

# EFECTO DEL BRUÑIDO SOBRE LA DUREZA SUPERFICIAL EN UN ACERO PARA CUCHILLAS AGRÍCOLAS

López Figueroa Eduardo (1), Saldaña Robles Alberto (2), Saldaña Robles Adriana (2), Gutiérrez Vaca César (2), Saldaña Robles Noé (2), Damián Ascencio César Eduardo (3)

1 [Licenciatura en Ingeniería Mecánica Agrícola, Campus Irapuato-Salamanca, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato] | [e.lopezfigueroa@ugto.mx]

2 [Departamento de Ingeniería Agrícola, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [alberto.saldana@ugto.mx]

3 [Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [cesar.damian@ugto.mx]

## Resumen

El bruñido con bola es un proceso de Deformación Plástica Superficial (DPS) que permite mejorar la dureza superficial de las piezas manufacturadas. En este trabajo, se presenta un estudio experimental del bruñido con bola en acero AISI-1045. Se planteó un Diseño Central Compuesto (DCC) y Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) para estudiar la influencia de los principales parámetros del bruñido: fuerza, velocidad y número de pases sobre la dureza superficial. El bruñido con bola logró incrementar la dureza superficial del acero en un 54% (de 208 a 321 HV), utilizando una fuerza de bruñido, velocidad y número de pases de 300 N,  $0.21 \text{ mm}\cdot\text{seg}^{-1}$  y 4, respectivamente. Una combinación de velocidades bajas con fuerzas altas y varios pases permitirán un incremento sustancial de la dureza superficial del acero AISI-1045.

## Abstract

Ball-burnishing is a Surface Plastic Deformation process (SPD) that improves the surface hardness of manufactured parts. In this work, an experimental study of ball-burnishing in AISI-1045 steel was carried out. A Central Composite Design (CCD) and Response Surface Methodology (RMS) was proposed to study the influence of the main burnishing parameters: force, speed and number of tool passes on surface hardness. Ball-burnishing increased surface hardness of steel around 54% (from 208 to 321 HV), by using a burnishing force, speed and number of tool passes of 300 N,  $0.21 \text{ mm}\cdot\text{seg}^{-1}$  and 4, respectively. A substantial increase in surface hardness of AISI-1045 steel can be obtained with a combination of low speeds with high burnishing forces and several tool passes.

## Palabras Clave

Bruñido con bola; ANOVA; Gráfica de Superficie; Acero AISI-1045; Dureza Vickers.

## INTRODUCCIÓN

### Bruñido con bola

En la actualidad empresas de diversos sectores, tales como: aeronáutica, automotriz, ferrocarrilera, aeroespacial, agrícola, entre otras; implementan y desarrollan investigación de nuevos procesos que permiten mejorar las propiedades físico-mecánicas de las piezas manufacturadas [1]. El incremento de algunas propiedades físico-mecánicas permite un incremento sustancial de la vida útil de la pieza.

Los procesos de Deformación Plástica Superficial, conocidos como procesos “DPS” (impacto por láser, pulido con diamante, granallado, bruñido, vibración ultrasónica, etc.) han demostrado mejorar la dureza, rugosidad, inducir esfuerzo residual compresivo e incrementar las resistencias al desgaste, fatiga y corrosión [2]. Dentro de los diversos procesos DPS, el bruñido con bola es un proceso de elaboración en frío: rápido, sencillo y de bajo costo; el cual ha demostrado incrementar diversas propiedades que mejoran la resistencia de piezas manufacturadas. Además el bruñido con bola ha demostrado ser un proceso que consume menor cantidad de energía y ambientalmente más limpio en comparación con algunos de los procesos de arranque y tratamiento térmico.

El bruñido con bola se realiza con una herramienta llamada bruñidor, el cual utiliza como elemento de trabajo una bola de acero de alta resistencia o de diamante sintético, con diámetros de entre 3 a 21 milímetros. El bruñido con bola generalmente se realiza en tornos convencionales, tornos CNC y fresadoras CNC. El proceso consiste en aplicar una fuerza normal lo suficientemente alta sobre la superficie de la pieza para generar una micro-deformación plástica del material [3].

