

INFLUENCIA DEL PROCESO DE BRUÑIDO CON BOLA SOBRE LA DUREZA Y LAS TENSIONES RESIDUALES EN EL ALUMINIO A92017

Influence of ball burnishing process on the hardness and residual stress of Aluminum A92017 convex surfaces

RESUMEN

El bruñido con bola se realiza, para mejorar el acabado de las piezas que han sido mecanizadas y para obtener una superficie más dura con tensiones residuales a compresión. De este modo se obtendrá una mayor resistencia al desgaste y a la fatiga. En este trabajo se presentan los resultados de las pruebas realizadas con dicho proceso aplicado a piezas convexas de aluminio A92017. Se presentan como resultados, las mediciones de dureza y de tensiones residuales obtenidas antes y después del bruñido y se extraen conclusiones sobre la mejora de estas propiedades en las superficies bruñidas.

PALABRAS CLAVES: Acabado Superficial, Bruñido, Dureza, Mecanizado, Rugosidad superficial, Tensiones residuales.

ABSTRACT

Ball-Burnishing process is made to improve the piece finishing that is previously machined and to obtain a harder surface with compressive residual stresses. Thus is obtained a greater resistance to wear and fatigue. This paper presents the results of tests performed with this process applied to aluminum A92017 convex pieces. As results, measurements of hardness and residual stress obtained before and after burnishing are presented. Also conclusions on the improvement of these properties in the burnished surfaces are draws.

KEYWORDS: *Ball-Burnishing, hardness, machining, Surface finishing, surface roughness, residual stresses.*

J. ANTONIO TRAVIESO RODRÍGUEZ

Ingeniero Industrial, Ph.D.
Profesor Colaborador Doctor
Universitat Politècnica de Catalunya
antonio.travieso@upc.edu

HERNÁN A GONZÁLEZ ROJAS

Ingeniero Industrial, Ph.D.
Profesor Agregado
Universitat Politècnica de Catalunya
hernan.gonzalez@upc.edu

GIOVANNI GÓMEZ GRAS

Ingeniero en Diseño Industrial
Profesor Asociado
Universitat Politècnica de Catalunya
giovanni.gomez@upc.edu

AMELIA NÁPOLES ALBERRO

Ingeniera Industrial
Profesor Colaborador Doctor
Universitat Politècnica de Catalunya
amelia.napoles@upc.edu

ANTONIO J. SÁNCHEZ EGEA

Ingeniero Industrial, M.Sc.
Estudiante doctorado
Universitat Politècnica de Catalunya
antonio.jose.sanchez1@estudiant.upc.edu

1. INTRODUCCIÓN

Obtener un buen acabado en una superficie de geometría compleja, por ejemplo, cualquier parte de un molde o matriz 3D es un problema muy difícil de resolver. Muchas veces este problema se resuelve a través de una operación de rectificado, pero cuando la complejidad de la superficie se incrementa, dejar un buen acabado en ella es un problema más difícil de solucionar. A través de una operación de bruñido con bola se pueden llegar a obtener buenos acabados superficiales en superficies de configuración compleja según Yen et al, [1]. Además de mejorar la calidad superficial, el proceso de bruñido con bola aporta otros valores añadidos al material de la pieza en que se realiza. En primer lugar incrementa la dureza superficial, lo cual puede ser ventajoso para ciertas utilidades. En segundo lugar cambia el mapa de tensiones residuales que queda sobre las capas superficiales de la pieza, hecho que también puede resultar interesante para la mejora de la vida útil del material a fatiga.

En este trabajo se ha desarrollado un estudio para mejorar la micro-dureza y las tensiones residuales en piezas con una superficie convexa de aluminio A92017, a través de un bruñido con bola.

Para realizar este estudio se desarrollaron una serie de experimentos, tomando como variables los parámetros del proceso que se comentarán más adelante. Estos parámetros variarán entre tres valores. Al final se analizará el impacto de esta variación en los resultados medidos de las tensiones residuales y de la micro-dureza que se obtienen en las piezas, así como sus mejores valores.

