

## Comparativa del proceso de bruñido con bola en máquinas de 3 y 5 ejes en piezas de aluminio A92017 y A96351

J.A. Travieso Rodríguez <sup>(1)</sup>, A. Sánchez Egea <sup>(1)</sup>, A.E. Nápoles Alberro <sup>(1)</sup>,  
J.L. Huertas Talón <sup>(2)</sup>, G. Gómez Gras <sup>(1)</sup>, H.A. González Rojas <sup>(1)</sup>

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universitat Politècnica de Catalunya  
antonio.travieso@upc.edu

(2) Dpto. de Ingeniería de Diseño y Fabricación. Universidad de Zaragoza

---

*La fuerte competencia y exigencias del mercado en la industria general y concretamente en el ámbito de la fabricación mecánica hacen cada vez más necesario el uso de tecnologías avanzadas y el estudio de métodos de trabajo más efectivos y precisos. En este sentido, el mecanizado de superficies con geometrías complejas se ve claramente afectado, ya que la mayor parte de componentes mecánicos, especialmente en los sectores de la automoción, aeroespacial, de los moldes y las matrices, están diseñados con alguna superficie difícil de tratar por los sistemas habituales de fabricación, como el rectificado, además de exigir un elevado grado de calidad superficial y unas buenas propiedades mecánicas. Estas dificultades se pueden solventar mediante un proceso de bruñido con bola.*

*En este trabajo se estudiarán las aplicaciones de este proceso para el mecanizado de superficies complejas partiendo de una serie de experimentos que se realizarán sobre probetas cóncavas y convexas de dos aluminios, A92017 y A96351. Para ello, se han bruñado las piezas en dos fresadoras CNC una de 3 ejes y otra de 5 ejes. El objetivo de este artículo es comparar los resultados obtenidos tras el mecanizado en ambas máquinas, donde la relación de perpendicularidad entre la aplicación de la fuerza de bruñido y la superficie de la pieza cambia. Las circunstancias cinemáticas no afectan el poder utilizar la herramienta de bruñido en ningún caso puesto que se bruñen superficies pequeñas para que esto no sea una limitación. A partir de aquí se recomiendan valores óptimos de los parámetros a utilizar así como una estrategia de procesado. Se concluye que los resultados de la rugosidad superficial obtenidos con el proceso de bruñido realizado en la máquina de 5 ejes son al menos un 30% mejor respecto a una máquina de 3 ejes.*

---

### 1. INTRODUCCION

La calidad superficial de los componentes mecánicos es de vital importancia hoy en día, dada la gran demanda del mercado en cuanto a estética, precisión y prestaciones mecánicas. Las características estéticas, que hace unos años se encontraban en un segundo plano, son hoy uno de los principales motivos de compra en cualquier sector del mercado. El cambio ha sido posible debido principalmente al avance de las tecnologías informáticas, que también han revolucionado el sector del diseño y la fabricación mecánica. Con este avance industrial lo que hasta hace poco tiempo era impensable mecanizar, sirviéndose únicamente de la pericia de los operarios, hoy en día es relativamente sencillo de conseguir a través del diseño en CAD y su posterior programación en CAM.

En uno de los aspectos en que los procesos actuales de fabricación han evolucionado es que garantizan acabados superficiales de gran calidad. Estas mejoras se consiguen de manera relativamente fácil si las superficies tratadas son planas ó si permiten ser rectificadas. Las complicaciones surgen cuando piezas con geometrías complejas han de ser procesadas, siendo más difícil obtener buena calidad superficial mediante métodos convencionales.

Dentro de las técnicas convencionales se encuentra el pulido a mano. Este procedimiento es ampliamente utilizado y efectivo para el acabado de superficies complejas. El uso de esta técnica trae consigo dos inconvenientes: primero el pulido supone un alto porcentaje del tiempo total de mecanizado de una pieza y segundo se requiere un alto grado de especialización por parte del operario, con su consecuente coste económico. Además, durante el pulido se generan muchos desechos y elevados niveles acústicos que son nocivos para la salud de los operarios así como para el medio ambiente.

