

Ensayos

Bruñido con bola como proceso de acabado superficial y mejoramiento de propiedades físico-mecánicas de piezas manufacturadas

Resumen

En el pasado, la investigación en la manufactura de diversos componentes industriales se centró en la mejora del acabado superficial de piezas manufacturadas. En la actualidad, con el avance tecnológico de nuevos materiales se busca, además de lograr un excelente acabado superficial, mejorar las propiedades físico-mecánicas de las piezas para que presenten una mayor resistencia a ambientes corrosivos, mayor resistencia a fatiga en cargas cíclicas, incrementar su dureza superficial para reducir el desgaste, disminuir la rugosidad para disminuir la fricción entre componentes, inducir esfuerzos residuales para incrementar la vida útil de las piezas, entre muchas otras mejoras. Los procesos de deformación plástica superficial (DPS) permiten mejorar estas propiedades además de lograr un buen acabado superficial. Dentro de los procesos DPS, el bruñido con bola es un proceso de manufactura avanzada relativamente nuevo en México, que ha demostrado ser un excelente proceso de acabado superficial, y mejora considerablemente algunas propiedades físico-mecánicas de las piezas manufacturadas. El presente trabajo tiene como objetivo presentar un análisis crítico y documentado de este proceso de manufactura avanzada, puesto que su implementación en nuestro país promete un avance científico-tecnológico con beneficios económicos al ser un proceso rápido, sencillo y de bajo costo.

Abstract

Previous research into the manufacture of various industrial components was focused on improving the surface finish of manufactured parts. Nowadays, with the technological advancement of new materials, research is trying to achieve an excellent surface finish as well as improve the physical and mechanical properties of manufactured parts to obtain greater resistance to corrosive environments, greater resistance to fatigue cyclic loading, increase surface hardness to reduce wear, reduce roughness to reduce friction between components, and induce residual stresses to increase lifespan, among other improvements. The processes of surface plastic deformation (SPD) can improve these properties as well as achieve a good surface finish. Within the SPD processes, ball burnishing is a relatively new process of advanced manufacturing in Mexico, which has proven to provide an excellent surface finishing process and greatly improves some physical and mechanical properties of the manufactured machine elements. This paper aims to present a critical and documented analysis of this advanced manufacturing process, since its introduction to Mexico has the potential for scientific and technological progress with increased economic benefits because it is a quick, simple and inexpensive process.

Résumé

Dans le passé, la recherche sur la manufacture de divers composants industriels s'est centrée sur l'amélioration de la finition superficielle de pièces manufacturées. Actuellement, avec le progrès technologique de nouveaux matériaux, on cherche à réussir une excellente finition superficielle, à améliorer les propriétés physico-mécaniques des pièces afin qu'elles offrent une plus grande résistance aux environnements corrosifs et à la fatigue en charges cycliques. On cherche aussi à augmenter leur dureté superficielle pour en réduire l'usure, à diminuer la rugosité afin de diminuer la friction entre les composants, à provoquer des efforts résiduels pour augmenter la vie utile des pièces, ainsi que d'autres améliorations. Les processus de déformation plastique superficielle (DPS) permettent d'améliorer ces propriétés ainsi que de réussir une bonne finition superficielle. Parmi les processus DPS, le polissage par bille d'acier est un processus de manufacture avancé relativement nouveau au Mexique, qui s'est révélé être un excellent processus de finition superficielle et qui améliore considérablement certaines propriétés physico-mécaniques des pièces manufacturées. Cette étude a pour objectif de présenter une analyse critique et documentée de ce processus de manufacture avancée, puisque son sa mise en place dans notre pays promet

une avancée científico-technologique avec des bénéfices économiques, étant un processus rapide, simple et économique.

Alberto Saldaña Robles, Adrián Flores Ortega, Adriana Saldaña Robles, Noé Saldaña Robles, César Gutiérrez Vaca

Palabras clave: Deformación plástica, integridad superficial, manufactura avanzada

Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca, Guanajuato, México

Introducción

Los materiales metálicos y plásticos representan una parte importante del consumo mundial en la manufactura de diversos componentes industriales (Díaz, Robert, Boada, 2009). En la actualidad, la manufactura de estos componentes en diversos sectores industriales, tales como el alimenticio, agrícola, metal-mecánica, automotriz, aeroespacial, etc., tienen la necesidad de implementar en sus líneas de manufactura final, procesos o técnicas que permitan mejorar la integridad de la superficie, características exteriores e interiores (Cerillo et al., 2015). Una línea de investigación en manufactura se centra en mejorar las propiedades físico-mecánicas de los componentes industriales para incrementar su vida útil, propiedades tales como: la calidad superficial, dureza, tenacidad, resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste, resistencia a la fatiga, esfuerzos residuales comprensivos, redondez, entre muchas otras. Lo anterior se justifica puesto que los fenómenos químicos, físicos y mecánicos que afectan el desempeño de las piezas inician regularmente en la superficie o sub-superficie modificando sus propiedades (Díaz et al., 2009).