Como se muestra en la figura 1, el proceso de bruñido con bola se desarrolló utilizando una herramienta que está montada en una fresadora de CNC sobre un cabezal hidráulico, que aplica una cierta presión a un bola que está situada en la punta de la herramienta. Cuando esta bola se desliza sobre la pieza, deforma los picos de las irregularidades de la superficie, aplanando su perfil y

produciendo una superficie mucho más regular que la que tenía la pieza de trabajo anteriormente. También de esta manera se endurece el material de la pieza y se introducen tensiones residuales compresivas en la misma.

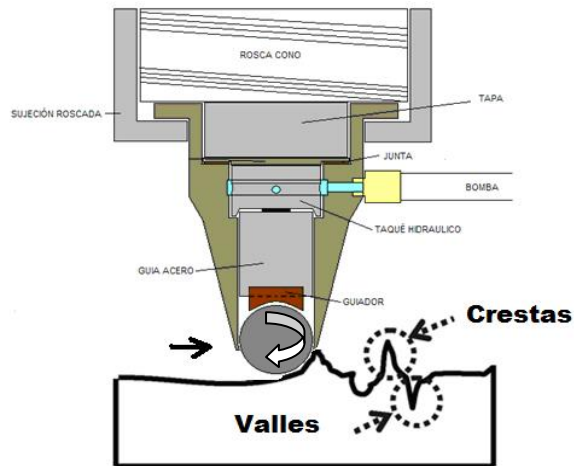


Figura 1. Representación esquemática del proceso de bruñido con bola

Un proceso de bruñido con bola se recomienda debido a que la herramienta puede ser fácilmente instalada en la misma máquina de CNC en que estaba siendo mecanizada la pieza. La bola puede tener un diámetro comprendido entre 3 y 12 mm y ésta opera bajo la acción de una fuerza normal lo suficientemente alta como para deformar los picos del perfil de la superficie a tratar. La bola está en contacto con la superficie sólo para bruñirla, pero puede girar libremente sobre sí misma, porque los valores de las fuerzas de fricción son muy pequeños. Como sucede en el proceso de corte, la deformación plástica se produce en toda la superficie debido a que la herramienta está constantemente impactando sobre la pieza de trabajo, según Roettger [14], Klocke & Liermann [2], Prevey et al [10], Nemat &, Lyons [3], Yen & Altan [11].

El bruñido con bola es considerado por Adel & Sulieman, [4] como un proceso de deformación en frío, el cual se puede utilizar para mejorar las características superficiales de una pieza. Según estos autores, muchos artículos publicados anteriormente referencian los efectos del proceso de bruñido sobre la rugosidad superficial y la dureza, pero consideran que no se ha trabajado lo suficiente para poder llegar a conclusiones definitivas sobre la referida influencia. Es por esto que su trabajo se centró en la evaluación del incremento de la resistencia al desgaste de las piezas que han sido bruñidas. Llegaron a la conclusión de que el proceso de bruñido con bola mejora el acabado y la dureza de la superficie de los metales no ferrosos en ciertos límites. La fuerza de bruñido es el principal factor que afecta la resistencia al desgaste de la capa superficial de las piezas tratadas y no hay una fuerza óptima de bruñido, con la que se obtienen los mejores resultados. La resistencia al desgaste de las

capas superficiales de una pieza está ligada a la dureza superficial de la misma.

Los mismos resultados que los autores anteriores fueron obtenidos por Adel & Ayman, [5]. Ellos además aplicaron diferentes fuerzas sobre piezas de bronce con diferentes rugosidades superficiales de partida. Con el incremento de la fuerza de bruñido se disminuía la rugosidad de la superficie, pero no había ningún efecto sobre el cambio de la dureza superficial.