Afortunadamente existen procesos de mecanizado relativamente modernos que también ayudan a mejorar significativamente el acabado de superficies complejas. El bruñido es uno de estos procesos. Se basa en la deformación plástica de la superficie de la pieza por la acción compresiva de una bola o un rodillo [1-2], consiguiendo a nivel micro que el excedente de material existente en las crestas de las irregularidades de dicha superficie ocupe la parte de los valles, dejando así una superficie más uniforme y por tanto con un acabado óptimo. La herramienta de bruñido suele acoplarse en las propias máquinas de control numérico en que se venía elaborando la pieza, evitando la necesidad de transportar la misma de una máquina a otra. De esta manera también se reducen los costes que ello implica. Por otro lado este proceso de fabricación se presenta como una solución fácil y asequible económicamente, que genera un acabado superficial de gran calidad e imprime unas tensiones compresivas a la superficie del material que le aporta mayor dureza y mejor resistencia a la fatiga [3]. Además tampoco produce desechos por lo que también se considera una solución ecológica para los talleres.

A pesar de todo, cuando se tratan superficies con curvas muy pronunciadas, como pueden ser las de forma esférica, se presenta ciertas limitaciones como la imposibilidad de hacer llegar la herramienta a ciertas zonas de la pieza, debido a la restricción de movimientos de la máquina de control numérico, si permite movimientos solo en 3 ejes. Por el contrario en una máquina de cinco ejes, la cual permite los movimientos habituales que cualquier centro de mecanizado de tres ejes, más otros dos que se obtienen con la utilización de un cabezal divisor situado en las guías de la bancada, esta limitación desaparece. En ambos tipos de máquinas la distribución de fuerzas es diferente durante la realización del proceso de bruñido y por supuesto, los costes de utilización de ambas son muy diferentes, lo cual puede afectar la economía del proceso.

En el presente trabajo se desarrolla la comparación, en cuanto a calidad superficial obtenida en las superficies cóncavas y convexas de piezas de aluminio A92017 y A96351, de los resultados del proceso de bruñido con bola realizado en una máquina de 3 y otra de 5 ejes. La relación de perpendicularidad entre la aplicación de la fuerza de bruñido y la superficie de la pieza cambia en cada máquina. Por otro lado también se determinan los parámetros óptimos de este proceso en cada máquina [4-7].

## **2. PARTE EXPERIMENTAL**

Para realizar el estudio en primer lugar se fabricaron piezas con una superficie cóncava o convexa con tres zonas, cada una con radios de curvatura de 50, 90 y 50mm. En cada región se fresaron tres áreas cada una de ellas con diferentes alturas de cresta (0,02mm; 0,06mm y 0,10mm). La fotografía de las piezas, así como la distribución de estas regiones y áreas en su superficie curva, se puede observar en la figura 1.

El fresado de estas superficies se realizó con una fresa integral AM2MBR0500A075 de Mitsubishi de punta esférica, de dos filos y diámetro 10mm, excelente para trabajar

aluminio con buenos acabados superficiales. Las condiciones de corte fueron  $V_c=3000\text{min}^{-1}$ ,  $V_a=300\text{mm}/\text{min}$  y las profundidades de corte varían en función de la altura de cresta a obtener.

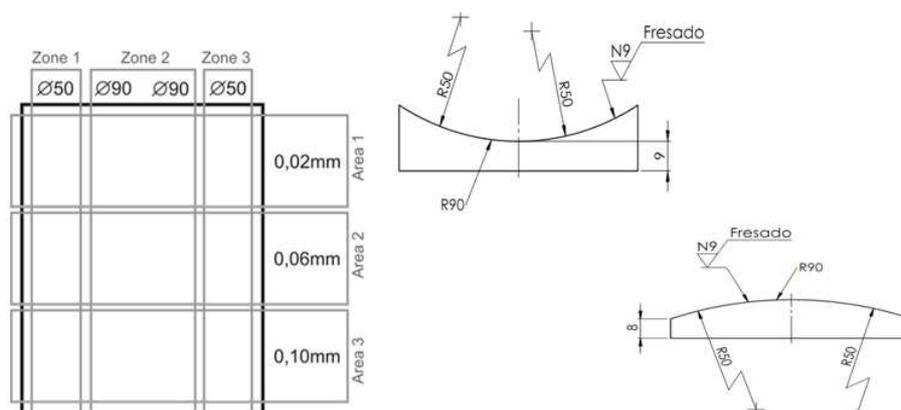


Figura 1. Gráfico las probetas usadas en el estudio y mapa de las zonas y áreas en las que se dividen