Los procesos que mejoran el acabado superficial por mecanizado, se pueden clasificar bajo dos principios fundamentales, por arranque de material (viruta) o por deformación plástica superficial (Travieso, 2010). Los primeros, conocidos como procesos abrasivos, consisten en utilizar una herramienta de corte o desbaste para la remoción del material alcanzando una rugosidad promedio (R_a) en un rango entre $0.05 \mu\text{m}$ y $1.60 \mu\text{m}$ (Kalpakjian y Schmid 2002). Entre ellos se tienen, rectificado, lapeado, pulido, fresado de super-acabado, esmerilado, etc. (Groover, 1997). Los segundos, procesos DPS tales como, el pulido con herramienta de diamante, impacto por láser, vibración ultrasónica, granallado y diversos tipos de bruñido, los cuales utilizan diversos elementos (laser, ultrasonido, vibración, rodillo, bola, granalla, etc.), para deformar plásticamente la superficie logrando la compresión de una micro capa de material (Díaz, Boada, Robert, 2015). A diferencia de los procesos por arranque de material, los procesos DPS son capaces no sólo de mejorar el acabado superficial, sino también de diversas propiedades mecánicas de las piezas manufacturadas, permitiendo alargar su vida útil al mejorar la resistencia al desgaste, fatiga y corrosión (Travieso, 2010).

El bruñido con bola es un proceso DPS de elaboración en frío, que ha demostrado inducir una capa de esfuerzo residual más uniforme, con mayor magnitud y profundidad, al compararse con otros procesos DPS, tales como el granallado y el bruñido vibratorio. A pesar de que el proceso se conoce desde hace más de tres décadas, es en los últimos años que se ha incrementado su potencialidad como proceso de acabado superficial (Rodríguez y López 2012) y mejorador de diversas propiedades físico-mecánicas, alcanzando una rugosidad media (R_a) por debajo de $0.5 \mu\text{m}$. El bruñido con bola provee una alternativa a métodos tradicionales por arranque de material y tratamiento térmico, que además de consumir una gran cantidad de energía pueden llegar a ser altamente contaminantes (Rodríguez y López 2012).

La investigación científica de este proceso de manufactura se ha incrementado recientemente en diversos países, tales como: Estados Unidos, Taiwán, Turquía, India, México, Jordania, Polonia, China, Francia, Egipto, Argelia, Alemania y España. Las aplicaciones más usuales de este proceso de manufactura avanzada son la fabricación de moldes de inyección de plástico (Shiou y Chen 2003, Chen y Shiou 2003, López et al. 2005, Shiou y Hsu 2008, Shiou y Cheng 2008, Shiou y Chuang 2010), herramientas para el conformado y corte de metales (Rao et al. 2008, John y Vinayagam 2011, Brostow et al. 2013, Tillmann et al. 2014), ejes, pistones, frenos, engranes, vástagos, acoplamientos, alabes, rotores (El-Tayeb et al. 2007, Ravuri et al. 2009, Sequera et al. 2014), así como numerosos componentes para diversos sectores industriales (Hassan y Momaní 2000, Prasad et al. 2006, Babu et al. 2012, Ibrahim et al. 2015). El acero y el aluminio son los materiales más empleados en el estudio del bruñido con bola, la mayoría de los artículos científicos revisados (55 de 70) estudian el proceso en estos materiales.

En México, el bruñido con bola tiene una reciente inserción en empresas del sector automotriz, con la finalidad de reemplazar procesos convencionales de acabado superficial por arranque de viruta y tratamiento térmico, para reducir los tiempos, altos costos y daños ambientales (Tabla 1). Este trabajo tiene la finalidad de presentar un análisis crítico y documentado de los aspectos más relevantes del bruñido con bola, ya que este proceso de manufactura, además de ser rápido, sencillo y de bajo costo

Tabla 1. Procesos de mejoramiento de propiedades físico-mecánicas.

Proceso	Ventajas	Desventajas
Bruñido con bola	<ul style="list-style-type: none"> Mejora la rugosidad superficial, dureza, redondez y la resistencia a fatiga, desgaste y corrosión. No genera viruta (proceso DPS) siendo un proceso ambientalmente más limpio. Incrementa la vida útil de la pieza. Alta precisión dimensional. Proceso de acabado rápido, de 15 m·min⁻¹ (López et al., 2008). Se puede incrementar la dureza inicial del material hasta un 60% (Rao et al. 2008, Rodríguez et al. 2012). Por ejemplo, se mejoró la dureza de 52 a 59 HRC y de 63 a 66 HRC con el bruñido (López et al., 2008) 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere de herramienta de bruñido mecánica o hidrostática. Requiere de refrigerante.
Arranque de viruta	<ul style="list-style-type: none"> Mejora la rugosidad superficial. Se utiliza una herramienta de adquisición fácil y económica (fresas, buriles, etc.). No incrementan la dureza de forma considerable. 	<ul style="list-style-type: none"> Induce esfuerzo residual de tensión. Genera viruta (sobrante del proceso). Proceso de acabado lento, cerca de 3 m·min⁻¹ (López et al., 2008). Requiere de refrigerante.
Tratamientos térmicos y termoquímicos	<ul style="list-style-type: none"> Mejora la dureza y la resistencia a la corrosión y al desgaste. Libera esfuerzos residuales de tensión. Incrementa la vida útil de la pieza. Se pueden alcanzar durezas entre 55 y 65 HRC (Groover 1997, López et al, 2008). 	<ul style="list-style-type: none"> Genera sobrantes del proceso. Consume gran cantidad de energía. Proceso de tratamiento lento.

