

## USO DE LA LUZ ESTRUCTURADA PARA LA FABRICACIÓN DE UN RECUBRIMIENTO DE UN TACO DE ESTAMPACIÓN EN CALIENTE MEDIANTE LA TECNOLOGÍA HÍBRIDA

M. Ortiz<sup>1</sup>, N. Alberdi<sup>1</sup>, R. Pacheco<sup>1</sup>, A. Alberdi<sup>1</sup>, P. Ramiro<sup>1</sup>, A. Lamikiz<sup>2</sup>, A. Olaiz<sup>3</sup>, I. Aseginolaza<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Área de Fabricación Avanzada, Tecnalía R&I, Paseo Mikeletegi 7, 20009 Donostia

<sup>2</sup> Dpto. Ingeniería Mecánica, UPV/EHU, Avda. Urquijo s/n, Bilbao

<sup>3</sup> Ibarmia Innovatek S.L., Pol. Ind. Etxesaga s/n, 20720 Azkoitia

<sup>4</sup> Batz S. Coop., Barrio Torrea 2, 48140 Igorre

### RESUMEN

Con el desarrollo del nuevo concepto de máquina híbrida, que combina la fabricación aditiva y sustractiva en la misma máquina, están surgiendo nuevas oportunidades para la automatización de aplicaciones como la reparación de piezas defectuosas o la adición de recubrimientos con propiedades específicas. En estas aplicaciones, se ha detectado la necesidad de utilizar sistemas de medición para conocer la geometría real de las piezas. Entre los diferentes sistemas de medición, la tecnología de luz estructurada presenta muchas ventajas para este proceso: es capaz de medir, con una única captura, piezas de diferentes tamaños y con poca textura, y, además, las condiciones de iluminación apenas afectan a la medición. En este artículo, se presentan diferentes aplicaciones de la tecnología de luz estructurada para la fabricación híbrida.

Además, se describe un ejemplo de la aplicación de esta tecnología, que consiste en la fabricación del recubrimiento de un taco de estampación en caliente. Para ello, se ha empleado la máquina híbrida ZVH 45/1600 Add + Process de Ibarmia.

### ABSTRACT

*With the development of the new concept of hybrid machine, which combines additive and subtractive manufacturing in the same machine, new opportunities for automation of applications such as the repairing of defective parts or the addition of coatings with specific properties are coming out. In these applications, the need for the use of measurement systems has been revealed, in order to know the real geometry of the parts. Among the different measurement systems, the structured light technology presents many advantages for this process: it is capable of measuring parts of different sizes and with low texture in a single capture, and additionally, the lighting conditions barely affect to the measurement. In this article, different applications of structured light technology for hybrid manufacturing are presented.*

*In addition, an example of the application of this technology is also described, which consists in the manufacturing of the coating of a hot stamping die. For this, the ZVH 45/1600 Add+Process hybrid machine from Ibarmia manufacturer has been employed.*

### 1. INTRODUCCIÓN

La fabricación exitosa de piezas en cualquier máquina depende de la precisión en la localización, posicionamiento y control de la geometría de la pieza. La práctica industrial revela que más de la mitad del tiempo se invierte en la programación de la máquina, en el posicionamiento y fijación de la pieza y en el control de la calidad de la misma. Tradicionalmente, la localización de la pieza se realiza o bien diseñando un accesorio

específico sobre el que fijar la pieza para asegurar la ubicación y orientación de las piezas en la máquina (normalmente en producciones de series largas y pocas referencias), o montando la pieza manualmente en un sistema de fijación más general y medir la posición y orientación de una serie de puntos clave (series cortas). Ambos enfoques tienen inconvenientes. En el caso de los utillajes a medida se invierte mucho tiempo en el diseño y aumenta el coste frente a utilizar un utillaje genérico para todas las piezas. En el caso de un sistema de fijación genérico es necesario que los operadores sean expertos y además se necesita un tiempo considerable para fijar cada pieza.

La solución a estos problemas y que cada vez está más extendida, es la integración de sistemas de medición y/o localización automática en las herramientas de la propia máquina. Estos sistemas deben ser capaces de medir ambos, la localización y la forma de la pieza, tal y como ha sido montada y fabricada en la máquina, sin necesidad de fabricar accesorios de fijación a medida y permitiendo colocar la pieza sin tanta exactitud.

Actualmente, el sistema de percepción más utilizado es el *touch probe* o los palpadores [1-3], que pueden medir por contacto directo, la posición y formas de las superficies en el espacio de la máquina con precisión. Existen muchos ejemplos de sistemas basados en palpador integrados en máquina [4-5]. Sin embargo, el uso de estos sistemas no es adecuado cuando la pieza presenta superficies no accesibles debido a las dimensiones del palpador o por presentar oclusiones. Además, todavía no está claro si la precisión del palpador puede verse afectada por las características de rugosidad de la superficie.