Se eligieron dos materiales distintos para la fabricación de las probetas: Aluminio A96351 y Aluminio A92017, para comparar los resultados obtenidos con ellos. La composición química y las propiedades mecánicas de los dos aluminios pueden verse en la tabla 1.

Material	Al (%)	Si (%)	Fe (%)	Mn (%)	Mg (%)	E (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)	HB
A96351	97,7	0,96	0,25	0,55	0,53	68,9	248	67
A92017	95,9	1,3	0,5	0,8	0,8	72,4	275	105

Tabla 1. Composición química y propiedades mecánicas de los aluminios A96351 y A92017

Las máquinas utilizadas en el estudio fueron: una fresadora de control numérico de 3 ejes del fabricante Lagun, modelo MC 600 y una fresadora Fanuc, modelo Robodrill  $\alpha$ -T21iEL.

Después de tener estas probetas mecanizadas, se realizó el proceso de bruñido sobre sus superficies curvas. Se diseñó un experimento utilizando técnicas de DOE, con el objetivo de realizar la menor cantidad de experimentos posibles. También de esta manera se puede observar la influencia que tienen cada uno de los parámetros del sistema sobre los resultados de rugosidad superficial que quedan en las piezas y se pueden llegar a hacer recomendaciones de cuáles son los valores que deben tomar en cada situación valorada. Estas superficies bruñidas se realizaron en diferentes condiciones de trabajo, siguiendo un diseño de experimentos tomando como variables algunos parámetros del proceso con dos niveles. Estas variables y sus valores se pueden observar en la tabla 2. Como parámetros constantes se fijaron la profundidad de pasada y el paso horizontal a 0,5mm y 0,15mm respectivamente.

Parámetro a evaluar	Nivel 1	Nivel 2
Estrategia a seguir con el proceso de bruñido	Paralelo al fresado previo (//)	Perpendicular al fresado previo ( $\perp$ )
Velocidad de avance de la herramienta	500mm/min	200mm/min
Altura de la cresta	0,02mm	0,10mm
Radio de curvatura de la superficie	50mm	90mm

Tabla 2. Parámetros evaluados en el experimento de bruñido

La distribución de las superficies bruñidas queda como se muestra en la figura 2.

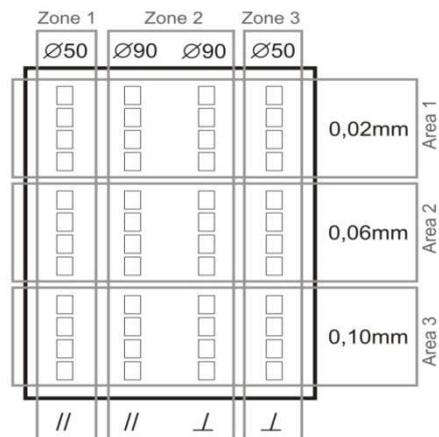


Figura 2. Esquema de la distribución de las superficies bruñidas en las probetas

En ambas máquinas se utilizó la misma herramienta para bruñir, la cual ha sido diseñada para tal efecto [2], (figura 3). El funcionamiento de la herramienta de bruñido consiste en suministrar una presión constante de 1,5 bar a través de un sistema hidráulico a la bola, de manera que se mantenga cierto rozamiento entre ésta y el material para así producir la deformación. La bola de la herramienta es de 10mm de diámetro y es de acero al cromo endurecido de 66HRC. La fuerza aplicada sobre la herramienta se midió y se comprobó que su valor medio en ambas máquinas es de 30N.



