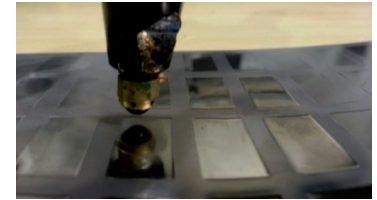


Mejora de la calidad superficial de piezas conformadas incrementalmente mediante la aplicación del bruñido hidrostático



Improvement of the surface quality of incrementally formed parts by means of hydrostatic ball burnishing



Ariadna Gil-Vildósola¹, Adrián Rodríguez-Ezquerro², Mariluz Penalva-Oscoz³, Mikel Ortiz-Edesa³, Luis-Norberto López-de-Lacalle-Marcaide^{2,4} y Ederne Iriondo-Plaza⁴

¹ Metal Estalki. Industrial Ugaldeguren II, parcela 16 – Nave 2 – 48170 Zamudio, Vizcaya (España).

² Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica. Parque Tecnológico de Bizkaia, Ed. 202 – 48170 Zamudio, Vizcaya (España).

³ Tecnalia. Parque Científico y Tecnológico de Gipuzkoa. Mikeletegi Pasealekua, 1-3 – 20009 San Sebastián, Guipuzkoa (España).

⁴ UPV/EHU. ETSII Bilbao. Dpto. de Ingeniería Mecánica, Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1 – 48013 Bilbao, Vizcaya (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8839> | Recibido: 11/05/2018 • Inicio Evaluación: 21/05/2018 • Aceptado: 04/09/2018

ABSTRACT

- The research work presented aims to validate the operation of the hydrostatic ball burnishing as a strategy to improve the surface quality of an aeronautical component of Inconel 718, previously shaped by Asymmetric Incremental Sheet Forming (AISF). The combination of both processes, burnishing on AISF, has a very high level of innovation and is a pioneer in its application on an industrial component made of this high performance nickel-chromium alloy. The surface quality of the incrementally shaped component has been studied to subsequently apply a burnishing by means of the hydrostatic ball. The results obtained confirm the feasibility of the proposed strategy, with a reduction in roughness up to 30%, depending on the area treated.
- **Keywords:** Asymmetric Incremental Sheet Forming (AISF), Hydrostatic Ball Burnishing, Inconel 718, Surface finishing and Roughness.

RESUMEN

El trabajo de investigación que se presenta tiene como objetivo la validación de la operación del bruñido de bola hidrostático como estrategia para mejorar la calidad superficial de un componente aeronáutico de Inconel 718, previamente conformado mediante conformado incremental asimétrico, Asymmetric Incremental Sheet Forming (AISF). La combinación de ambos procesos, bruñido sobre AISF, tiene un nivel muy elevado de innovación y es pionero en su aplicación sobre un componente industrial realizado en esta aleación níquel-cromo de alto rendimiento. Se ha estudiado la calidad superficial de un componente conformado incrementalmente para posteriormente aplicar un bruñido de bola hidrostático. Los resultados obtenidos con-

firman la viabilidad de la estrategia propuesta, con una reducción de la rugosidad hasta un 30%, según la zona tratada.

Palabras clave: Asymmetric Incremental Sheet Forming (AISF), Conformado incremental, Bruñido hidrostático, Hydrostatic Ball Burnishing, Inconel 718, Acabado superficial y Rugosidad.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo que persigue este trabajo es validar el uso del bruñido hidrostático de bola para mejorar el acabado superficial de las piezas conformadas mediante *Asymmetric Incremental Sheet Forming* (AISF), reduciendo la rugosidad superficial y manteniendo las especificaciones requeridas por el sector aeronáutico. Es necesario garantizar la integridad superficial de la pieza mediante la combinación de estos dos procesos.

El desplazamiento de los aviones en el aire se consigue gracias a las turbinas que van sujetas a las alas de los aviones. El aire es comprimido y se introduce en las cámaras de combustión, donde el combustible es quemado de forma continua. El aire a alta presión y alta temperatura es llevado a la turbina, donde se expande parcialmente para obtener la energía que permite mover el compresor. El Tail Bearing Housing (TBH) es una pieza estática que se encuentra al final de la turbina de baja presión, Fig. 1(a) [1].

Actualmente, la pieza TBH se realiza sectorialmente mediante fundición a la cera perdida. Posteriormente se realizan pequeñas operaciones de acabado, previo al ensamblaje final (Fig.1(a)). En el presente trabajo se van a conformar los semivanos por AISF (Fig. 1(c)), a continuación, se cortarán por chorro de agua a las medidas precisas y se soldarán entre ellos, formando el vano completo. Una vez que se tengan los vanos, a éstos se soldarán los anillos para conformar el TBH final.