Según Liu Luca, [13]; el bruñido mejora la resistencia a la fatiga en el orden del 31% al 50%. Esto demuestra la eficacia de este proceso al aumentar la vida útil de la pieza debido a la mejora de las propiedades del material. Cuatro parámetros del proceso de bruñido como son: el material de la bola, el ancho de la pasada lateral, la fuerza y el avance de la herramienta, fueron seleccionados por Fang-Jung & Chien-Hua, [6], como los factores para un diseño factorial tipo Taguchi para determinar los valores óptimos de los mismos. Estos parámetros son los que tienen mayor influencia sobre la rugosidad superficial y la dureza de la superficie a tratar. Se obtuvieron los valores óptimos tras realizar los experimentos. Estos fueron: una bola de carburo de tungsteno, una velocidad de avance de 200mm/min, una fuerza de bruñido de 300N, y 40µm de profundidad de bruñido. El valor de dureza de la muestra de la prueba aumentó de 338 HV que tenía inicialmente a 480 HV después del proceso de bruñido. El espesor de la capa endurecida es de 30µm cuando se aplicaban los parámetros óptimos para el bruñido plano. En la cavidad de la superficie del molde la mejora de la rugosidad superficial de la parte de la inyección fue del 62,9% y en la superficie de forma libre fue del 77,8%.

Un año después Yen et al, [1] desarrollaron una investigación que se centró en un proceso de acabado realizado en un torno. Primeramente, se realizó un proceso de acabado convencional de los que se realiza en este tipo de máquina y luego se realizó un proceso de acabado a través del bruñido. Se obtuvo los aspectos críticos que determinaron el estado final de la superficie y sus propiedades como las tensiones residuales, la microestructura y la micro-dureza. Además se desarrollaron dos modelos (2D y 3D) para optimizar la selección de los parámetros del proceso de bruñido (diámetro de la bola, presión, velocidad de avance), utilizando MEF, los cuales fueron validados con resultados experimentales.

Según Yen, Y. C. & ALTAN, T., [7], el bruñido con bola es un proceso efectivo de mejora de la calidad superficial, donde una bola cerámica gira sobre una superficie mecanizada bajo una alta presión, aplanándose los picos de las asperezas. Concluyeron que este proceso no solo mejora el acabado de la superficie sino que también imprime tensiones residuales compresivas favorables y aumenta la dureza en superficies funcionales, lo cual puede llevar a aumentar la vida útil cuando está presente el fenómeno de la fatiga.

Más recientemente Hamadache et al, [8] mostraron que el incremento de la dureza se reduce con el incremento de la

frecuencia de rotación de la bola y de la velocidad de avance en el proceso de bruñido. También cuando crecen la fuerza de bruñido y el número de pasadas, se incrementa la dureza.

Como última referencia a tener en cuenta, Celaya et al, [12] han publicado un artículo en el que se desarrolla un modelo del proceso de bruñido a partir de los resultados requeridos en términos de acabado superficial y de tensiones residuales. Este modelo puede ayudar a evaluar el efecto de diferentes parámetros de operación en el proceso de bruñido. En este caso se evalúa el bruñido de una superficie de revolución, pero teniendo en cuenta el plano paralelo al eje del cilindro.

La mayoría de los trabajos de investigación, como puede verse, se centran en pruebas experimentales en piezas planas o de revolución. Por supuesto, se demuestra que el proceso de bruñido es eficaz para mejorar la calidad de la superficie, la dureza y las tensiones residuales de este tipo de piezas de trabajo. Por esta razón, el objetivo principal y la innovación de este trabajo es analizar cómo influyen los parámetros del proceso en la dureza y las tensiones residuales resultantes al bruñir superficies convexas de aluminio A92017 y también hacer recomendaciones acerca de sus valores óptimos.