Como alternativa a los palpadores de medición por contacto directo, los sistemas ópticos 3D, familia de tecnologías que capturan datos tridimensionales de superficies, son capaces de disponer de alta densidad de la superficie de la pieza en una sola captura [6-7]. Con la información 3D obtenida por el escáner 3D se crea un modelo real de la pieza, tal y como se ha fabricado y montado en la máquina, para dirigir el proceso de localización y planificación de trayectorias basándose en la pieza real en lugar del modelo teórico. Destacan los escáneres de luz estructurada que son sistemas que proyectan patrones de luz codificados conocidos y generan una nube de puntos densa.

En la actualidad, no es común encontrar máquinas integradas con sistemas de escaneado 3D, pero debido a las ventajas que presentan (bajo precio, rapidez y flexibilidad), se sitúan como la opción más adecuada para conseguir el objetivo de automatizar el proceso de localización, posicionamiento y control de la geometría de la pieza. Integrar un sistema de percepción 3D de estas características permite, además, la generación automática de trayectorias sobre la pieza real escaneada, la inspección de las piezas fabricadas y la identificación y localización de zonas desgastadas en piezas para su posterior reparación.

En este contexto, además, con el desarrollo del nuevo concepto de máquina híbrida ZVH Add+Process de Ibarria, que combina la fabricación aditiva por LMD (*Laser Metal Deposition*) y sustractiva en la misma máquina, están surgiendo nuevas oportunidades para la automatización de aplicaciones como la reparación de piezas defectuosas o la adición de recubrimientos con propiedades específicas, con la principal ventaja de no tener que mover la pieza entre diferentes máquinas para realizar los diferentes procesos de fabricación (LMD y mecanizado), que puede ser costoso, especialmente en piezas de gran tamaño. En este tipo de aplicaciones, se ha detectado la necesidad de utilizar sistemas de medición para conocer la geometría real tanto del sustrato, donde se desea aportar el material, así como del material aportado por LMD. Por lo tanto, para el desarrollo del concepto de máquinas híbridas, es necesario integrar los sistemas de medición en la máquina híbrida. Esta integración también puede contribuir a la automatización completa del proceso de posicionamiento y control de la pieza. En este sentido, la tecnología de luz estructurada presenta un gran potencial para este proceso, ya que ofrece ventajas como la capacidad de medir piezas de diferentes tamaños y

con poca textura en una sola captura, y, además, las condiciones de iluminación apenas afectan a la medición

En este trabajo, por un lado, se describe la tecnología de medición 3D por luz estructurada y sus principales aplicaciones en el campo de la fabricación híbrida. Entre ellas, cabe destacar la inspección geométrica de piezas fabricadas por LMD, la identificación o localización de defectos o la reconstrucción de modelos digitales de piezas sobre las que se deben realizar operaciones de aporte. Por otro lado, a modo de ejemplo, se introduce un caso de uso específico de dicha tecnología en fabricación híbrida. En concreto, se define una metodología que combina operaciones de LMD y mecanizado, para la obtención de recubrimientos de altas prestaciones mecánicas sobre tacos de estampación en caliente mediante el uso de la tecnología de luz estructurada. Por último, se propone una metodología para la automatización de la fabricación híbrida.

## **2. DESCRIPCIÓN Y APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA DE MEDICIÓN 3D POR LUZ ESTRUCTURADA EN FABRICACIÓN HÍBRIDA**

La tecnología de luz estructurada forma parte de la familia de sistemas ópticos 3D que responden al enfoque de triangulación activa. Estos sistemas difieren en la naturaleza y forma del patrón de luz proyectado, que puede tomar la forma de un solo punto de luz láser, una línea láser, o un patrón o serie de patrones más complejo producido por un sistema de proyección de vídeo [8-11]. A diferencia de otros sistemas de triangulación activa, como los sistemas basados en líneas láser, que precisan barridos sincronizados del haz de láser, los sistemas de luz estructurada proyectan patrones bidimensionales de luz y los analizan para obtener la información 3D de cada punto simultáneamente sin necesidad de movimiento.

Los sensores de luz estructurada trabajan proyectando una serie de patrones de luz codificados y conocidos sobre la escena a reconstruir. El proyector de patrones se monta desplazado respecto a una cámara que mediante triangulación calcula la posición y forma de los puntos de la superficie del campo de visión. Cuando el patrón colisiona con los objetos de la escena se produce una deformación del patrón. Midiendo la deformación del patrón de luz en la escena, se puede recuperar fácilmente la información de profundidad de los objetos. De esta manera, se genera una nube de puntos 3D densa con la geometría del objeto y se obtiene la localización de la escena en coordenadas del sistema.