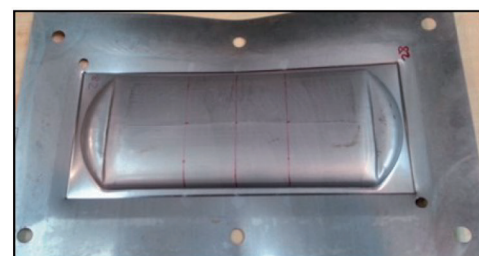
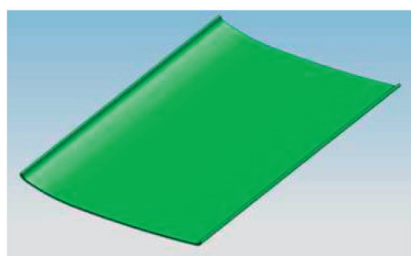


Fig. 1: (a) TBH, (b) geometría de semivano a obtener y (c) pieza conformada mediante AISF de la que se extraerá un semivano.

Para reducir el peso del TBH será fabricada en material Inconel 718. Ésta es una aleación de níquel-cromo de alto rendimiento que ha sido diseñada para resistir un amplio rango de ambientes corrosivos, picaduras y corrosión de rendija. También, muestra unas excepcionales propiedades como la alta resistencia a la fluencia y tensión de rotura a altas temperaturas. El uso de este material predomina en turbinas, aviación, plantas nucleares generadoras de energía, recipientes para tratamiento térmico, entre otros.

Actualmente, el acabado superficial de los vanos de TBH conformados mediante AISF no cumple las especificaciones de rugosidad exigidas. Este proyecto pretende evaluar el efecto de la aplicación de una operación final de bruñido hidrostático con bola sobre la superficie previamente conformada mediante AISF.

1.1. CONFORMADO INCREMENTAL ASIMÉTRICO (AISF)

El AISF, es una tecnología de deformación no convencional que consiste en la deformación plástica localizada y progresiva de la chapa bajo la acción de una herramienta tipo punzón (redondeada) que sigue una trayectoria continua y numéricamente controlada [2].

La primera ventaja de AISF se debe a que se puede realizar sin ningún tipo de matriz por debajo de la chapa o bien utilizando una matriz fabricada en materiales de bajo coste y fáciles de mecanizar tales como la resina o la madera. Esto representa una gran flexibilidad ante cualquier cambio de diseño en la pieza: basta con cambiar la trayectoria de la herramienta y si se trabaja con matriz de apoyo, mecanizar una nueva. El resultado es una importante reducción de costes y del tiempo de proceso asociado al diseño, la fabricación y la puesta a punto de las matrices convencionales [3, 4].

Sin embargo, el proceso de AISF exige tiempos de proceso largos y por este motivo, es adecuado para la fabricación de prototipos o lotes pequeños de pieza para los cuales, los costes y plazos asociados a las matrices resultan inadmisibles.

Existen dos tipos de configuraciones posibles: conformado en negativo (el marco del utillaje está fijo y la herramienta desciende conformando una geometría cóncava) y conformado en positivo (la herramienta conforma una pieza convexa haciendo que el marco se deslice en dirección descendente).

El AISF se puede realizar en cualquier máquina de control numérico, que disponga de al menos 3 ejes y una mesa donde apoyar el utillaje de conformado. El tipo de máquina seleccionada condicionará la geometría y el tamaño de las piezas que se pueden

realizar, así como el espesor máximo de chapa admisible para cada material. En este caso, la máquina utilizada es de tipo Gantry. Se trata del prototipo ATOM de tipo pórtico de 5 ejes con un cabezal que soporta unos esfuerzos axiales máximos de 20 kN y ha sido desarrollado por Tecnalía para conformado incremental. Está equipado con un CNC Siemens 840D.

Para realizar el conformado es necesario sujetar la pieza [5], por lo se utilizará un utillaje que la fija por sus extremos, dejando libre la zona central para poder conformar la pieza. En cuanto a las herramientas, se pueden utilizar dos tipos de herramientas: punzón y rueda. El tipo punzón es el más utilizado y el más simple a la hora de generar trayectorias, siendo su principal desventaja la elevada fricción entre chapa y herramienta, afectando directamente a la calidad superficial de la chapa e incrementando las fuerzas del proceso. Las de tipo rueda requieren del uso de máquina de 5 ejes o robots, por lo que la trayectoria es más compleja, siendo la ventaja que presentan el aumento de la calidad superficial, reduciendo el desgaste que sufre la herramienta.