2. EXPERIMENTOS PARA LA COMPROBACIÓN DE LOS VALORES AÑADIDOS DEL PROCESO DE BRUÑIDO CON BOLA

2.1. ESTUDIO DE LA MICRO-DUREZA EN PROBETAS CONVEXAS DE ALUMINIO A92017

Con el objetivo de comprobar si el proceso de bruñido aumenta la dureza en superficies curvas, se toma una pieza como la representada en la figura 2 con dos superficies convexas de radio de curvatura 50mm y 100mm, fabricadas en aluminio A92017. Sobre esta pieza se elaboran a través del proceso de bruñido con bola 8 superficies diferentes y se miden sobre ellas la micro-dureza en escala HV. En cada superficie los parámetros del proceso son diferentes. También midió la micro-dureza en las zonas fresadas.

Los parámetros utilizados como variables del proceso de bruñido son: el radio de curvatura de la superficie a bruñir r , la velocidad de avance de la herramienta de bruñir a y la estrategia de mecanizado utilizada que se concreta en la dirección con la que se hace el bruñido D , que ha sido realizado paralelo a la dirección del avance del fresado ($//$) o perpendicular a este (\perp). Estas han sido las variables consideradas porque en experimentos anteriores (Travieso et al, [9]) se ha demostrado que son las que tienen más influencia sobre las características superficiales de las piezas. La combinación de los parámetros tomados con dos niveles diferentes cada uno da como resultado 8 experimentos.

De esta manera, se puede determinar cuánto varía la dureza en la superficie de las piezas bruñidas respecto a las fresadas y también se puede analizar cómo influye la

variabilidad de los parámetros del proceso en los resultados definitivos de la dureza superficial.

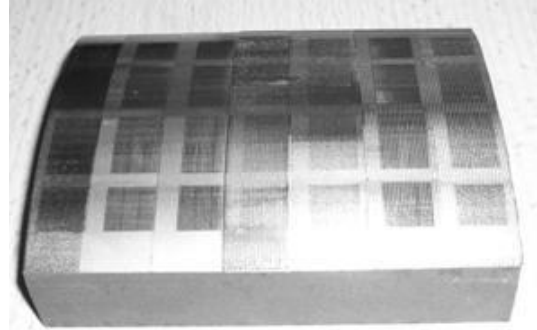


Figura 2. Fotografía de la probeta de aluminio A96351, utilizada en los experimentos

2.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL EXPERIMENTO

Las características del ensayo de micro-dureza se muestran en la tabla 1.

Escala de Micro-dureza	HV
Upload	10kgf
Sensibilidad	20 μ m/unit
Diámetro del indentador	1/8"

Tabla 1. Características de la prueba de micro-dureza

Los resultados de las mediciones se pueden observar en la tabla 2.

No. Exp.	r (mm)	a (mm/min)	D	Micro-dureza HV
1	50	200	//	125.5
2	100	200	//	178.5
3	50	350	//	127.3
4	100	350	//	138.5
5	50	200	\perp	136.6
6	100	200	\perp	186.3
7	50	350	\perp	130.0
8	100	350	\perp	141.6
Fresado				119.9

Tabla 2. Resultados de la prueba de micro-dureza en las piezas de aluminio A96351

2.1.2. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

Como se puede observar en la tabla de resultados (tabla 2), independientemente del valor de los parámetros con los que se haga, el valor de la micro dureza superficial aumenta respecto a la que ha quedado en la superficie producto de la operación de fresado previo, de media un 17%.

Se analizan los resultados utilizando el software Minitab. Se encuentran de esta manera que el único parámetro estadísticamente significativo que tiene cierta influencia sobre los resultados es el radio de curvatura de la superficie, con un $R-Sq(adj) = 71,33\%$.

El diagrama de Pareto que confirma los resultados anteriores se puede observar a continuación en la figura 3. En este gráfico la única variable significativa es el radio de curvatura de la superficie r , cuyo efecto estandarizado es mayor que el límite 26.68.