Existen diferentes fabricantes de sistemas basados en la tecnología de luz estructurada, hay soluciones comerciales cerradas que generan la nube de puntos y están diseñadas para diferentes dimensiones de objetos, diferentes distancias de trabajo y resoluciones [12-14]. Los parámetros más importantes para seleccionar un sistema de luz estructurada son, la dimensión de las piezas a reconstruir (a mayor área de reconstrucción, menor es la resolución del escáner), las características de la superficie a reconstruir, y la resolución en profundidad requerida. Es necesario definir un compromiso entre la resolución en profundidad (para garantizar la tolerancia requerida) y el tiempo de ciclo. Como ejemplo, para el caso de una pieza de 240 mm de longitud, midiendo a una distancia de un metro, esta tecnología es capaz de identificar defectos de 0,3 mm de tamaño.

En el caso concreto de la fabricación híbrida que combina operaciones de LMD y mecanizado, se han identificado principalmente las siguientes aplicaciones de uso para los sistemas de luz estructurada:

### **2.1. INSPECCIÓN GEOMÉTRICA DE PIEZA FABRICADA POR LMD**

Cuando se fabrica una pieza por LMD, no se conoce la geometría real obtenida. La tecnología de luz estructurada se puede emplear para reconstruir la geometría real obtenida por LMD y compararla con el diseño CAD teórico, identificando desviaciones. Estas desviaciones se

pueden corregir posteriormente añadiendo más material y/o eliminando material mediante procesos de mecanizado.

## **2.2. IDENTIFICACIÓN Y LOCALIZACIÓN DE DEFECTOS**

En aplicaciones de reparación, identificar y localizar los defectos a reparar en la pieza original es de suma importancia, con el objetivo de añadir material en la zona dañada. Mediante sistemas de luz estructurada, es posible reconstruir digitalmente la pieza dañada y compararla con el modelo original, para identificar así la presencia o no de defectos. Además, en caso de detectarse defectos, es posible concretar en qué zona de la pieza están localizados.

## **2.3. RECONSTRUCCIÓN DE MODELO DIGITAL DE PIEZA SOBRE LA QUE SE DEBE REALIZAR OPERACIONES DE APORTE**

En algunos casos, en el campo de la fabricación aditiva, la geometría base sobre la que se debe realizar un aporte no es conocida. Por ejemplo, en la fabricación de moldes y matrices, el diseño de estos puede variar a lo largo del tiempo y es habitual que el diseño CAD no se actualice, y, por lo tanto, no se disponga de él. Si en este tipo de piezas se desea, por ejemplo, añadir material para realizar alguna modificación o reparación o incluso para crear un recubrimiento con propiedades especiales, estas tareas se suelen realizar a mano. Para realizar este proceso de manera automática, es necesario conocer la geometría exacta de la pieza, la cual, se puede reconstruir (modelo digital) mediante la tecnología de luz estructurada. A su vez, este modelo se puede importar en un software CAM, donde se puede tomar como referencia para programar trayectorias de aditivo y/o mecanizado.

El empleo de la tecnología de luz estructurada que se describe en el apartado 4 de este trabajo, es un ejemplo claro de este tipo de aplicación.

## **3. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE LUZ ESTRUCTURADA EN MAQUINA**

### **3.1. MÁQUINA HÍBRIDA ZVH 45/1600 ADD&PROCESS DE IBARMIA**

El trabajo que se presenta en este artículo se ha desarrollado en la máquina híbrida IBARMIA ZVH45/1600 Add+process (Fig. 1-a). Esta máquina multiproceso combina la tecnología LMD con la capacidad de fresado en 5 ejes y torneado (vertical y horizontal). Está equipada con un cabezal laser de Precitec YC52LMD con boquilla coaxial discreta de 4 vías, un alimentador de polvo Sulzer Metco TWIN-10-C y un generador laser Rofin FL030 de 3 kW con una longitud de onda de 1,07  $\mu\text{m}$ .

### **3.2. EQUIPAMIENTO DE LUZ ESTRUCTURADA**

El sistema de luz estructurada empleado en este trabajo está compuesto por una cámara de visión (uEye UI-3360CP) y un proyector led (TI, Texas Instruments) acoplados ambos a un soporte para su integración en máquina (Fig. 1-b). Se trata de un prototipo flexible y reconfigurable diseñado a tal efecto. Las mediciones realizadas se han procesado mediante el software DAVID SL.