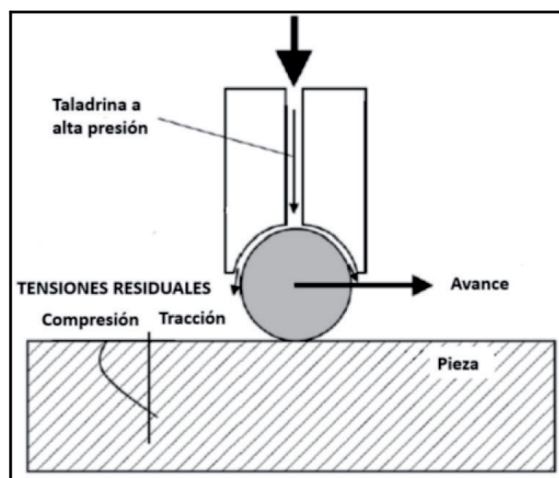
Para aplicar este proceso es preciso tener en cuenta el lubricante [6], que debe garantizar un contacto adecuado entre la herramienta y la chapa evitando la generación de ruido excesivo, desgaste acelerado de la herramienta, deterioro de la calidad superficial de la chapa y el sobrecalentamiento de la chapa. En el presente trabajo se ha utilizado el lubricante EP con 90cST a 40°C.

1.2. BRUÑIDO HIDROSTÁTICO CON BOLA

El bruñido por deformación es un proceso de deformación plástica superficial, constituyendo un método de tratamiento superficial de piezas capaz de mejorar sus propiedades físico-mecánicas [7,8], aprovechando los mecanismos asociados a la plasticidad de las aleaciones mecánicas. Las principales ventajas que presenta son:

- Reducción de la rugosidad, con acabados similares al rectificado.
- Mantenimiento de las tolerancias dimensionales, menores de 0.01 mm.
- Aumento de la dureza superficial de hasta un 60 % en Dureza Brinell, mejorando la resistencia al desgaste.
- Generación de tensiones residuales de compresión en la superficie [Fig. 2(a)], aumentando la vida a fatiga.

El bruñido hidrostático con bola consiste en una herramienta que se monta en un centro de mecanizado, con control numérico,



(a)



(b)

Fig. 2: (a) Principio de bruñido hidrostático con bola [11] y (b) bruñidor hidrostático

junto con una bomba hidráulica que se acopla a la herramienta [Fig. 2(b)] para proporcionar la taladrina a presión, llegando a alcanzar una presión máxima de 40 MPa [9]. La herramienta consta de una bola esférica en la punta que gira libremente y es soportada hidrostáticamente por la presión de la bomba. La bola tiene que ser de un material más duro que la pieza a bruñir, normalmente suele ser de material cerámico o metal duro. Al pasar la herramienta por la superficie de la pieza a bruñir, esta bola va aplastando los picos de la rugosidad, distribuyendo el material sobre los valles, rellenando la superficie y uniformizándola. Esto sucede cuando se supera el límite de fluencia del material en las capas superficiales [10].

La bola que se utiliza comprende los diámetros de 3 a 12 mm, de acuerdo con la superficie a bruñir. Esta bola aparte de girar libremente, también tiene un moviendo libre de 6 mm en la dirección normal a la herramienta.

La principal limitación de este proceso reside en que el ángulo existente entre la normal a la superficie bruñida y el eje de la herramienta debe estar comprendido entre $\pm 28^\circ$. En cambio, cuando al salir de él, se pueden producir daños en la herramienta o en la pieza por colisiones o contactos. En piezas relativamente complejas se suele superar este rango, situación que se puede solucionar realizando el bruñido en un centro de mecanizado de control numérico de 5 ejes, donde se puede mantener de esta forma la herramienta en la perpendicular de la superficie de la pieza. La variación de los parámetros en la ejecución del proceso influye en las propiedades finales que se pretenden obtener, como son las tensiones introducidas en la pieza, la dureza y el acabado super-