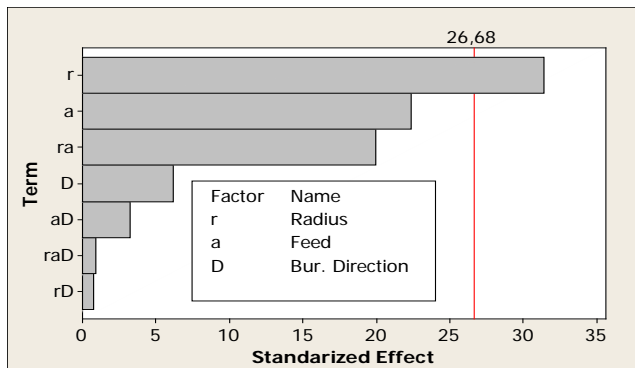


Figura 3. Diagrama de Pareto para los efectos de los parámetros sobre HV

Como se puede observar, pesa más el efecto del radio que el de la velocidad de avance. Esto se debe probablemente a que la componente de fuerza de bruñido que actúa a lo largo de la superficie varía su valor debido a la inclinación de ésta. Aunque la velocidad de avance no es un parámetro significativo, si que tiene una cierta importancia relativa dentro del análisis, como se puede observar en el gráfico de Pareto de la figura 3. Esto se debe a que el endurecimiento por deformación tiene relación con la tasa de velocidad de deformación que a su vez se relaciona con la velocidad de bruñido.

En este caso será posible estimar el valor de micro-dureza superficial que se debe obtener utilizando los parámetros evaluados, por medio de la expresión (1).

$$HV = 98,4750 + 0,6275 r \quad (1)$$

A continuación se realizó una estimación del intervalo de confianza para la constante de la ecuación (1) y una prueba de significación de la correlación entre el radio de curvatura y la micro-dureza. La prueba de significación de la correlación da que el F de Fischer $F_1 = 6,218$ y el $F_2 = 5,98738$. Si $F_1 > F_2$, significa que hay correlación entre los datos obtenidos en el experimento. De esta manera se puede afirmar que existe correlación entre el radio de curvatura de la pieza y los resultados de micro-dureza obtenidos. El intervalo de confianza para las constantes de la ecuación (1) son de $\pm 48,6796$ y $\pm 0,6158$, respectivamente. Los resultados de este análisis se pueden observar en el gráfico de la figura 4.

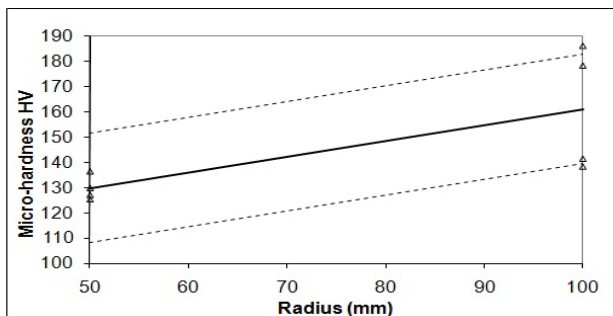


Figura 4. Gráfica de regresión lineal que muestra la influencia de la variación del radio de curvatura sobre HV

En la figura 4 se puede ver una línea continua que corresponde a la regresión lineal de la ecuación (1), y las líneas discontinuas que definen el intervalo de confianza para esta regresión.

Se puede observar claramente que los valores de micro dureza se incrementan más respecto a los de la pieza antes de bruñir, sobre todo en la superficie de radio 100mm. El radio, como hemos visto anteriormente es el único parámetro significativo. Al aumentar el radio aumentan los valores de micro-dureza ya que la componente de fuerza que actúa sobre la superficie en un radio mayor, es más elevada que en un radio más pequeño, con lo cual la herramienta realiza más fuerza sobre la superficie de la pieza bruñir en superficies de radio 100 que en superficies de radio 50mm.

2.1.3. VALORES RECOMENDADOS PARA LOS PARÁMETROS DE TRABAJO

A partir de los resultados obtenidos se pueden llegar a recomendar los valores de los parámetros del sistema en cada caso para obtener los mejores resultados. Estos se pueden resumir en la tabla 3.