(Rodríguez y López 2012), promete un avance científico, tecnológico y ecológico con beneficios para México. Lo anterior debido a que este proceso en la misma operación permite: a) reducir los tiempos de operación de los procesos de arranque de viruta por super acabado entre 20 a 30% (López, et al., 2008); b) comprimir la capa de material de la superficie, lo cual incrementa la dureza y elimina la necesidad de utilizar dos procesos (además del propio acabado de la pieza por arranque de viruta, un tratamiento térmico o termoquímico) que incrementan el tiempo del producto final; c) induce esfuerzos residuales de compresión que incrementan la vida útil de la pieza al aumentar la fatiga, corrosión y desgaste; d) además no generara viruta al ser un proceso DPS comparado con los procesos de arranque de viruta y tratamiento térmico que generan desperdicio y viruta.

Bruñido con bola

Una revisión del estado del arte muestra que el proceso de bruñido con bola permite mejorar propiedades como la calidad superficial al disminuir la rugosidad (Hamadache et al. 2006, Travieso et al. 2011, Rodríguez et al. 2012), incrementar la dureza superficial (Hassan y Al-Dhifi 1999, Yen et al. 2005, Rodríguez et al. 2012) e introducir esfuerzos residuales de compresión (Bouزيد

y Saï 2005, Sayahi et al. 2013). Lo anterior permite incrementar la resistencia al desgaste (Hassan y Al-Dhifi 1999), fatiga (Rodríguez et al. 2012) y corrosión (Díaz, Robert, Boada, 2008); lo que resulta en un incremento de la vida útil de la pieza. Además ofrece otras ventajas como alta precisión dimensional, corrige defectos de maquinado y es considerado un proceso ambientalmente limpio al no generar virutas (Díaz et al., 2008). El bruñido con bola es un proceso de acabado secundario de elaboración en frío, que se realiza en la superficie de piezas maquinadas previamente. El bruñido permite reducir el tiempo de una operación lenta, por ejemplo, el fresado de acabado que se realiza a una rapidez de 3 m·min⁻¹ en una máquina de elevado costo-horario, mientras que la operación de bruñido con bola puede realizarse con un máximo avance de la máquina de hasta 15 m·min⁻¹, o incluso mayor si la máquina lo permite (López et al., 2008).

Para llevar a cabo el proceso se utiliza una herramienta llamada bruñidor, la cual posee como elemento deformante una bola de alta dureza con un diámetro que varía de 3 a 12 mm (Travieso et al., 2011), que generalmente es de diamante sintético, nitruro de titanio o acero con una alta resistencia (Prasad et al. 2006, Travieso et al. 2011, Brostow et al. 2013, Hamadache et al. 2014). La bola ejerce una

fuerza normal lo suficientemente alta para producir una pequeña deformación plástica, lo que produce un desplazamiento de material de los picos a los valles de las micro irregularidades de la superficie, reduciendo la rugosidad y logrando una micro capa de material comprimido con una alta dureza superficial. La profundidad óptima de penetración de la bola se encuentra entre 2 y 10 μm (Shiou y Chen 2003). El proceso se puede llevar a cabo en un torno convencional, torno CNC y fresadora CNC (Mahajan y Tajane 2013). El bruñido con bola inició con el estudio en componentes planos, cilíndricos, esféricos y en la actualidad se está implementando en componentes con geometría compleja (Fig. 1).

del muelle, lo cual se resuelve con los bruñidores de muelle hidrostático (López et al., 2008). En ambas herramientas, la compresión directa de la bola sobre la superficie de las piezas produce una deformación plástica generando una micro capa comprimida de material, lo cual induce esfuerzos residuales de compresión (Bouzzid et al. 2004, Yen et al. 2005, Sarkulvanich et al. 2007, Bougharriou et al. 2010, Sayahi et al. 2013, Rodríguez et al. 2012, Babu et al. 2012), con un valor máximo en la capa subsuperficial (zona muy cercana a la superficie), y que disminuyen con rapidez al aumentar la distancia desde la superficie, estos altos esfuerzos de compresión permiten un incremento en la resistencia a la fractura de las piezas