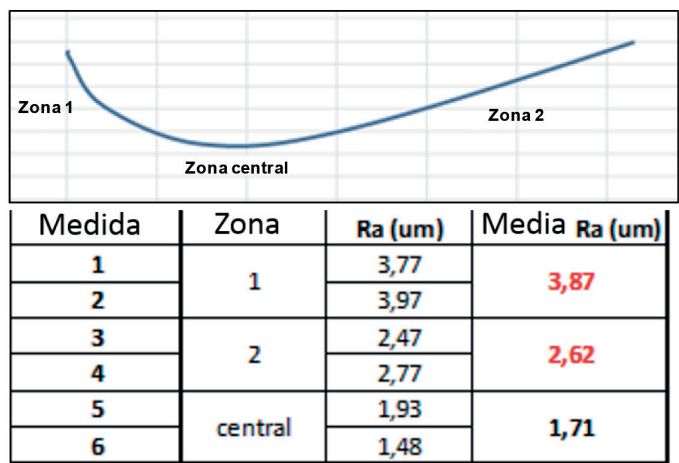


Fig. 3: Valores del acabado superficial de la pieza conformada

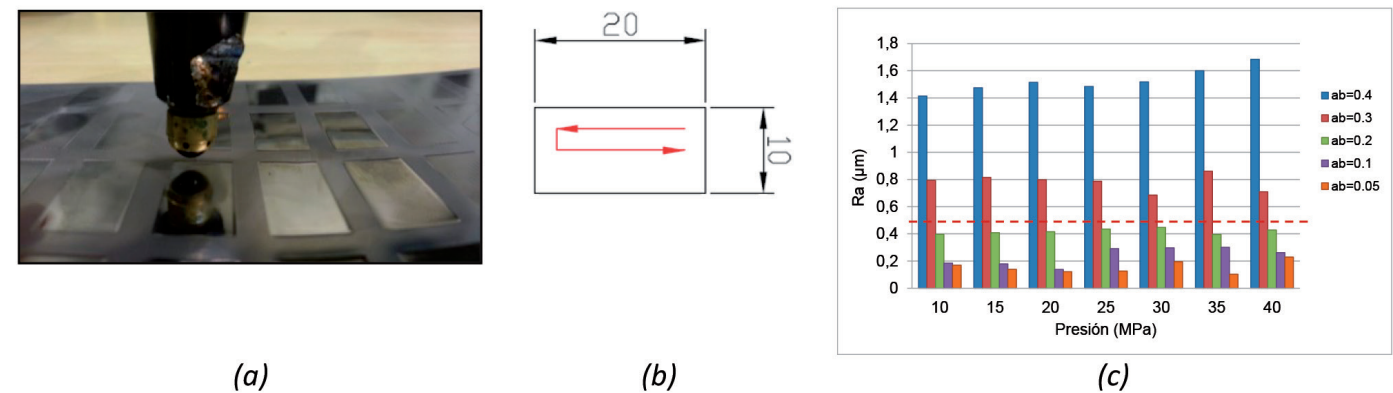


Fig. 4. (a) Acabado espejo en superficies aplicadas el bruñido hidrostático, (b) trayectoria de la herramienta de bruñido y (c) resultados de la medición de rugosidad

ficial. Se han identificado varias publicaciones en las que se han realizado simulaciones del proceso de bruñido mediante bola [12] y rodillo [13], pero en ambos casos se aplica sobre componentes macizos, por lo que los resultados obtenidos no son relevantes para la presente aplicación. Los parámetros más determinantes que se pueden estudiar son:

- Presión del bruñido (MPa). Pudiendo variar entre los 5 y los 40 MPa, ya que está determinada por la bomba hidráulica.
- Anchura de pasada radial de bruñido (ab), es la longitud, perpendicular la dirección del avance, en la que la herramienta ejerce el bruñido sobre el material. A menos anchura de pasada, el acabado superficial será mejor. En cambio, se ve contrarrestado por un aumento del tiempo de realización del proceso.
- Dirección del bruñido. La dirección se observa respecto a la dirección del mecanizado previo del que consta la pieza. Puede ser perpendicular, paralelo o con ángulo.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

A continuación, se introducen los requisitos de diseño a cumplir por el componente estudiado, así como las pautas a llevar a cabo durante la validación experimental.

2.1. REQUISITOS DE DISEÑO

2.1.1 Acabado superficial

El conformado de la pieza se ha realizado por la cara contraria a la cara vista de la pieza tratando de minimizar la rugosidad en la cara vista. Pese a esto, no se cumple con los valores máximos admisibles de rugosidad de 3.2 μm definidos por el cliente, Fig. 3. En la cara vista de la pieza se imprimen unas rayas que se corresponden a la anchura de pasada al realizar el AISF. Aunque se aplique una última pasada de acabado, se ha comprobado que la rugosidad de la cara la imprime la primera pasada con la que se realiza el proceso. Se confirma que la pasada de acabado no es capaz de mejorar la rugosidad existente en la cara vista.

La rugosidad superficial se ha medido con el perfilómetro óptico Leica® DCM 3-D. Se elige un filtro Gaussiano y la longitud de corte (Lc) o Cutoff, será de 2.5 mm.