Material	A92017 (según UNS)	
Parámetro	NI	Valor óptimo
Velocidad de avance	IS	200 mm/min
Radio de curvatura	HS	100 mm
Dirección del bruñido	NS	Perpendicular al fresado

Legenda: NI- Nivel de importancia

HS- Muy significativo

IS – No muy significativo o significativo en combinación con otro parámetro

NS- No significativo

Tabla 3. Recomendaciones de los valores de los parámetros a utilizar en el proceso de bruñido

2.2. ESTUDIO DE LAS TENSIONES RESIDUALES EN SUPERFICIES CONVEXAS DE ALUMINIO A96351

Con el objetivo de verificar que ha pasado en las capas internas del material de las piezas que han sido bruñidas, se realizan mediciones de las tensiones residuales que han quedado después del proceso. Para ello se han tomado dos muestras de la pieza convexa de aluminio A96351. Las superficies de estas muestras tienen radios de curvatura de 100mm y 50 mm respectivamente.

2.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL EXPERIMENTO

Para medir las tensiones residuales se ha utilizado la técnica de difracción de rayos x. Este es el método más aceptado para la medida no destructiva de tensiones residuales en materiales cristalinos. Con esta técnica, se mide la deformación de la red cristalina y la tensión se determina a partir de las constantes elásticas de difracción.

Según la ley de Bragg (2), pueden ser estudiadas las direcciones en las que la difracción de rayos x sobre la superficie de un cristal produce interferencias, dado que

esta permite predecir los ángulos en los que los rayos x son difractados por un material con estructura atómica cristalina.

$$m\lambda = 2d \sin(\alpha) \tag{2}$$

Donde:

λ - Longitud de onda de los rayos x

m - Orden. Número entero de longitudes de onda que hay entre rebotes

d - Distancia entre los planos de la red cristalina

α - Angulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión

Para cada material se determina cual es el pico de difracción correspondiente al ángulo de difracción, que mayor intensidad y resolución aporta. Este pico se puede medir para los ángulos de inclinación de los diferentes cristales ϕ , respecto a la superficie de la pieza, o lo que es lo mismo aparece un pico de difracción asociado a cada plano de difracción que se mida.

2.1.2. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

Para las probetas de aluminio A96351, el ángulo de difracción donde aparece el pico de mayor intensidad es $2\alpha=112^\circ$. En los gráficos de las figuras 5 y 6 se pueden observar, para las probetas 1 y 2 respectivamente, las amplitudes de los picos de difracción para este ángulo. La amplitud de los picos de difracción está relacionada con el estado tensional de los planos del material. Los valores se toman para una longitud de onda de la radiación de $\lambda=0,1541874$ nm.

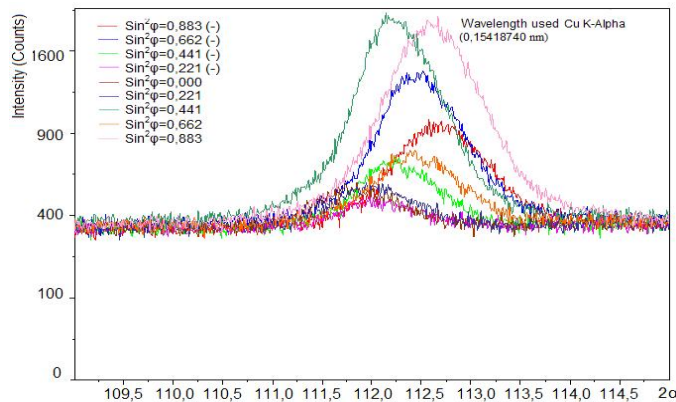


Figura 5. Variación del ángulo para diferentes intensidades de radiación para la probeta 1. (Aluminio A96351, superficie de radio 100 mm de curvatura)