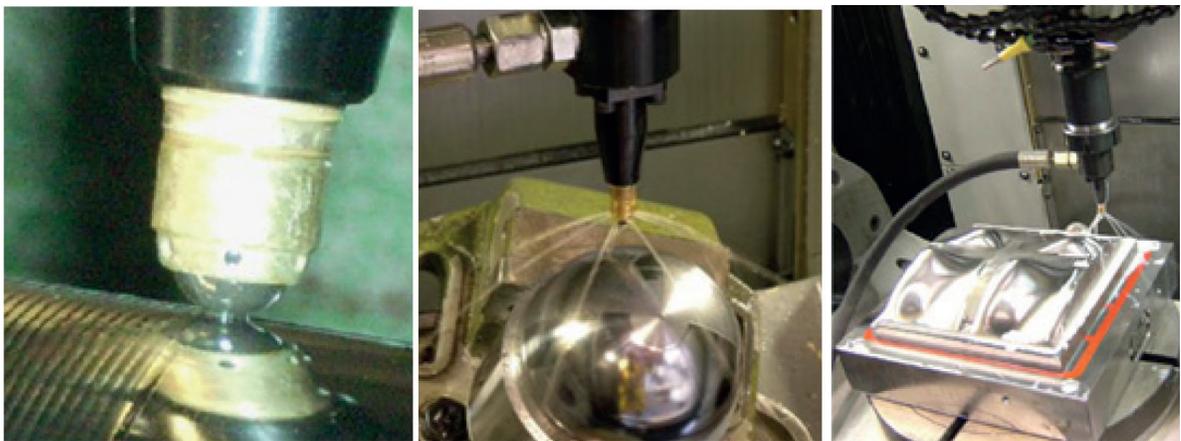


Fig. 1. Bruñido con bola aplicado a superficies cilíndricas, esféricas y complejas (Rodríguez et al. 2012, Travieso et al. 2010, López et al. 2005).

A nivel industrial son utilizados dos tipos de bruñidores de bola, que se clasifican de acuerdo a la forma de sostener la bola (López et al., 2007). La primera herramienta sostiene la bola de forma mecánica, es soportada elásticamente por un muelle con resorte que puede calibrarse por compresión para generar la fuerza normal requerida (Hamadache et al. 2014, John y Vinayagam 2014). La segunda está basada en un muelle hidrostático (López et al., 2007), donde la presión suministrada por una bomba hidráulica con un depósito de taladrina (lubricante de alto poder refrigerante) sostiene la bola de forma hidrostática, proporcionando la fuerza normal requerida para el proceso. La bomba es capaz de bombear con una presión de hasta 40 MPa (Rodríguez y López 2012). La principal desventaja de la herramienta de muelle con resorte es que pierde carga con la carrera

por fatiga, y también un aumento de la resistencia al agrietamiento por corrosión. La técnica experimental más utilizada para cuantificar los esfuerzos residuales inducidos por el bruñido, es la técnica de difracción de rayos X (DRX), que permite cuantificar el campo de esfuerzos residuales desde la superficie y hasta cierta profundidad. La distancia en la que se presentan los esfuerzos residuales compresivos varía entre 0.4 y 2.0 mm de profundidad (Yen et al. 2005, Sai et al. 2005, Bougharriou et al. 2010, Sayahi et al. 2013, Rodríguez et al. 2012), dependiendo del tipo de material y de las características en que se llevó a cabo el proceso de bruñido con bola.

Una gran parte de las investigaciones científicas enfocadas al proceso de bruñido con bola, se han centrado en estudios experimentales para determinar cómo parámetros específicos, tales como: fuerza de

bruñido, avance, velocidad, diámetro de bola, tipo de lubricante, material de la bola, número de pases, entre otros, influyen en el acabado superficial, dureza, redondez, desgaste, esfuerzos residuales de compresión, etc. Los parámetros mayormente estudiados en las diversas investigaciones del proceso, de acuerdo a Mahajan y Tajane (2013), son la fuerza de bruñido (fuerza normal ejercida por la bola sobre la superficie de trabajo), el avance (desplazamiento del bruñidor sobre la superficie) y la velocidad (rotación de la pieza), estudiadas en un 80% de las investigaciones; seguidas por el número de pases del bruñidor y el diámetro de la bola en un 53%. Después el tipo de lubricante con 47% y la profundidad de bruñido con 20%, y en menor estudio el acabado superficial inicial, la dureza inicial, el material de la bola, las revoluciones y el sentido del bruñido con un 7%.