Aunque la investigación del bruñido con bola tiene más de treinta años, en los últimos se incrementado la investigación experimental en diversos países, por mencionar algunos: España, Estados Unidos, Polonia, Taiwán, Turquía, India, Argelia, Jordania, etc. Las aplicaciones más usuales son: moldes de inyección (plástico), herramientas para conformado y corte, frenos, alabes, vástagos, acoplamientos, ejes, engranes, rotores, entre otros elementos [1]. Sin embargo, el proceso de bruñido se comienza aplicar en una diversidad de piezas en los diversos sectores industriales, debido a las bondades que

ofrece este proceso de mejoramiento de integridad superficial, características exteriores e interiores.

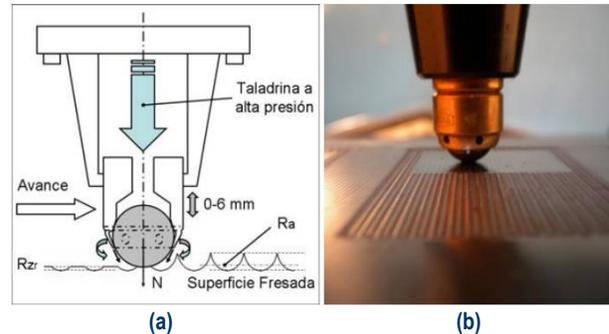


IMAGEN 1: (a) Principio de bruñido con bola; (b) bola cerámica [4].

La investigación del proceso se centra en estudios experimentales principalmente. En ellos se estudia como algunas de las variables del proceso, tales como: fuerza, avance, velocidad, número de pases, tamaño de la bola, rugosidad, tipo de lubricante, profundidad de bruñido, etc.; influyen en la dureza, la rugosidad final, el desgaste, etc. De las diversas variables de estudio de acuerdo a la literatura, el número de pases, el avance y la fuerza de bruñido son parámetros que mejoran sustancialmente la dureza superficial, la cual tiene una relación directa con el desgaste. En otras palabras, al incrementar la dureza incrementa la resistencia al desgaste y la corrosión de la pieza bruñida con bola. De acuerdo a la literatura, la dureza después del proceso de bruñido con bola puede incrementar entre un 17% y hasta un 60% del valor inicial, de acuerdo a los parámetros del proceso y el material [5-6].

En nuestro país, de acuerdo a Saldaña *et al.* [1], el bruñido con bola recientemente se ha implementado en el sector automotriz, con el objetivo de sustituir procesos convencionales por arranque de material. Además se espera la incursión de este proceso en otros sectores industriales, ya que el bruñido con bola promete un avance científico y tecnológico con altos beneficios para nuestro país.

En el presente trabajo, se estudia mediante diseño de experimentos la influencia de las principales variables del proceso de bruñido con bola (fuerza de bruñido, velocidad y número de pases) sobre la dureza superficial del acero AISI-1045, utilizado ampliamente en el sector agrícola para fabricar diversos elementos, entre ellos la manufactura de diversas cuchillas agrícolas. Los resultados podrán usarse para implementar el bruñido en cuchillas y elementos agrícolas y con ello mejorar su vida útil.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Estudio experimental de bruñido con bola

- *Diseño de experimentos y parámetros de prueba*

En este estudio se planteó un Diseño Central Compuesto (DCC) aleatorio con puntos centrales (Tabla 1). Con el DCC propuesto se desea investigar el efecto de la fuerza de bruñido (F), la velocidad (V) y el número de pases (NP) sobre la dureza superficial (HV) después del bruñido con bola. El experimento dio lugar a un total de 16 pruebas experimentales. Los niveles de cada factor fueron elegidos de la literatura revisada y de acuerdo a características de operación del equipo.

**Tabla 1. Factores y niveles para DCC.**

Factores/Niveles	-2	-1	0	1	2
Número de pases	1	2	3	4	5
Fuerza (N)	32	100	200	300	400
Velocidad (mm·s <sup>-1</sup> )	0.10	0.21	0.42	0.62	0.75

- *Material y geometría de la pieza de trabajo*

El acero AISI-1045 es ampliamente utilizado para la manufactura de cuchillas agrícolas. El acero fue recibido en solera de 1-½ x ¼ pulgadas de ancho y espesor, respectivamente. Para realizar las pruebas experimentales se maquinaron 8 probetas de 1-½ x 3-¾ x ¼ pulgadas de ancho, largo y espesor, respectivamente. Las probetas se rectificaron para establecer la misma condición superficial inicial en una rectificadora magnética plana marca Favretto modelo VB100 a 900 rpm (Imagen 2).