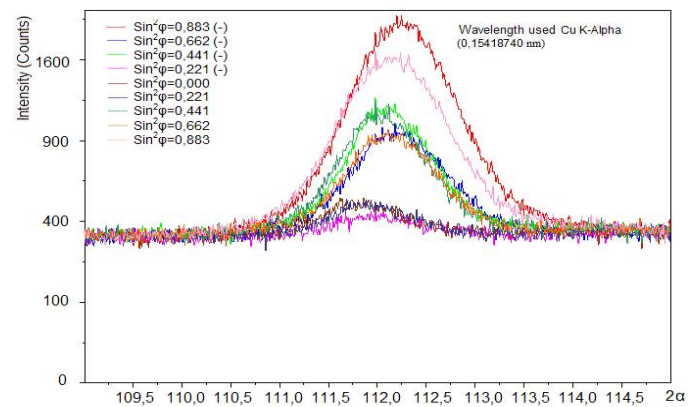


Figura 6. Variación del ángulo para diferentes intensidades de radiación para la probeta 1. (Aluminio A96351, superficie de radio 50 mm de curvatura)

A partir de la ley de Bragg se miden las distancias entre los planos de las redes cristalinas y se encuentra una relación entre la distancia entre planos de difracción (d), y del seno del ángulo de inclinación de los diferentes cristales ϕ . En las figuras 7 y 8, se pueden observar éstos gráficos, para ambas probetas. Los puntos triangulares representan los valores para los ángulos ϕ positivos y los puntos cuadrados para los ángulos negativos. La línea representa la tendencia estimada para dichos valores. Para un valor de $\phi=0^\circ$, se determina el valor de las tensiones residuales, a través del método del centro de gravedad. Este cálculo es posible ya que las tensiones son proporcionales de las deformaciones en la forma de la ecuación (3).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{3}$$

Donde:

σ - Tensión residual en el material

E - Módulo de Young del material

ε - Deformación medida en el material

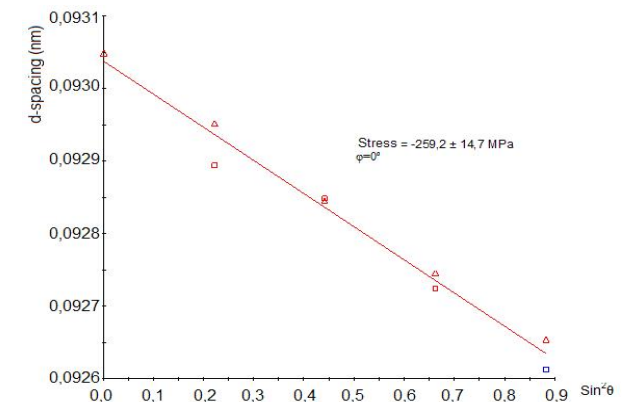


Figura7. Variación de las distancias entre planos d , en función del seno del ángulo Θ y valor obtenido de tensiones residuales, para la probeta 1. (Aluminio A96351, superficie de radio 100 mm de curvatura)

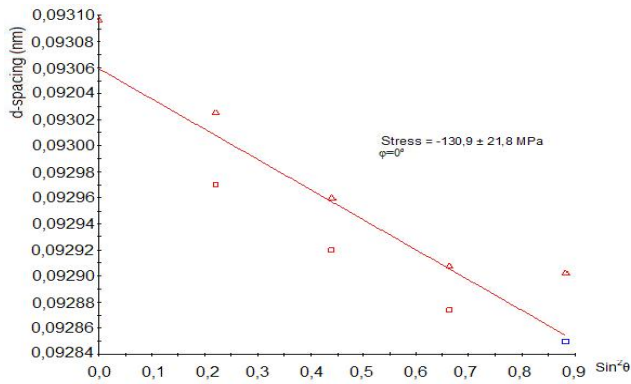


Figura 8. Variación de las distancias entre planos d , en función del seno del ángulo Θ y valor obtenido de tensiones residuales, para la probeta 2. (Aluminio A96351, superficie de radio 50 mm de curvatura)