Figura 3. Herramienta de bruñido actuando en una probeta cóncava

Con estas variables se obtienen un experimento de 16 combinaciones diferentes más 4 puntos centrales. El resultado de los experimentos se valora a través de la medición de la rugosidad superficial sobre las superficies bruñidas. Para ello se utilizó un rugosímetro Mitutoyo SJ-201. Se valoraron los parámetros rugosidad superficial media aritmética Ra, y la rugosidad máxima pico-valle en la superficie de evaluación Rz, ambas del orden de los micrómetros.

### 3. RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS

Seguidamente se pueden observar graficados los valores de la rugosidad superficial medidos en las piezas (Figuras 4A, B, C y D). Para ello se ha valorado los resultados de los parámetros medidos (Ra y Rz) en cada pieza sacando tres valores para los mismos, el mínimo, el máximo y el medio, de entre todas las mediciones realizadas.

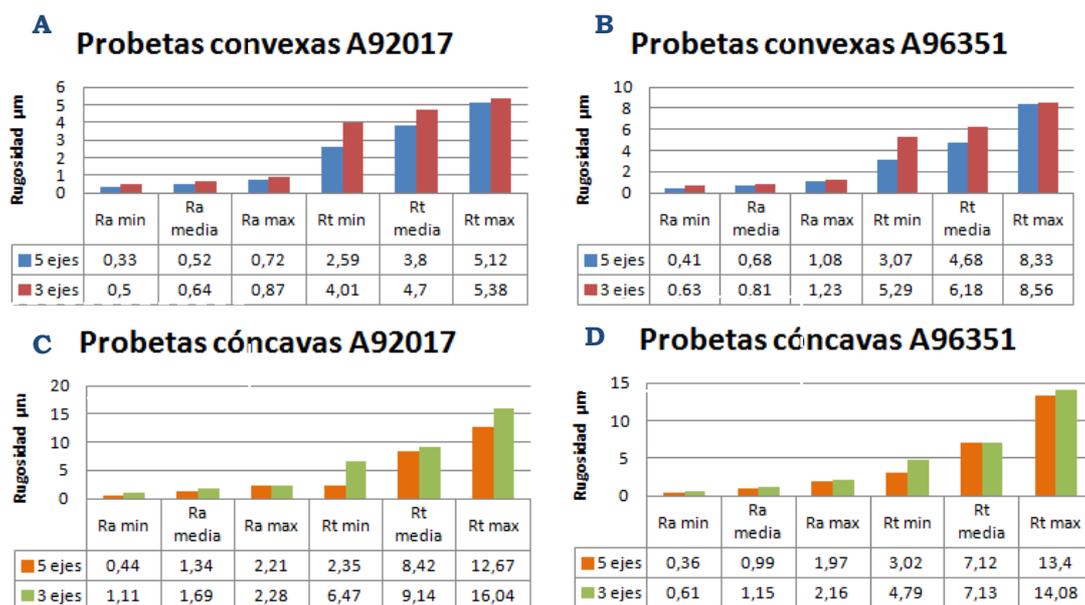


Figura 4. Herramienta de bruñido actuando en una probeta cóncava.

#### 4. DISCUSION

Como se puede observar en la figura 4, los valores de rugosidad superficial obtenidos para cada una de las piezas son menores cuando se bruñe en la máquina de 5 ejes, respecto a la máquina de 3 ejes. Específicamente para el mecanizado en máquinas de 5 ejes Ra es más bajo aproximadamente un 20% si la altura de cresta previa es de 0,02mm, respecto a una de 0,10mm. Rt mejora un 7,5% más con alturas de cresta previas más bajas. La mejora es más evidente en el aluminio A92017.

De manera general el bruñido con bola mejora la rugosidad superficial dejada por el fresado en piezas convexas, mecanizadas en máquinas de 5 ejes, en valores que oscilan entre el 70 y el 80%. Este dato es igual para las tres alturas de cresta, aunque se aprecia una mejora ligeramente más alta cuando la altura de cresta es mayor, aproximadamente un 5%. De la misma forma, cuando se mecaniza en máquinas de 3 ejes, los valores de rugosidad superficial son un 60-75% mejores para las tres regiones con alturas de cresta diferentes.