Para medir la integridad de la superficie, la mayoría de las investigaciones se centran en el estudio de la rugosidad superficial y la dureza. El proceso de bruñido con bola, puede mejorar la rugosidad al disminuirla en un rango de 40 a 90% (Shiou y Chen 2003, Low y Wong 2011, Rodríguez et al. 2012, Revankar et al. 2014), mientras que la dureza superficial puede incrementar hasta un 60% (Rao et al. 2008, Rodríguez et al. 2012, Revankar et al. 2014). Las diversas investigaciones del proceso se han enfocado principalmente a estudiar la fuerza de bruñido, el avance y la velocidad, demostrando que una combinación entre la fuerza de bruñido y el avance proporciona una mejora considerable en la rugosidad y la dureza (El-Taweel y El-Axir 2009, Basak y Goktas 2009, Gharbi et al. 2011, Rodríguez et al. 2012, Revankar et al. 2014, Ibrahim et al. 2015). Sin embargo, principalmente para la fuerza de bruñido, existe un valor límite, sobrepasando este límite se genera el deterioro plástico de la superficie produciendo una huella del ancho de contacto de la bola, y en lugar de mejorar la rugosidad, ocasionará que ésta incremente (El-Taweel y El-Axir 2009, Shiou y Chuang 2010, Esme 2010, Rodríguez et al. 2012, Ibrahim et al. 2015). De acuerdo a la literatura estudiada, los autores de este trabajo recomiendan fuerzas por debajo de los 400 N, para evitar el deterioro plástico. Si se desea estudiar este proceso en México se recomienda variar los niveles de fuerza (100-400 N) y avance (0.01-0.40 mm·rev⁻¹) dependiendo del material de estudio (fuerzas altas con avances bajos), ya que la fuerza de bruñido es un

parámetro fundamental en el proceso y su correcta estimación es clave para optimizarlo. Por otro lado, la velocidad se considera como un parámetro que apenas influye en la rugosidad y la dureza en comparación con la fuerza y el avance. En diversos estudios se manifiesta que la velocidad no presenta un efecto significativo (Hamadache et al. 2006, Esme 2010, Sagbas 2011, Rodríguez et al. 2012).

El número de pases es otro de los parámetros de estudio del proceso que ha demostrado mejorar considerablemente la rugosidad superficial y la dureza (Hamadache et al. 2006, El-Taweel y El-Axir 2009, Revankar et al. 2014), además de ser considerado como el segundo factor con mayor influencia (Esme, 2010) después de la fuerza de bruñido. El número de pases se refiere al número de veces que la herramienta pasa por la superficie de la pieza de trabajo. Se han estudiado hasta 7 pases (Nemat y Lyons 2000), sin embargo 2 y 3 pases se recomiendan en el 70% de los estudios. Para el número de pases también existe un valor óptimo, por arriba de este valor, la rugosidad en lugar de reducir también aumentará (El-Taweel y El-Axir 2009, Hamadache et al. 2014, Revankar et al. 2014), este efecto se atribuye al endurecimiento excesivo de la superficie debido a la compresión, la cual produce una descamación superficial de la pieza (Nemat y Lyons 2000, Revankar et al. 2014).

En futuros estudios del proceso de bruñido con bola se recomienda aplicar entre 2 y 4 pases, ya que al incrementar este número de pases, se ha visto en diversos materiales que en lugar de mejorar la rugosidad y la dureza, empeoran (Nemat y Lyons 2000, Basak et al. 2009, Hamadache et al. 2014, Revankar et al. 2014, Ibrahim et al. 2015).

Las principales propiedades físicas que se han estudiado después del bruñido con bola, son la rugosidad media y la redondez de la pieza. La redondez es la diferencia entre el radio máximo y mínimo del perfil, este parámetro es relevante para el acoplamiento de una pieza mecánica, la fuerza de redondez tiene un efecto negativo en la precisión dimensional y el desgaste de elementos rotativos. En la literatura se estudió cómo la velocidad, el avance, el número de pases, la profundidad de bruñido y la fuerza de bruñido afectan a la fuerza de redondez. El-Axir e Ibrahim en 2005 encontraron que con una fuerza de 150 N, un avance de 0.12 mm·rev⁻¹ y una velocidad

de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ la fuerza de redondez es cercana a cero en acero dulce. La misma aseveración presentó Ibrahim et al., en 2009 para una velocidad a $15 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ y un avance de $0.58 \text{ mm}\cdot\text{rev}^{-1}$. Además, los autores probaron la combinación del número de pases y la profundidad de bruñido, encontrado que con 4 pases y una profundidad promedio de 0.030 mm , la fuerza de redondez es cercana a $10 \mu\text{m}$.

En menor medida se han realizado estudios de redondez, fricción y desgaste (El-Axir e Ibrahim 2005, El-Tayeb et al. 2007, Ibrahim et al. 2009, Low y Wong 2011), que muestran al proceso de bruñido con bola como un proceso potencial para la mejora de estas propiedades. Sin embargo, existe la necesidad de profundizar aún más en esta área.

