusion Additive Manufacturing Products. *Polymers* 14, 293. <https://doi.org/10.3390/polym14020293>

Kandananond, K., 2022. Surface Roughness Reduction in A Fused Filament Fabrication (FFF) Process using Central Composite Design Method. *Prod. Eng. Arch.* 28, 157–163. <https://doi.org/10.30657/pea.2022.28.18>

Lavecchia, F., Guerra, M.G., Galantucci, L.M., 2022. Chemical vapor treatment to improve surface finish of 3D printed polylactic acid (PLA) parts realized by fused filament fabrication. *Prog. Addit. Manuf.* 7, 65–75. <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00213-2>

Li, Z., Zhang, Z., Shi, J., Wu, D., 2019. Prediction of surface roughness in extrusion-based additive manufacturing with machine learning. *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 57, 488–495. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.01.004>

Lin, Z., Jiang, T., Kinsella, J.M., Shang, J., Luo, Z., 2021. Assessing roughness of extrusion printed soft materials using a semi-quantitative method. *Mater. Lett.* 303, 130480. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130480>

Lužanin, O., Movrin, D., Plan, M., 2013. Experimental investigation of extrusion speed and temperature effects on arithmetic mean surface roughness in FDM-built specimens. *J. Technol. Plast.* 38.

Mathew, A., Kishore, S.R., Tomy, A.T., Sugavaneswaran, M., Scholz, S.G., Elkaseer, A., Wilson, V.H., John Rajan, A., 2023. Vapour polishing of fused deposition modelling (FDM) parts: a critical review of different techniques, and subsequent surface finish and mechanical properties of the post-processed 3D-printed parts. *Prog. Addit. Manuf.* 8, 1161–1178. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00391-7>

Mendricky, R., Fris, D., 2020. Analysis of the Accuracy and the Surface Roughness of FDM/FFF Technology and Optimisation of Process Parameters. *Teh. Vjesn. - Tech. Gaz.* 27. <https://doi.org/10.17559/TV-20190320142210>

Mushtaq, R.T., Iqbal, A., Wang, Y., Cheok, Q., Abbas, S., 2022. Parametric Effects of Fused Filament Fabrication Approach on Surface Roughness of Acrylonitrile Butadiene Styrene and Nylon-6 Polymer. *Materials* 15, 5206. <https://doi.org/10.3390/ma15155206>

Núñez, L., Downey, C.M., Van Rooyen, I.J., Charit, I., Maughan, M.R., 2024. Analysis of surface roughness in metal directed energy deposition. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13587-8>

Radhwan, H., Shayfull, Z., Farizuan, M.R., Effendi, M.S.M., Irfan, A.R., 2019. Optimization parameter effects on the quality surface finish of the three-dimensional printing (3D-printing) fused deposition modeling (FDM) using RSM. Presented at the APPLIED PHYSICS OF CONDENSED MATTER (APCOM 2019), Strbske Pleso, Slovak Republic, p. 020155. <https://doi.org/10.1063/1.5118163>

Raj Mohan, R., Venkatraman, R., Raghuraman, S., 2021. Experimental analysis on density, micro-hardness, surface roughness and processing time of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) through Fused Deposition Modeling (FDM) using Box Behnken Design (BBD). *Mater. Today Commun.* 27, 102353. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102353>

Rossi, A., Moretti, M., Senin, N., 2021. Layer inspection via digital imaging and machine learning for in-process monitoring of fused filament fabrication. *J. Manuf. Process.* 70, 438–451. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.057>

Saad, M.S., Nor, A.M., Baharudin, M.E., Zakaria, M.Z., Aiman, A.F., 2019. Optimization of surface roughness in FDM 3D printer using response surface methodology, particle swarm optimization, and symbiotic organism search algorithms. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 105, 5121–5137. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04568-3>

Selvam, A., Mayilswamy, S., Whenish, R., Naresh, K., Shanmugam, V., Das, O., 2022. Multi-objective optimization and prediction of surface roughness and printing time in FFF printed ABS polymer. *Sci. Rep.* 12, 16887. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20782-8>

Taşcıoğlu, E., Kitay, Ö., Keskin, A.Ö., Kaynak, Y., 2022. Effect of printing parameters and post-process on surface roughness and dimensional deviation of PLA parts fabricated by extrusion-based 3D printing. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 44, 139. <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03429-7>

Turner, B.N., Gold, S.A., 2015. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyp. J.* 21, 250–261. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2013-0017>

Vidakis, N., David, C., Petousis, M., Sigris, D., Mountakis, N., Moutsopoulou, A., 2022. The effect of six key process control parameters on the surface roughness, dimensional accuracy, and porosity in material extrusion 3D printing of polylactic acid: Prediction models and optimization supported by robust design analysis. *Adv. Ind. Manuf. Eng.* 5, 100104. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100104>

Wang, J.Y., Xu, D.D., Sun, W., Du, S.M., Guo, J.J., Xu, G.J., 2019. Effects of nozzle-bed distance on the surface quality and mechanical properties of fused filament fabrication parts. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 479, 012094. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/479/1/012094>

Wu, D., Wei, Y., Terpenney, J., 2018. Surface Roughness Prediction in Additive Manufacturing Using Machine Learning, in: *Volume 3: Manufacturing Equipment and Systems*. Presented at the ASME 2018 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, College Station, Texas, USA, p. V003T02A018. <https://doi.org/10.1115/MSEC2018-6501>



Yang, L., Li, S., Li, Y., Yang, M., Yuan, Q., 2019. Experimental Investigations for Optimizing the Extrusion Parameters on FDM PLA Printed Parts. *J. Mater. Eng. Perform.* 28, 169–182.
<https://doi.org/10.1007/s11665-018-3784-x>