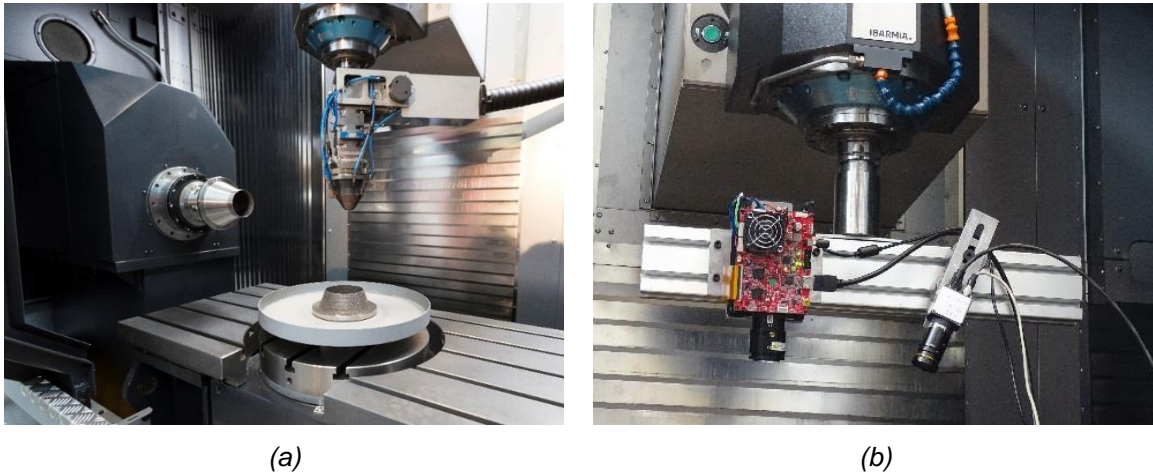


Fig. 1. a) IBARMIA ZVH45/1600 Add+process; b) Integración del Sistema de vision 3D en la máquina

### 3.3. INTEGRACIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE LUZ ESTRUCTURADA EN EL ENTORNO DE LA MÁQUINA

En primer lugar, se ha acoplado el prototipo descrito anteriormente al cabezal de la máquina híbrida (Fig. 1-a). Este prototipo permite variar tanto la distancia entre cámara y proyector como el ángulo de la cámara, permitiendo así medir piezas de diferente tamaño, así como trabajar a resoluciones y distancias diferentes.

Tras la integración, se ha trabajado en la calibración del sistema para establecer la relación entre el control de la máquina y el sistema óptico. El objetivo de la calibración ha sido desarrollar un algoritmo que transforme en coordenadas máquina (*machineTtool* en Fig. 2-a) las coordenadas de la pieza obtenidas con el sistema óptico (*toolTcam* en Fig. 2-a), y de esta manera saber la posición real de la pieza dentro de la máquina. Para ello, se ha utilizado un patrón de calibración tipo chessboard (Fig. 2-b), y teniendo en cuenta las direcciones de los ejes de la máquina, que son conocidas, se ha establecido la relación entre el sistema de visión y las coordenadas máquina, obteniendo el algoritmo deseado. Este algoritmo consiste en una conversión del sistema de referencia, mediante el uso de matrices de cambio de base.

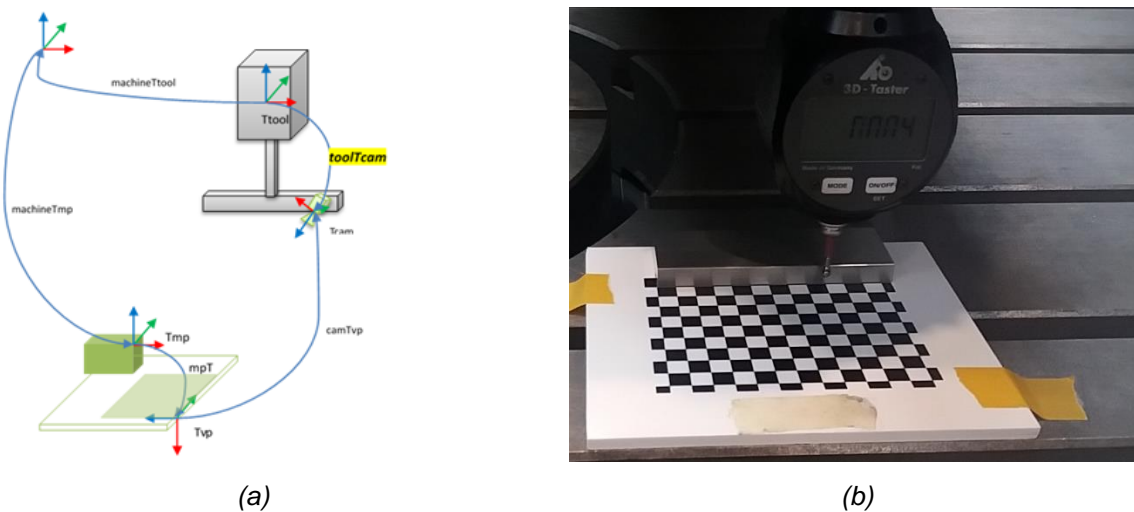


Fig. 2. a) Esquema de sistema de referencia equipo de visión-máquina; b) Medición de las caras de la cala patrón.