En la máquina de 3 ejes, la aplicación de la fuerza no siempre es totalmente perpendicular a la superficie que se bruñe, por la manera en que se desplaza la herramienta. Esto puede ser un motivo importante de porque los valores de rugosidad obtenidos son más altos que los obtenidos en la máquina de 5 ejes.

La presión ejercida contra la pieza hace que la bola retroceda hacia el interior del cuerpo de la herramienta, quedando menos espacio entre ésta y la pieza. Esto es una limitación que presenta la herramienta a la hora de desplazarse lateralmente. Así por ejemplo, el límite máximo para los desplazamientos de la herramienta en superficies con radio 50° es de aproximadamente 18° sobre el plano horizontal, según se puede ver en la figura 5. Piezas con un gran radio de curvatura no pueden ser bruñidas en una máquina de 3 ejes. Cuando se supera este ángulo el cuerpo de la herramienta entra en contacto con el material mecanizado, produciéndose una colisión y el consiguiente defecto en la superficie. En las piezas analizadas en este trabajo, esta limitación se tuvo en cuenta y se han bruñado

superficies de corta longitud, de manera que no afectase al objeto de estudio que es la comparación de los resultados de rugosidad obtenidos en ambas máquinas.

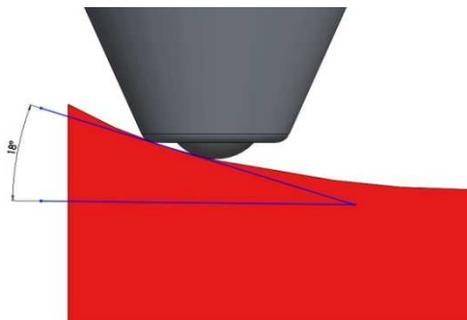


Figura 5. Limitación lateral de la herramienta de bruñir en piezas cóncavas en la máquina de tres ejes

Este inconveniente no aparece en la máquina de cinco ejes, ya que en ella la herramienta se mantiene totalmente perpendicular a la superficie durante todo el mecanizado para los radios de las probetas seleccionadas.

Haciendo un análisis estadístico de los resultados obtenidos, se pueden hacer ciertas recomendaciones sobre cuales son los parámetros de trabajo que ejercen influencia sobre los resultados de rugosidad. De la misma manera se pueden recomendar los mejores valores para dichos parámetros a utilizar en cada máquina (Tabla 3).

NI= Nivel de importancia, Vr= Valor recomendado, MS: Muy significativo, SC: Significativo en combinación con otro/s parámetro/s, PS: Poco significativo y NS: No significativo

Tipo de probeta		Probetas convexas								Probetas cóncavas							
Tipo de máquina		3 ejes				5 ejes				3 ejes				5 ejes			
Material		A92017		A96351		A92017		A96351		A92017		A96351		A92017		A96351	
Parámetros		NI	Vr	NI	Vr	NI	Vr	NI	Vr	NI	Vr	NI	Vr	NI	Vr	NI	Vr
V. de avance	Ra//	NS	200	SC	500	NS	200	NS	500	NS	200	NS	500	SC	200	NS	500
	Rt//	MS	200	NS	500	SC	200	NS	500	NS	200	NS	500	NS	200	NS	500
	Ra⊥	SC	200	MS	500	NS	200	NS	500	NS	200	MS	500	NS	200	SC	500
	Rt⊥	NS	200	SC	500	NS	200	NS	500	NS	200	NS	500	NS	200	MS	500
Estrat.	Ra//	MS	Par	MS	Par	MS	Par	MS	Par	SC	Par	MS	Par	SC	Par	MS	Par
	Rt//	MS	Par	MS	Par	MS	Par	NS	Par	SC	Par	MS	Par	SC	Par	MS	Par
	Ra⊥	MS	Per	MS	Per	MS	Per	MS	Per	MS	Per	NS	Per	MS	Per	MS	Per
	Rt⊥	MS	Per	MS	Per	MS	Per	MS	Per	NS	Per	NS	Per	NS	Per	MS	Per
Radio	Ra//	MS	90	MS	90	MS	90	MS	90	MS	90	MS	90	MS	90	MS	90
	Rt//	MS	90	MS	90	MS	90	MS	90	MS	90	MS	90	MS	90	MS	90
	Ra⊥	MS	50	MS	50	MS	50	MS	50	MS	50	MS	50	MS	50	MS	50
	Rt⊥	MS	50	MS	50	MS	50	MS	50	MS	50	MS	50	MS	50	NS	50