Adicionalmente se han realizado estudios numéricos del proceso de bruñido mediante el método de elemento finito (MEF), el cual ha adquirido gran relevancia en la solución de problemas de ingeniería. Se han desarrollado diversos modelos 2D y 3D de bruñido con bola (Fig. 2), con la finalidad de mejorar y optimizar el proceso. Una vez validado el modelo con pruebas experimentales, es posible utilizarlo para estudiar el proceso en diversas condiciones que no fueron evaluadas de forma experimental, obteniendo resultados satisfactorios y reduciendo el costo que representan las pruebas experimentales. Los modelos desarrollados en diversos tipos de software (Deform®, Zébulon®, ABAQUS®, ANSYS®, etc.), se han utilizado principalmente para estudiar los esfuerzos residuales después del proceso, así como su profundidad (Yen et al. 2005, Sai et al. 2005, Sartkulvanich et al. 2007, Bougharriou et al. 2010, Rodríguez et al. 2012, Mohammadi et al. 2014), ya que como se mencionó anteriormente, estos esfuerzos residuales de

compresión permiten incrementar la vida útil de las piezas manufacturadas al incrementar su resistencia.

Conclusiones

El análisis de la literatura ha demostrado que el proceso de bruñido con bola permite mejorar la rugosidad, dureza, redondez y las resistencias al desgaste, corrosión y fatiga de piezas manufacturadas, permitiendo sustituir métodos tradicionales.

Para la optimización del bruñido con bola, los autores del presente trabajo recomiendan utilizar combinaciones entre los parámetros de mayor influencia, fuerza de bruñido entre 100 y 400 N , avance entre 0.01 y $0.40 \text{ mm}\cdot\text{rev}^{-1}$ así como un máximo entre 2 y 4 pases de bruñido para obtener una mejora sustancial en la rugosidad y la dureza (en aceros y aluminios). Por arriba de estos valores, es posible que se produzca un deterioro plástico del material.

Adicionalmente, se recomienda desarrollar modelos de elemento finito que permitan mejorar la comprensión y optimización del proceso.

Un área de oportunidad para la investigación no sólo en nuestro país, sino en el mundo en general, es el estudio del bruñido de bola a nuevos materiales, en nuevas aplicaciones industriales, el estudio de la combinación de los parámetros del proceso, así como el estudio de propiedades con poca investigación como son redondez, fatiga, corrosión y desgaste **T**

Referencias Bibliográficas

Babu, P., K. Ankamma, T. Prasad, A. Raju y N. Prasad. (2012). Optimization of burnishing parameters and determination of select surface characteristics in engineering materials. *Sadhana*. Vol. 4(37). 503-520.

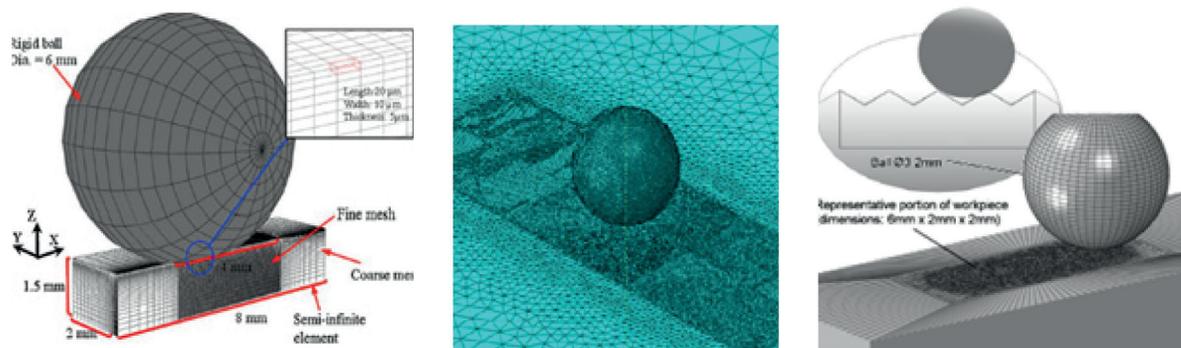


Fig. 2. Modelos de elemento finito del proceso de bruñido con bola (Fu et al. 2014, Mohammadi et al. 2014, Baland et al. 2013).