Finalmente, se han realizado pruebas para validar la calibración previa. Para ello, mediante el uso del sistema de visión y el algoritmo desarrollado, se ha calculado la posición de un punto del patrón de calibración en coordenadas máquina. Una vez calculada su posición, se ha colocado en el cabezal de la máquina una herramienta especial de punta, y a la máquina se le ha dado la orden de ir a esta posición. Este procedimiento se ha llevado a cabo en diferentes posiciones y configuraciones, para garantizar que las mediciones sean adecuadas en todos los casos.

#### **4. RECUBRIMIENTO DE UN TACO DE ESTAMPACIÓN EN CALIENTE**

En este apartado, se presenta una metodología de fabricación híbrida (LMD + Mecanizado) para la obtención de recubrimientos de altas prestaciones mecánicas sobre tacos de estampación en caliente mediante el uso de la tecnología de luz estructurada. El trabajo se ha realizado sobre un taco de CR7V-L del fabricante BATZ, en el que se desea fabricar un recubrimiento de AISI H13 de 1,5 mm de espesor. En la Fig. 3-a se muestra el taco de estudio donde se especifica, en azul, las superficies sobre las que se desea realizar el recubrimiento.

##### **4.1. AJUSTE DE PARAMETROS**

En primer lugar, se han establecido los parámetros adecuados de aporte por LMD y mecanizado, mediante pruebas en placas planas.

El material base utilizado ha sido la aleación CR7V-L de Kind & Co. Se trata de un acero cromado especial habitualmente empleado en aplicaciones de trabajo en caliente como, por ejemplo, matrices para conformado en caliente de piezas estructurales de automoción. Se caracteriza por poseer una excelente resistencia a alta temperaturas y resistencia al desgaste, además de buena resistencia a fatiga térmica.

El material seleccionado para realizar el recubrimiento ha sido la aleación de acero AISI H13 (DIN 1.2344) del suministrador FST. Se trata de una aleación (Cr-Mo-V) de acero de herramienta con alto nivel de resistencia al choque y fatiga térmica y buena resistencia a la temperatura. Por lo tanto, estas propiedades hacen del AISI H13 un material particularmente valioso para emplear en herramientas de estampación.

Con el objetivo de definir las condiciones de aporte adecuadas para obtener un recubrimiento efectivo de 1,5 mm de espesor sobre el taco de estampación de BATZ, se ha llevado a cabo una serie de experimentos que ha consistido en realizar recubrimientos de AISI H13 sobre placa plana de CR7V-L empleando diferentes combinaciones de potencia láser, velocidad de avance y flujo de polvo. La combinación de parámetros seleccionada ha sido de una potencia láser de 2.500W, una velocidad de avance de 400mm/min, y un flujo de polvo de 17,6g/min. Con esta combinación de parámetros, se obtiene una tasa de aporte o MDR (*Material Deposition Rate*) de 0,61 kg/h, y una tasa de eficiencia de polvo del 58%.

Además, el recubrimiento obtenido se ha mecanizado para analizar la calidad del aporte. En este sentido, se ha verificado que se obtiene un espesor de capa final adecuado (1,5 mm después de mecanizar) sin presencia de poros o faltas de fusión.

##### **4.2. POSICIONAMIENTO Y RECONSTRUCCIÓN 3D DEL TACO EN ESTADO INICIAL**

Para la reconstrucción 3D de la pieza, se ha colocado el taco en la máquina en la posición y con la orientación en la que se realiza el recubrimiento. Esta configuración de pieza en máquina se determina en base a un análisis de limitaciones cinemáticas de la máquina. El objetivo es que el cabezal pueda recubrir todas las superficies deseadas sin necesidad de mover el taco. En este caso, debido a la limitación del eje B a  $\pm 45^\circ$ , el taco se ha colocado en

una posición inclinada. De esta forma, las 2 superficies principales a recubrir quedan orientadas a  $\pm 45^\circ$  de la mesa de la máquina aproximadamente, y, por lo tanto, se asegura que el cabezal de aporte LMD pueda posicionarse en una posición perpendicular respecto a la superficie.

Posteriormente, se ha reconstruido el taco digitalmente con el equipo de luz estructurada. De esta manera, además de obtener el modelo digital del taco, se determina su posición real en el entorno de la máquina (Fig. 3-b).

La reconstrucción de la pieza se ha comparado con la geometría teórica de la pieza (CAD), y se ha observado una desviación de 1,32mm de media en una de las caras del taco (Fig. 3-c).