Tabla 3. Valores recomendados para los parámetros del bruñido para piezas convexas y cóncavas

Del análisis estadísticos de los resultados se puede indicar que la velocidad de avance no es un parámetro significativo en la mejora de la rugosidad superficial, en ningún casos estudiados. La estrategia de mecanizado resulto ser significativa, especialmente en la

combinación con la estrategia de mecanizado perpendicular al fresado previo. Por último, el radio de curvatura resulta un parámetro crítico para la mejora de la rugosidad superficial, tanto en máquina de 3 ejes como de 5 ejes.

## 5. CONCLUSIONES

De los experimentos realizados y su posterior análisis se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Se puede mejorar la calidad superficial de piezas con geometría compleja utilizando un proceso de mecanizado por deformación plástica como es el bruñido con bola.
2. La utilización de una máquina de cinco ejes para llevar a cabo un bruñido de estas características, evita los inconvenientes que la propia geometría de la herramienta causa durante el mecanizado, y asegura mejores resultados de rugosidad superficial que una máquina de tres ejes.
3. Los resultados obtenidos garantizan que el bruñido con bola puede sustituir a otros procesos de mecanizado, como el rectificado, o a procesos de mejora de la rugosidad superficial que se realizan de forma manual, como el pulido, con un nivel de calidad igual o, en ocasiones, mayor y con un menor coste.
4. Los resultados experimentales obtenidos en este trabajo nos llevan a asegurar de manera general que las probetas de aluminio A96351 y A92017 presentan mejor acabado superficial cuando se bruñen perpendicular a la superficie que se trabaja. Esta situación se puede dar en una máquina de 5 ejes y no en una de 3. También es aconsejable utilizar una estrategia de mecanizado perpendicular al mecanizado previo.

## 6. REFERENCIAS

- [1] López de la calle, L. N.; Lamikiz, A.; Sánchez, J.A; Arana, J.L. The effect of ball burnishing on heat-treated steel and Inconel 718 milled surfaces, (2007), *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, Vol.30, 958-968.
- [2] Travieso-Rodríguez, J. A.; Dessein, G.; González-Rojas, H. A., 2011. Improving the Surface Finish of Concave and Convex Surfaces Using a Ball Burnishing Process. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 26, Iss. 12 (2011), 1494-1502.
- [3] Y.C. Yen, P. Sartkulvanich, T. Altan. "Finite Element Modelling of Roller Burnishing Process". *CIRP Annals - Manufacturing Technology* Volume 54, Issue 1 (2005) 237-240.
- [4] N.S.M. El-Tayeb, K.O. Low, P.V. Brevern. "Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061". *Journal of Materials Processing Technology* 186 (2007) 272-278.
- [5] Fang-Jung Shiou, Chih-Cheng Hsu. "Surface finishing of hardened and tempered stainless tool steel using sequential ball grinding, ball burnishing and ball polishing processes on a machining centre". *Journal of materials processing technology* (2008).
- [6] Hamadache, H., Laouar, L., Zeghib, N.E., Chaoui, K. Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing. *Journal of Materials Processing Technology* (2006), 180, 130-136.
- [7] Celaya, A., Rodríguez, A., Albizuri, J., López de Lacalle, L. N., Alberdi, R. Modelo de elementos finitos del bruñido. *Proceedings of 9º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica* (2009), Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 147-154.