La longitud de corte es la distancia que se utiliza para diferenciar entre ondulación y rugosidad. Si el espaciado de la desviación es mayor o igual a la longitud de corte, se tratará de ondulación, en cambio, si la distancia es menor, será rugosidad, siendo este último el factor que se quiere estudiar. Para poder realizar la eliminación de la ondulación, es necesario filtrar la señal de la me-

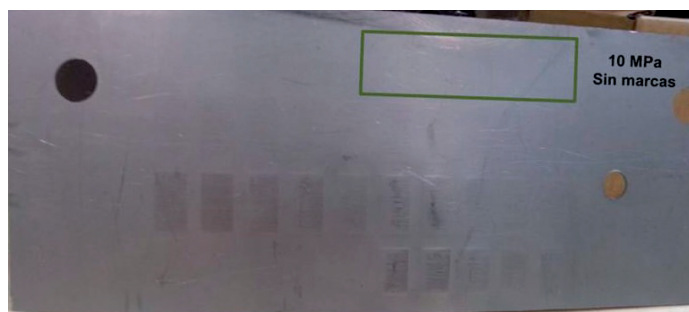


Fig. 5: Superficie posterior de la chapa en la que se muestran marcas de deformación generadas tras el bruñido

dida del perfil, en este caso el filtro Gaussiano, que se basa en un modelo matemático.

El parámetro más utilizado en la medida de rugosidad superficial es R_a , que es la media aritmética de las desviaciones de la curva del perfil con respecto a la línea media de rugosidad básica y aunque existan otros dos parámetros para la caracterización de la calidad superficial (R_t : Altura máxima pico-valle y R_z : Media aritmética de los valores de R_t), R_a va a ser el utilizado como indicador a lo largo de todas las fases del trabajo expuesto.

2.1.2 Espesor

Otro aspecto a tener en cuenta es el mantenimiento de la continuidad del espesor de la pieza. Por ello, tras la aplicación del bruñido hidrostático, se debe confirmar que la pieza sigue manteniendo un espesor uniforme, y si se ve afectado, que se encuentre dentro de las tolerancias exigidas, un 10 % de reducción respecto al espesor final de la chapa.

2.2 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

2.2.1. Estudio preliminar

La validación experimental del uso del bruñido hidrostático con bola se realizará sobre piezas realizadas con AISF de 1 mm, siendo un espesor muy inferior al convencional. Por este motivo, se ha realizado un estudio preliminar sobre una chapa de 1 mm sin deformar, para ver el comportamiento del bruñido en este espesor.

Para poder realizar este proyecto se recurre al sistema de bruñido Ecoroll® que consiste en una bomba hidráulica de alta presión y un cabezal de bruñido (Fig. 4(a)), ambos conectados vía manguera de alta presión. La taladrina utilizada con este equipo es del tipo emulsión (92 % de agua y 8 % de taladrina). Tal y como se puede observar en la Fig. 4(c), los resultados han sido satisfactorios y se ha procedido a continuar con las hipótesis de validación

del bruñido hidrostático para la mejora de la calidad superficial de un componente industrial conformado mediante AISF.

La velocidad a la que se va a realizar el ensayo es la velocidad nominal de 7500 mm/min, ya que van a bruñir pequeñas superficies rectangulares de 10x20 mm. La Fig. 4(b) muestra la dirección de la trayectoria de la herramienta de bruñido. Tras realizar el análisis de los resultados de los ensayos preliminares, el nivel de presión óptimo identificado ha sido el de 10 MPa.

La Fig. 5 muestra la superficie opuesta respecto a la que se ha aplicado el bruñido y en ella se pueden apreciar las marcas generadas por el bruñido en los casos en los que la presión ha superado los 20 MPa. Este efecto puede considerarse como indicador de la presión máxima a aplicar a chapas de espesor de 1 mm.

En una segunda etapa del estudio preliminar se han analizado qué parámetros del proceso de unión entre diferentes secciones es el más adecuado cuando se tiene que realizar el bruñido de una superficie por partes. De los resultados obtenidos se derivan las siguientes conclusiones:

- La mejor unión para realizar la pieza por zonas solapadas es realizando las diferentes zonas una a continuación de la otra y con la misma la trayectoria de bruñido.
- A menor presión, se nota menos la unión entre las diferentes zonas bruñidas.
- A mayor presión, los picos generados por las entradas y salidas de la herramienta de bruñido son mayores.

2.2.2. Puesta a punto del proceso de bruñido con bola

Tras la realización del ensayo preliminar en la chapa sin deformar, se han estudiado diferentes parámetros en la pieza conformada con AISF. Los objetivos que persigue este ensayo son:

- Validar la mejora de la rugosidad tras el bruñido en Inconel 718.
- Comprobar la influencia de la dirección de la trayectoria de bruñido respecto a la dirección de realización del AISF.
- Establecer la ventana de los parámetros del bruñido.
- Validar la utilización de un molde para evitar la deformación de la pieza.