- Balland, P., L. Tabourot, F. Degre y V. Moreau. (2013). Mechanics of the burnishing process. *Precision Engineering*. Vol. 37(1). 129-134.
- Basak, H. y H. H. Goktas. (2009). Burnishing process on al-alloy and optimization of surface roughness and surface hardness by fuzzy logic. *Materials & Design*. Vol. 30(4). 1275-1281.
- Bougharriou, A., K. Saï y W. Bouzid. (2010). Finite element modelling of burnishing process. *Materials Science and Technology*. Vol. 25(1). 56-62.
- Bouzid, W. S. y K. Saï. (2005). Finite element modeling of burnishing of AISI 1042 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 25(5-6). 460-465.
- Bouzid, W., O. Tsumarev y K. Sai. (2004). An investigation of surface roughness of burnished AISI 1042 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 24(1-2). 120-125.
- Brostow, W., K. Czechowski, W. Polowski, P. Rusek, D. Tobola, y I. Wronska. (2013). Slide diamond burnishing of tool steels with adhesive coatings and diffusion layers. *Materials Research Innovations*. Vol. 17(4). 269-277.
- Cerillo, I., A. Rodríguez, R. Polvorosa, S. Plaza y J. M. Pérez. (2015). Integridad de pieza: ¿concierno a un mecanizador?, Universidad del País Vasco. (19 de diciembre de 2015).
- Chen, C. H., y F. J. Shiou. (2003). Determination of optimal ball-burnishing parameters for plastic injection moulding steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 21(3). 177-185.
- Díaz, R. S., C. O. Boada y N. T. Robert. (2015). Caracterización del bruñido por rodillo simple para la elaboración superficial de piezas. Artículo recuperado de internet (15 de septiembre de 2015).
- Díaz, R. S., C. O. Boada y S. C. Padrón. (2009a). Implementación de un procedimiento metodológico para la elaboración de piezas por bruñido con rodillo simple. *Ingeniería Mecánica*. Vol. 12(1). 81-91.
- Díaz, R. S., N. T. Robert y C. O. Boada. (2009b). Efectos superficiales del bruñido por rodillo en el acero AISI 1045. *Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. Vol. 29. 15-22.
- El-Axir, M. H. y A. A. Ibrahim. (2005). Some surface characteristics due to center rest ball burnishing. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 167(1). 47-53.
- El-Taweel, T. A., y M. H. El-Axir. (2009). Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 41(3-4). 301-310.
- El-Tayeb, N. S. M., K. O. Low y P. V. Brevern. (2007). Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behavior of Aluminium 6061. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 186(1). 272-278.
- Esme, U. (2010). Use of grey based Taguchi method in ball burnishing process for the optimization of surface roughness and microhardness of AA 7075 aluminum alloy. *Materials and technology*. Vol. 44(3). 129-135.
- Fu, C. H., M. P. Sealy, Y. B. Guo y X. T. Wei. (2014). Austenite-martensite phase transformation of biomedical Nitinol by ball burnishing. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 214(12). 3122-3130.
- Gharbi, F., S. Sghaier, K. J. Al-Fadhlah y T. Benameur. (2011). Effect of ball burnishing process on the surface quality and microstructure properties of AISI 1010 steel plates. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol. 20(6). 903-910.
- Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. México: Pearson Educación.
- Hamadache, H., L. Laouar, N. E. Zeghib y K. Chaoui. (2006). Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 180(1). 130-136.
- Hamadache, H., Z. Zemouri, L. Laouar y S. Dominiak. (2014). Improvement of surface conditions of 36 Cr Ni Mo 6 steel by ball burnishing process. *Journal of Mechanical Science and Technology*. Vol. 28(4). 1491-1498.
- Hassan, A. M., y A. M. Momani. (2000). Further improvements in some properties of shot peened components using the burnishing process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 40(12). 1775-1786.

- Hassan, A. M., y S. Z. Al-Dhifi. (1999). Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 96(1). 73-80.
- Ibrahim, A. A., S. A. Rabbo, M. H. El-Axir y A. A. Ebied. (2009). Center rest balls burnishing parameters adaptation of steel components using fuzzy logic. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 209(5). 2428-2435.
- Ibrahim, A. A., T. Khalil y T. Tawfeek. (2015). Study the influence of a new ball burnishing technique on the surface roughness of AISI 1018 low carbon steel. *International Journal of Engineering & Technology*. Vol. 4(1). 227-232.
- John, M. S. y B. K. Vinayagam. (2014). Optimization of nonlinear characteristics of ball burnishing process using Sugeno fuzzy neural system. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. Vol. 36(1). 101-109.
- John, M. S., y B. K. Vinayagam. (2011). Optimization of ball burnishing process on tool steel (T215Cr12) in CNC machining centre using response surface methodology. *Arabian Journal for Science and Engineering*. Vol. 36(7). 1407-1422.
- Kalpakjain, S. y S. R. Schmid. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Pearson Educación.
- López, D. L. L. N. y R. A. Ezquerro. (2012). Métodos de mejora de las propiedades funcionales de superficies maquinadas. VII Congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica. Cusco, Perú, 23 al 25 de Octubre del 2012
- López, D. L. L., A. Lamikiz, J. A. Sánchez y J. L. Arana. (2007). The effect of ball burnishing on heat-treated steel and Inconel 718 milled surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 32(9-10). 958-968.
- López, D. L. L., A. Lamikiz, J. Muñoa y J. A. Sánchez. (2005). Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 45(15). 1659-1668.
- López, D. L. N., A. Lamikiz, J. Muñoa, A. Celaya, F. J. Campa. (2008). Reducción del tiempo de la fase de acabado de troqueles para conformado de aceros avanzados de alta resistencia. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*. Vol. 12(1). 59-76.
- Low, K. O. y K. J. Wong. (2011). Influence of ball burnishing on surface quality and tribological characteristics of polymers under dry sliding conditions. *Tribology International*. Vol. 44(2). 144-153.
- Mahajan, D. y R. Tajane. (2013). A Review on Ball Burnishing Process. *International Journal of Scientific and Research Publications*. Vol. 3(4). 1-8.
- Mohammadi, F., R. Sedaghati y A. Bonakdar. (2014). Finite element analysis and design optimization of low plasticity burnishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 70(5-8). 1337-1354.
- Nemat, M. y A. C. Lyons. (2000). An investigation of the surface topography of ball burnished mild steel and aluminium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 16(7). 469-473.
- Prasad, K., R. Krishna, G. Janardhan, A. Raju y S. Nahavandi. (2006). Experimental investigation and finite element analysis for the study of residual stresses in roller burnished components. *International Journal of Applied Engineering Research*. Vol. 1(3). 427-436.
- Rao, D. S., H. S. Hebbar, M. Komaraiah y U. N. Kempaiah. (2008). Studies on the effect of ball burnishing parameters on surface hardness of HSLA dual-phase steels using factorial design. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. Vol. 61(2-3). 187-191.
- Ravuri, M. K., E. P. Koorapati y G. K. Srinivas. (2009). Optimization of Burnishing Parameters by the Application of Design of Experiments. *International Journal of Applied Engineering Research*. Vol. 4(7). 1247-1257.
- Revankar, G. D., R. Shetty, S. Rao. S. y V. N. Gaitonde. (2014). Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of titanium alloy. *Measurement*. Vol. 58. 256-268.
- Rodríguez, A., L. N. D. López, A. Celaya, A. Lamikiz y J. Albizuri. (2012). Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique. *Surface and Coatings Technology*. Vol. 206(11). 2817-2824.
- Rodríguez, E. A. y L. L. N. López. (2012). *Tratamientos mecánicos superficiales para mejora de piezas mecanizadas: Bruñido con Bola*. España: Editorial Académica Española.