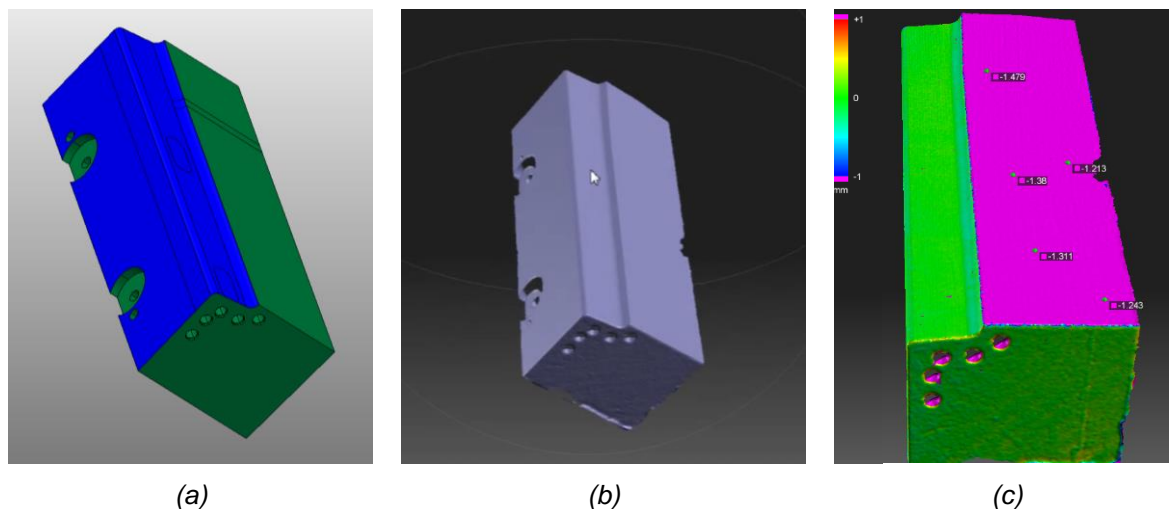


Fig. 3. a) modelo teórico (CAD) del taco de estampación en caliente de BATZ; b) reconstrucción digital del taco en máquina mediante luz estructurada; c) Comparativa entre el modelo teórico y el real.

#### 4.3. PROGRAMACIÓN DE TRAYECTORIAS DE RECUBRIMIENTO

El modelo digital del taco se ha importado en el software CAM PowerMill de Autodesk, donde se ha utilizado como referencia para generar las trayectorias de aporte sobre las zonas deseadas.

El recubrimiento se ha programado en 4 secuencias diferentes como se muestra en la Fig. 4. En todos los casos se ha utilizado el mismo paso lateral, el cual define el solapamiento entre cordones. La programación se ha realizado de tal manera que la herramienta avanza perpendicularmente a la superficie en todas las zonas.

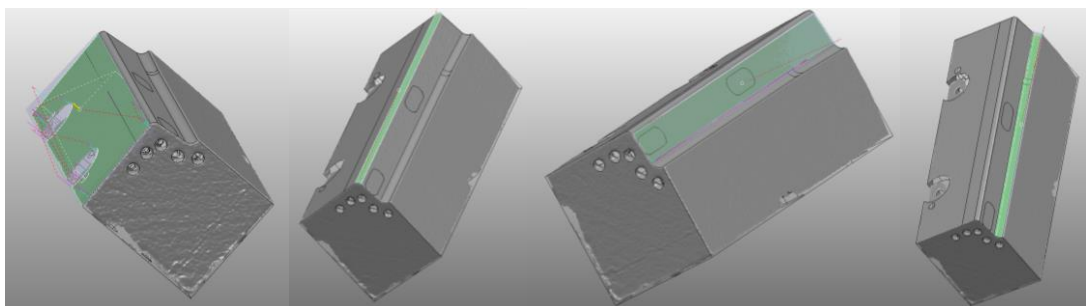
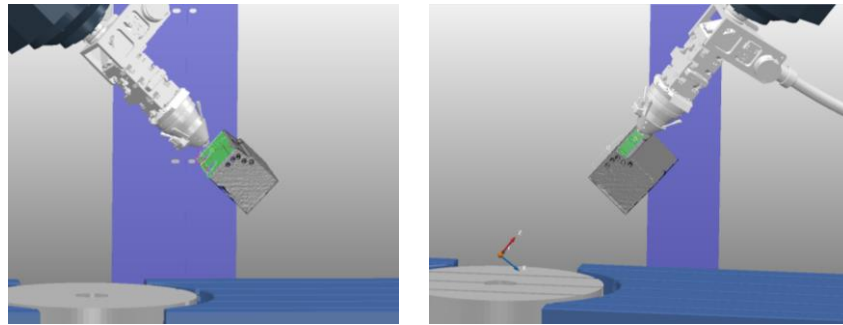


Fig. 4. Secuencias de aporte programadas en PowerMill.