Se fabricó un molde de apoyo (Fig. 6 (b)) capaz de soportar las fuerzas del bruñido y evitar que la pieza se deformara. El molde se fabricó de una resina de encapsulado en frío mezclando el catalizador y la resina, vertiéndola sobre la pieza y dejándola secar.

Una vez que se tienen los parámetros y estrategia de bruñido determinados, se procede a la realización del bruñido en 3 ejes de la superficie de la pieza conformada con AISF.

Los parámetros óptimos deducidos de los ensayos previos son:

- Presión de la bomba (P): 10 MPa.

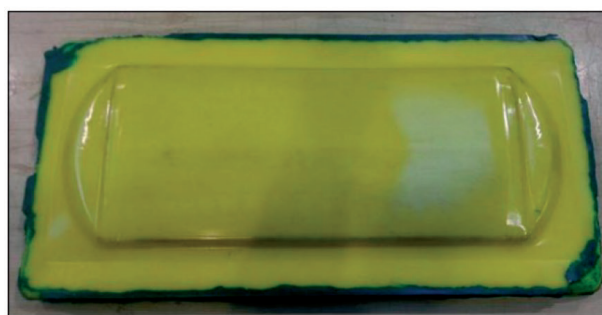
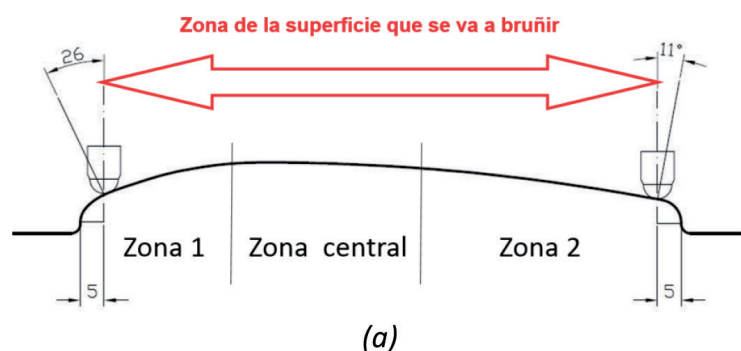


Fig. 6: (a) Perfil limitado por el rango de ángulo de la herramienta de bruñido y (b) molde obtenido con la resina de encapsulado en frío

- Anchura de pasada (ab): 0.1 mm.
- Velocidad: 7000 mm/min.
- Dirección de bruñido: perpendicular a la trayectoria de realización del AISF.

Pese a que los mejores resultados de rugosidad superficial se obtienen con una anchura de pasada de 0.05 mm, se observa que para una anchura de pasada de 0.1 mm, los resultados no diferían mucho de los obtenidos con ab 0.05mm. Además, también hay que tener en cuenta el tiempo del proceso, ya que con ab 0.05 tardaría casi el doble que con ab 0.1. Teniendo en cuenta estos aspectos, se decide realizar el ensayo con ab 0.1 mm, buscando un equilibrio entre la rugosidad superficial y el tiempo de proceso.

A la hora de realizar el bruñido hidrostático, la velocidad no es un parámetro que influya en los resultados. Al ser la primera vez que se ponía a prueba el bruñido sobre la pieza, en el estudio preliminar se trabajaba sobre una chapa plana, se decide adoptar una velocidad de 7000 mm/min, ligeramente inferior a la utilizada previamente.

Para poder realizar el bruñido de toda la superficie de la pieza y mantener el ángulo entre la normal a la pieza y la dirección de la herramienta en el rango de $\pm 28^\circ$, es necesario realizarlo en un centro de mecanizado de 5 ejes. Como no se dispone de este tipo de centro de mecanizado, se va a realizar con otro de 3 ejes, por lo que se tendrá en cuenta esta limitación, y la superficie elegida quedará dentro del límite indicado en la Fig. 6(a).

Durante la realización del bruñido sobre la pieza se observó que la velocidad elegida de 7000 mm/min era adecuada, e incluso algo lenta, por lo que se optó, a mitad de la pieza, subir esa velocidad a 9000 mm/min.

Teniendo en cuenta estos aspectos, y que, durante el inicio del bruñido, se estuvo controlando el proceso con el potenciómetro, los tiempos obtenidos para la realización de un semivano son:

- Bruñido a 7000 mm/min: 30 min
- Bruñido a 9000 mm/min: 20 min

La duración máxima para la realización del bruñido en la superficie de la pieza es de 1 hora. Una vez que el proceso esté perfeccionado, y según en qué centro de mecanizado se realice, estos tiempos se pueden reducir, aumentando la velocidad (a la velocidad máxima que pueda alcanzar la máquina), y mejorando la superficie de bruñido necesaria.

3. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos durante la evaluación experimental.

3.1. RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Se procede al estudio de los resultados obtenidos con el perfilómetro óptico Leica® DCM 3-D. Las medidas fueron realizadas con una longitud de corte de 2.5 mm. Debido al proceso de conformado de la pieza, ésta tiene diferentes valores de rugosidad superficial a lo largo del eje X. Además, a lo largo del eje Y, la superficie no es lineal, como se muestra en la Fig. 7, el centro presenta cierto nivel de concavidad. Por ello, la superficie bruñida se divide en nueve áreas, realizándose las medidas en cada una de las zonas. Como el bruñido se está realizando de forma perpendicular a la trayectoria del AISF, las medidas se realizaron en ambos sentidos:

- Eje X:
 - Sentido de realización del bruñido.
 - En esta dirección se mide la rugosidad superficial originada por el AISF.
- Eje Y:
 - Sentido de realización del AISF.
 - En esta dirección se mide la rugosidad superficial originada por el bruñido.

La Fig. 7 muestra los resultados de las mediciones de rugosidad (eje X) y la evolución que han tenido estas antes y después de aplicarse el bruñido con bola.

En la Fig. 7 se muestran los valores de R_a y se observa que existe una reducción de la rugosidad generalizada al aplicar el bruñido. La evolución del acabado superficial varía según la zona de la chapa y comparando estos valores con la rugosidad superficial original de la pieza, se llega a obtener una rugosidad del 30 % en el sentido del eje X (con respecto a la rugosidad tras el conformado AISF). Es preciso recordar que

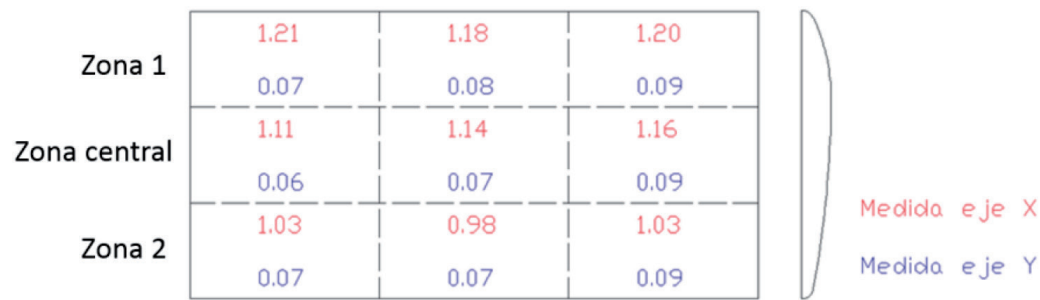
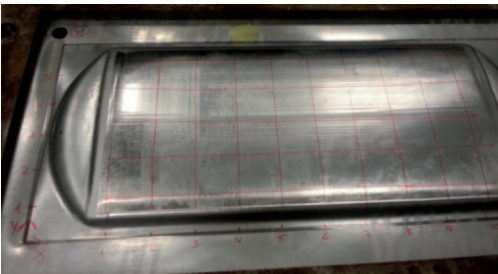


Fig. 7: Valores de la rugosidad superficial en cada una de las 9 zonas analizadas



Medición de espesores (mm) en la pieza conformada										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	0.91	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.96
4	0.94	0.97	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.96	0.96
3	0.93	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.96	0.96
2	0.96	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98
1	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

Fig. 8. (a.) Pieza marcada y referenciada para su medición y (b) resultados de la medición de espesores (mm)

por norma ISO 4287, la rugosidad de una superficie lo marca la rugosidad más desfavorable, que en este caso es de $1.21\ \mu\text{m}$. La rugosidad obtenida tras el bruñido en el eje Y es de $0.08\ \mu\text{m}$, que se considera despreciable frente a la rugosidad superficial medida en su dirección perpendicular.

3.2. ESPESOR DE LA PIEZA

Para medir el espesor de la pieza en toda la superficie bruñida, se realizaron 50 medidas del espesor distribuidas equitativamente a lo largo de toda la superficie Fig. 8(a). Una vez que se tiene definida la distribución para realizar las mediciones, se procede a traspasar este plano a la superficie de la pieza para continuar después con su medición, obteniendo los valores que se representan en la Fig. 8(b).