**IMAGEN 2: (a) Rectificado de probetas en la máquina VB100.**

- *Metodología de los ensayos experimentales*

Los ensayos experimentales de bruñido con bola se llevaron a cabo en un cepillo mecánico marca ROCCO modelo 450. Para el bruñido se utilizó la herramienta de bruñido “Diamond Burnishing Tool EDP# S2300-00”, producida por ELLIOTT® Tool Technologies. El bruñidor cuenta con un fragmento de diamante semicircular de ½ pulgada de diámetro. Para montar el bruñidor en el cepillo, se diseñó y fabricó un porta-herramienta (Imagen 3a). En cada probeta se realizaron dos pruebas de bruñido con bola como se muestran en la Imagen 3b. La Tabla 2 muestra las combinaciones de los tratamientos así como el orden de prueba estimada por medio de aleatorización, bajo este orden se llevaron las pruebas. La fuerza (F) se aplicó por desplazamiento vertical, mientras que el avance (A) y el número de pases (N) se aplicó con los controles del cepillo.



**IMAGEN 3: (a) Bruñidor en cepillo; (b) dos ensayos por probeta.**

### Medición de dureza y evaluación de resultados

Para registrar la dureza superficial de los ensayos experimentales se empleó un micro-durómetro de la marca MATSUZAWA modelo MMT-X (Imagen 4a). Se realizó un registro de 10 mediciones de la dureza Vickers (HV), las mediciones se evaluaron perpendiculares al bruñido con bola y de acuerdo a la norma ASTM-E92 [7] se espaciaron 2.5 veces la longitud de la diagonal de la indentación anterior. A partir del centro del área bruñida se registraron 5 mediciones a la derecha y 5 a la izquierda (Imagen 4b), obteniendo la media de las mediciones para cada prueba. En el ensayo de dureza Vickers, el indentador es una pirámide con base cuadrada y el ángulo medio entre caras (e) es de 68°. Por lo que, la dureza Vickers se calcula como la carga

entre el área de contacto ( $A_T$ ). Para evaluar la dureza Vickers se utilizó una carga de 0.5 kgf y un tiempo de indentación de 15 s. El MMT-X utiliza la expresión (1) [7] para determinar el valor de la dureza. Donde,  $d$  es el promedio de las longitudes de las diagonales de la impresión en milímetros y  $P$  es la carga en Newton.

$$HV = \frac{P}{A_T} = \frac{2 \cdot P \cdot \text{sen}\theta}{d^2} = 1.8544 \cdot \frac{P}{d^2} \quad (1)$$



IMAGEN 4: (a) Micro-durómetro; (b) ensayo de dureza Vickers.

La Imagen 5 muestra la micrografía de un ensayo de dureza a una probeta bruñida, la micrografía se tomó con un objetivo de 400x. La imagen muestra la longitud de las diagonales de la impresión.

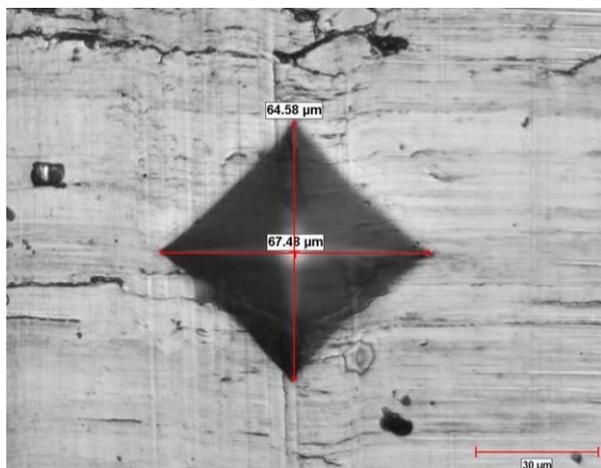


IMAGEN 4: Micrografía de ensayo de dureza en probeta bruñida.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las 16 pruebas llevadas a cabo y basadas en el DCC, se muestran en la Tabla 2. La dureza del material después del rectificado y antes del bruñido experimental resultó de 208 HV.