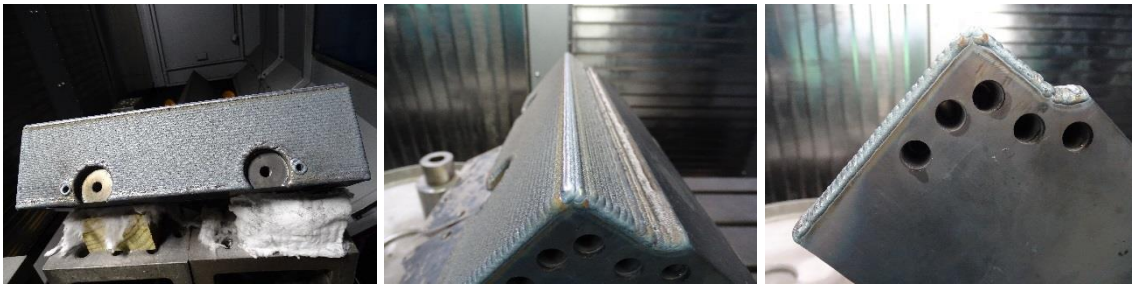
Posteriormente, se han simulado las trayectorias programadas para verificar la correcta ejecución de las mismas, y para comprobar que no ocurren colisiones.



*Fig. 5. Simulación del aporte programado en PowerMill.*

#### **4.4. APORTE DE RECUBRIMIENTO DE AISI H13 POR LMD**

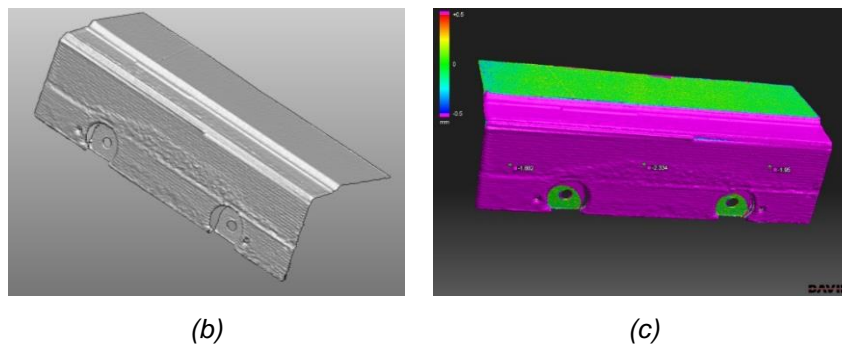
Las trayectorias programadas en PowerMill, se han ejecutado directamente en la máquina sobre el taco empleando los parámetros definidos previamente en placa plana, obteniendo así el taco con el recubrimiento de alta dureza (Fig. 6).



*Fig. 6. Recubrimiento de AISI H13 sobre taco de CR7V-L.*

#### **4.5. RECONSTRUCCIÓN 3D DEL RECUBRIMIENTO Y COMPARATIVA CON TACO EN ESTADO INICIAL**

El recubrimiento realizado se reconstruye en máquina con el equipo de luz estructurada para obtener su modelo digital. Este modelo se compara con el modelo digital del taco inicial sin recubrimiento para determinar la cantidad (espesor) de material aportado mediante LMD. De esta manera, se cuantifica también la cantidad de material que se debe eliminar (mecanizar) para alcanzar el espesor del recubrimiento objetivo, es decir, 1,5 mm.



*Fig. 7. a) Reconstrucción digital de recubrimiento de AISI H13 sobre taco de CR7V-L; b) comparativa con modelo digital del taco en estado inicial.*



#### 4.6. MECANIZADO DEL RECUBRIMIENTO HASTA ESPESOR OBJETIVO

Finalmente, con la medición del recubrimiento realizado, se han programado las trayectorias de mecanizado y se ha mecanizado la pieza hasta obtener un espesor de recubrimiento de 1,5 mm.



*Fig. 8. Taco mecanizado hasta espesor efectivo de 1,5 mm.*

#### 5. METODOLOGÍA PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE LA FABRICACIÓN HÍBRIDA

En el apartado anterior, se ha aplicado el sistema de visión 3D para la medición en máquina de la geometría de un taco de estampación en caliente, con lo que se ha validado el concepto de medición en máquina. Para la industrialización de esta solución y la integración de la etapa de medición en el concepto de máquina híbrida, se debe automatizar este proceso de medición. Para ello, se propone la siguiente metodología:

1. Medición de la pieza de partida fuera de máquina, y reconstrucción del modelo digital de la pieza.
2. Programación de trayectorias de LMD y de mecanizado, tomando como referencia el modelo digital reconstruido en la etapa anterior, y posicionando la pieza en una posición deseada y teórica de la máquina.
3. Posicionamiento real de la pieza en máquina en la posición deseada.
4. Medición de la posición real de la pieza en máquina, mediante el sistema de luz estructurada.
5. Ajuste automático de las trayectorias LMD programadas en la etapa 2, a la posición real de pieza.
6. Ejecución de las trayectorias LMD ajustadas a la posición real.
7. Medición del aporte realizado y comparativa con el CAD.
8. Ajuste automático de las trayectorias de mecanizado programadas en la etapa 2, teniendo en cuenta la medición del aporte realizado.
9. Ejecución del proceso de mecanizado.
10. Medición y verificación final de pieza

La ventaja de la metodología propuesta, es que durante las etapas 1 y 2, la máquina no está ocupada por la pieza, lo que permite aumentar la productividad de la máquina. Por otro lado, a partir de la etapa 3, la fabricación híbrida se realiza de forma automática.

#### 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este trabajo se ha presentado la integración y calibración de un sistema visión 3D basado en la tecnología de luz estructurada en una máquina híbrida del fabricante Ibarria que combina el proceso LMD con el mecanizado. Esta integración, permite la medición y la localización de piezas en máquina. Como aplicación de esta integración, se ha propuesto la fabricación de un recubrimiento de altas prestaciones en un taco de estampación en caliente. Este sistema, ha permitido medir la geometría exacta del taco de estampación, para poder así generar unas trayectorias de aporte de material que se ajusten a la geometría real de la pieza, y, por lo tanto, poder fabricar un aporte sin defectos.

Este trabajo propone como línea futura la automatización de la etapa de medición mediante la metodología que se propone en el apartado 5 de este artículo. Además de esta metodología, también se deben desarrollar sistemas de visión que sean capaces de trabajar como una herramienta adicional en los centros de mecanizado.

### **AGRADECIMIENTOS**

Los autores de este trabajo quieren agradecer al ministerio de economía y competitividad por la financiación del Proyecto ADDICLEAN (ref. RTC-2015-4194-5), a la comisión europea por la financiación del proyecto PARADISE (ref. 723440), que es una iniciativa de “Photonics and Factories of the Future Public Private Partnership”, y a la Viceconsejería de Tecnología, Innovación y Competitividad del Gobierno Vasco, por la financiación del proyecto ADDISEND (ref. kk-2018/00115) dentro del programa Elkartek 2018.

### **REFERENCIAS**

- [1] McMurtry DR (1979) Contact-sensing probe, U.S. Classification: US4301338A International Classification: G01B7/012
- [2] McMurtry DR (1982) Coordinate measuring machine. U.S. Classification: US4333238A International Classification: G01B11/005
- [3] Renishaw (2014a) Renishaw – Probing systems and software. Disponible en: <http://www.renishaw.com/en/probing-systems-and-software--12466>
- [4] Sahoo KC, Menq C-H (1991) Localization of 3-D objects having complex sculptured surfaces using tactile sensing and surface. J Eng Ind 113:85
- [5] Zurbrick JohnR, Kelley JR (1984) Tool touch probe method of precision machining. U.S. Classification: 700/160; 318/572; 408/11; 702/56; 702/97 International Classification: G06F 1546
- [6] Chen F, Brown GM, Song M (2000) Overview of three dimensional shape measurement using optical methods. Opt Eng 39(1):10–22
- [7] Blais F (2004) Review of 20 years of range sensor development. J Electron Imaging 13(1)
- [8] Jarvis RA (1983) A perspective on range finding techniques for computer vision. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell 2:122–139
- [9] Besl PJ (1988) Active, optical range imaging sensors. Mach Vis Appl 1(2):127–15220. Rocchini CMPPC, Cignoni P, Montani C, Pingi P, Scopigno R
- [10] (2001) A low cost 3D scanner based on structured light. In: computer graphics forum, vol. 20, pp 299–308. Wiley Online Library
- [11] Forest J, Salvi J (2002) A review of laser scanning three dimensional digitisers. In: IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems, 2002, vol. 1, pp 73–78

- [12] ZEISS COMET SYSTEM. Disponible en: <http://optotechnik.zeiss.com/en/products/3d-scanning/fringe-projection?ref=zeissimt>
- [13] NUB3D. Disponible en: <http://www.nub3d.com/metrology-system/3d-scanners/sidioneo/>
- [14] FARO Cobalt Array Imager. Disponible en: <https://www.faro.com/es-es/productos/metrologia-industrial/faro-cobalt-array-imager/>
- [15] PhoXi. Disponible en: [http://www.photoneo.com/product-showcase/phoxi\\_3d\\_scanners/](http://www.photoneo.com/product-showcase/phoxi_3d_scanners/)