Como se puede observar en los gráficos anteriores (Figuras 7 y 8), los valores obtenidos son de -259,2MPa y -130,9MPa, respectivamente. El signo negativo representa que estas tensiones son de tipo compresivas. Este comportamiento se da en ambas probetas, independientemente de su radio de curvatura. En ambas superficies los valores de los parámetros utilizados en el proceso coinciden. Es decir son superficies bruñidas con una velocidad de avance de 300 mm/min, en la dirección paralela al avance del fresado previo, con ancho de pasada lateral de 0,15 mm y con una profundidad de penetración del cabezal de la herramienta de 1mm. La única diferencia entonces entre las superficies bruñidas es su radio de curvatura.

3. CONCLUSIONES

A través de los experimentos anteriores se ha podido demostrar que el proceso de bruñido con bola:

1. Incrementa los valores de micro-dureza en el orden de un 17% en superficies convexas de aluminio A96351.
2. Aporta tensiones residuales de tipo compresivas, lo cual probablemente aumentará la vida útil a fatiga de las piezas.
3. En general hay un cierto grado de coherencia entre el aumento de los valores de micro-dureza y la aparición de tensiones residuales compresivas.

4. BIBLIOGRAFÍA

Referencias de publicaciones periódicas:

- [1] Y.C. YEN, P. SARTKULVANICH, T. ALTAN. *Finite Element Modelling of Roller Burnishing Process*. CIRP Annals 2005 – Manufacturing Technology, 54, Issue 1, 237-240
- [2] KLOCKE, F., LIERMANN, J. *Roller Burnishing of Hard Turned Surfaces*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38/56, 419-423
- [3] NEMAT, M., LYONS, A. C. *An Investigation of the Surface Topography of Ball Burnished Mild Steel*

and Aluminium. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, 16, 469-473.

- [4] ADEL MAHMOOD HASSAN, SULIEMAN Z.S. AL-DHI. *Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process*. Journal of Materials Processing Technology 1999, 96, 73-80.
- [5] ADEL MAHMOOD HASSAN, AYMAN MOHAMMAD MAQABLEH. *The effects of initial burnishing parameters on non-ferrous components*. Journal of Materials Processing Technology 2000, 102, 115-121.
- [6] FANG-JUNG SHIOU, CHIEN-HUA CHEN. *Freeform surface finish of plastic injection mould by using ball-burnishing process*. Journal of Materials Processing Technology 2003, 140, 248–254.
- [7] Y.C. YEN, P. SARTKULVANICH, T. ALTAN. *Finite Element Modelling of Roller Burnishing Process*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 2005, 54 Issue 1, 237-240.
- [8] 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.
- [9] TRAVIESO-RODRÍGUEZ, J.A., DESSEIN, G., GONZÁLEZ-ROJAS, H.A. *Improving the Surface finish of concave and convex surfaces using a ball burnishing process*. Materials and Manufacturing Processes, 2010, Vol.26, Iss.12, pp 1494-1502.

Documentos de memorias de congresos (publicados):

- [10] PREVEY, P.S., RAVINDRANATH, R.A., SHEPARD, M., GABB, T. *Case Studies of Fatigue Life Improvement Using Low Plasticity Burnishing in Gas Turbine Engine Applications*. Proceedings of ASME Turbo Expo, 2003, June 16-19, Atlanta, Georgia, USA

Reportes Técnicos:

- [11] YEN, Y.C., ALTAN, T. *Finite Element Modelling of Ball Burnishing – Prediction of Surface Deformation and Residual Stress*. ERC Report No. HPM/ERC/NSM-04-R-04, 2004, Ohio State University.
- [12] 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.

Disertaciones:

- [13] LUCA, L. *Investigation into the Use of Ball Burnishing of Hardened Steel Components as a Finishing Process*. PhD Dissertation, 2002, U. of Toledo, USA.
- [14] ROETTGER, K. *Walzen hartgedrehter Oberflaechen*. PhD Dissertation, WZL, RWTH Aachen, 2002.