El DCC de tres factores ( $A$ - $NP$ ,  $B$ - $F$  y  $C$ - $V$ ) permite investigar diez efectos:  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $AB$ ,  $AC$ ,  $BC$ ,  $ABC$ ,  $A^2$ ,  $B^2$  y  $C^2$ . Una vez cumplidos los supuestos de normalidad para la variable de respuesta dureza superficial "HV" (residuos, predichos vs residuos y orden vs residuos) [8], se realizó el análisis de varianza (ANOVA) y se presenta en la Tabla 3.

Tabla 2. Valores experimentales de bruñido.

Prueba No.	Prueba Aleatoria	NP	F (N)	V (mm·rev <sup>-1</sup> )	HV
1	15	2	100	0.21	244.6
2	9	4	100	0.21	234.4
3	12	2	300	0.21	234.3
4	13	4	300	0.21	321.4
5	14	2	100	0.62	244.3
6	4	4	100	0.62	216.0
7	2	2	300	0.62	231.5
8	10	4	300	0.62	234.3
9	1	1	200	0.42	234.5
10	16	5	200	0.42	254.8
11	6	3	32	0.42	239.6
12	3	3	400	0.42	247.2
13	5	3	200	0.10	283.9
14	8	3	200	0.75	237.1
15	7	3	200	0.42	257.8
16	11	3	200	0.42	257.6

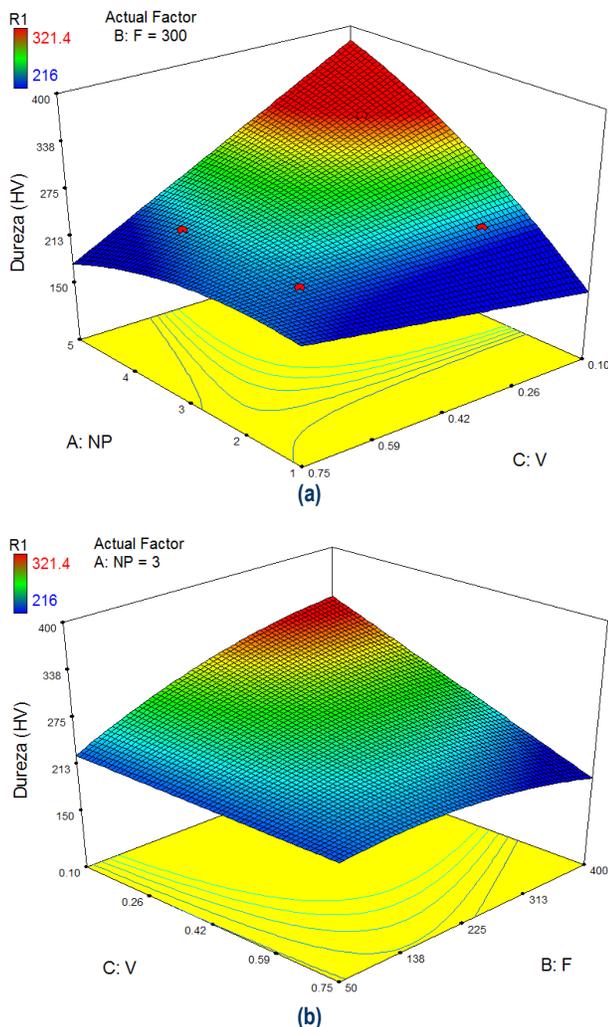
Tabla 3. ANOVA para la variable dureza superficial (HV).

FV	SC	GL	CM	F <sub>0</sub>	valor-p
Modelo	8900.46	10	890.05	16.94	0.0030
A-NP	535.79	1	535.79	10.20	0.0242
B-F	660.58	1	660.58	12.57	0.0165
C-V	2568.98	1	2568.98	48.90	0.0009
AB	2060.82	1	2060.82	39.22	0.0015
AC	1310.72	1	1310.72	24.95	0.0041
BC	633.68	1	633.68	12.06	0.0178
A <sup>2</sup>	283.01	1	283.01	5.39	0.068
B <sup>2</sup>	330.07	1	330.07	6.28	0.0541
C <sup>2</sup>	0.055	1	0.055	1.04E-03	0.9755
ABC	547.8	1	547.8	10.43	0.0232
Residual	262.7	5	52.54		
Cor Total	9163.15	15			

FV = fuente de variabilidad; SC = suma de cuadrados; GL = grados de libertad; CM = cuadrado medio; F<sub>0</sub> = estadístico de prueba; valor-p = significancia observada.