- Sagbas, A. (2011). Analysis and optimization of surface roughness in the ball burnishing process using response surface methodology and desirability function. *Advances in Engineering Software*. Vol. 42(11). 992-998.
- Sai, W. B. y K. Sai. (2005). Finite element modeling of burnishing of AISI 1042 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 25(5-6). 460-465.
- Sartkulvanich, P., T. Altan, F. Jasso y C. Rodríguez. (2007). Finite element modeling of hard roller burnishing: an analysis on the effects of process parameters upon surface finish and residual stresses. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. Vol. 129(4). 705-716.
- Sayahi, M., S. Sghaier y H. Belhadjsalah. (2013). Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 67(5-8). 1665-1673.
- Sequera, A., C. H. Fu, Y. B. Guo y X. T. Wei. (2014). Surface Integrity of Inconel 718 by Ball Burnishing. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol. 23(9). 3347-3353.
- Shiou, F. J. y C. H. Chuang. (2010). Precision surface finish of the mold steel PDS5 using an innovative ball burnishing tool embedded with a load cell. *Precision Engineering*. Vol. 34(1). 76-84.
- Shiou, F. J., y C. C. Hsu. (2008). 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*. Vol. 205(1). 249-258.
- Shiou, F. J., y C. H. Chen. (2003). Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 140(1). 248-254.
- Shiou, F. J., y C. H. Cheng. (2008). Ultra-precision surface finish of NAK80 mould tool steel using sequential ball burnishing and ball polishing processes. *Journal of Materials processing technology*. Vol. 201(1). 554-559.
- Shiou, F. J., y C. H. Chuang. (2010). Precision surface finish of the mold steel PDS5 using an innovative ball burnishing tool embedded with a load cell. *Precision Engineering*. Vol. 34(1). 76-84.
- Tillmann, W., P. Hollingsworth, I. Baumann, L. Hiegemann, C. Weddeling, A. E. Tekkaya, S. Rausch y D. Biermann. (2014). Thermally sprayed finestructured WC-12Co coatings finished by ball burnishing and grinding as an innovative approach to protect forming tools against wear. *Surface and Coatings Technology*. Vol. 268. 134-141.
- Travieso J. A., A. J. Sánchez, A. A. Nápoles, J. L. Huer-tas, D. Gómez y H. A. González. (2012). Comparativa del proceso de bruñido con bola en máquinas de 3 y 5 ejes en piezas de aluminio A92017 y A 96351. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. España.
- Travieso R. J. A., G. Dessein y H. A. González. (2011). Improving the surface finish of concave and convex surfaces using a ball burnishing process. *Materials and Manufacturing Processes*. Vol. 26(12). 1494-1502.
- Travieso, R. J. A. (2010). Estudio para la mejora del acabado superficial de superficies complejas, aplicando un proceso de deformación plástica (Bruñido con Bola), Tesis Doctoral. Barcelona, España. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Yen, Y. C., P. Sartkulvanich y T. Altan. (2005). Finite element modeling of roller burnishing process. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. Vol. 54(1). 237-240.