De entre los resultados obtenidos tras las mediciones se puede destacar que el adelgazamiento ha sido bastante uniforme excepto en el extremo izquierdo y es debido a la geometría de la pieza. Además, se observa que todos los valores de las mediciones son menores de 1 mm [Fig. 8 (b)]. Este valor es razonable, ya que la chapa inicial de la que se parte para realizar el conformado es de 1 mm, al realizar el AISF se aumenta la superficie de la chapa, por lo que el espesor se tiene que ver reducido y el adelgazamiento sufrido es aceptable debido a que el punto de medición que presenta el espesor mínimo ($0,91\ \text{mm}$) no supera el límite del 10% exigido.

4. CONCLUSIONES

Una vez finalizado el presente trabajo de investigación, se concluye que la utilización del bruñido hidrostático como estrategia o complemento para la mejora del acabado superficial sobre piezas realizadas con AISF es factible.

El subobjetivo que persigue este proyecto es el de definir la ventana del proceso para la aplicación del bruñido hidrostático sobre piezas conformadas mediante AISF:

- Presión (P): 10 MPa.
- Anchura de pasada (ab): 0.1 mm.
- Dirección de bruñido: Perpendicular a la trayectoria del conformado.

Con estos valores se obtienen los siguientes resultados:

- Tiempo máximo de realización: 1 hora.
- Rugosidad superficial: $R_a=1.21\ \mu\text{m}$, desciende a un 30 % respecto a la rugosidad tras el conformado AISF y es considerablemente menor al $3,2\ \mu\text{m}$ requerido.
- Espesor medio de la pieza: 0.98 mm (dentro de tolerancias).

La rugosidad superficial mejora al reducir la anchura de la pasada y aumentar la presión de bruñido. La presión para la aplicación del bruñido hidrostático sobre piezas conformadas mediante AISF con espesor de 1 mm, debe ser inferior a 15 MPa. Si la presión supera los 15 MPa, existe el riesgo de generar deformaciones a más profundidad que la superficie.

Los resultados obtenidos confirman que el espesor de la chapa no se ve afectado por la aplicación del bruñido hidrostático en su superficie y los espesores finales entran dentro de las especificaciones requeridas. Para finalizar, es preciso puntualizar que es necesario crear un molde y posicionarlo en la parte inferior de la pieza, para que soporte las fuerzas del bruñido y evitar que la pieza sufra mayores deformaciones que las aplicadas superficialmente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Lundbäck A. "Finite Element Modelling and Simulation of Welding of Aerospace Components". Luleå University of Technology (Sweden). 2003. ISSN: 1402 – 1757.
- [2] Rubio A, Penalva M, Granados S et al. "Methodology to identify the suitability of new materials for Asymmetric Incremental Sheet Forming". IDDRG 2011 Conference Proceedings, Bilbao.
- [3] Ortiz M, Penalva ML, Puerto MJ, et al. "Hot Single Point Incremental Forming of Ti-6Al-4V Alloy". Key Engineering Materials. 2014. Vol. 611–612 p. 1079–1087. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.1079>
- [4] Dufflou JR, Callebaut B, Verbert J, et al. "Laser Assisted Incremental Forming: Formability and Accuracy Improvement". CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2007. Vol. 56 p. 273–276. ISSN: 0007-8506
- [5] Taleb-Araghi B, Manco GL, Bambach M, et al. "Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming". CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2009. Vol. 58 p. 225–228. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.101
- [6] Lu B. "Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool". International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2014. Vol. 85 p. 14–29. 10.1016/j.ijmachtools.2014.04.007
- [7] Lopez-de-Lacalle L N, Lamikiz A, Muñoa J, et al. "Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing". International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2005. Vol. 45 p.1659–1668. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.03.007>
- [8] Lopez-de-Lacalle L N, Lamikiz A, Sánchez J A, et al. "The effect of ball burnishing on heat-treated steel and Inconel 718 milled surfaces". International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007. Vol. 123(2) p. 292–302. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0402-5>
- [9] Rodríguez A, López de Lacalle L N, Celaya A, et al. "Aplicación del bruñido con bola para el acabado de superficies complejas en máquinas multieje". Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco. 2010.
- [10] R. Aviles, J. Albizuri, A. Rodríguez, et al. "Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel". International Journal of Fatigue. 2013. Vol. 55 p. 230–244. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.06.024>
- [11] Prevéy PS, Cammett J. "Low cost corrosion damage mitigation and improved fatigue performance of low plasticity burnished 7075-T6". Journal of Materials Engineering Performance. 2001. Vol. 10 p. 548–555.
- [12] Sayahi M, Sghaier M, Belhadjsalah H. "Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Vol. 67 p. 1665–1673.
- [13] Yen Y C, Sartkulvanich P, Altan T. "Finite Element Modeling of Roller Burnishing Process". CIRP Annals. 2005. Volume 54 p 237–240. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60092-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60092-4)