El valor-p inferior a 0.05 indica que tenemos del modelo son significativos. En este caso A, B, C, AB, AC, BC y ABC son significativos a un nivel de confianza de 95%. El valor-p superior a 0.10 indica los términos del modelo que no son significativos. Es decir, los efectos principales (fuerza, velocidad y número de pases) así como sus interacciones

afectan de forma significativa la dureza superficial. El bruñido con bola aplicado al acero AISI-1045 en este estudio, permitió un incremento en la dureza superficial del 54% (208 a 321 HV) con un número de pases, fuerza de bruñido y velocidad de 4, 300 N y  $0.21 \text{ mm}\cdot\text{seg}^{-1}$ , respectivamente. El coeficiente  $R^2$  determina la calidad del modelo para replicar los resultados. En el estudio,  $R^2$  se obtiene igual a 96.7%, indicando que los parámetros de bruñido explican el 96.7% de la varianza de la dureza. La Imagen 5 muestra Gráficos de Superficie (GS), que modelan el comportamiento de la dureza.



**IMAGEN 5. GS; (a) velocidad-pases; (b) velocidad-fuerza.**

En la Imagen 5a se muestra el comportamiento de la dureza en función de los pases y la velocidad

para la fuerza de 300 N. En la imagen se observa que la dureza incrementa sustancialmente cuando se disminuye la velocidad e incrementan los pases. La Imagen 5b modela la tendencia de la dureza en función de la fuerza y la velocidad, se observa que un aumento sustancial de la dureza se obtiene al incrementar la fuerza y disminuir la velocidad. Para el modelo de la dureza en función del número de pases y la fuerza, la dureza incrementa de manera considerable cuando ambas variables aumentan.

## CONCLUSIONES

El análisis estadístico para la dureza reveló que la fuerza, la velocidad, el número de pases y sus interacciones (en la región de estudio), afectan de forma significativa la dureza superficial. El proceso de bruñido permitió incrementar la dureza arriba del 54%, resultado de la combinación de las variables del estudio. Una combinación de velocidades bajas con fuerzas altas y varias pasadas permitirán un incremento sustancial de la dureza del acero AISI-1045. Los resultados del estudio pueden utilizarse en un futuro para el bruñido de cuchillas agrícolas, evaluando su resistencia al desgaste y rayado.

## REFERENCIAS

- [1]. Saldaña-Robles A. L., Flores-Ortega A., Saldaña-Robles A., Saldaña-Robles N. & Gutiérrez- Vaca C. (2017). Bruñido con bola como proceso de acabado superficial y mejoramiento de propiedades físico-mecánicas de piezas manufacturadas. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 21(61), 41-49.
- [2]. Travieso-Rodríguez. 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.
- [3]. Mahajan, D. & Tajane, R. (2013). A review on ball burnishing process. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(4), 1-8.
- [4]. Rodríguez A., López-De Lacalle L., Celaya A., Fernández A., & Ugalde U. J. (2010). Aplicación del bruñido con bola para el acabado de superficies complejas en máquinas multieje. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Ciudad Real, España, 3-5 de noviembre, 1-8.
- [5]. Rodríguez A., López-De Lacalle L. N., Celaya A., Lamikiz A., & Albizuri J. (2012). Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique. *Surface and Coatings Technology*, 206(11), 2817-2824.

- [6]. Revankar G. D., Shetty R., Rao S. S., & Gaitonde V. N. (2014). Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of titanium alloy. *Measurement*, 58, 256-268.
- [7]. ASTM-E92. (1997). Standard test method for Vickers hardness of metallic materials. ASTM International.
- [8]. Gutiérrez-Pulido H. & De la vara-Salazar R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. Segunda edición. Editorial MC Graw Hill. México.